AMÉLIORATION DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE TERRAIN SUR UN ESTRAN INTERTIDAL DE LA MER DU NORD PAR L'APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE : THE SHORELINE DETECTION METHOD.

Aline AUBRY[1,2,3,*], Antoine GARDEL[1,2,3], Matthieu JEANSON[1,2,3] et Sandric LESOURD[1,2,3]

[1] Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France; [2] ULCO, LOG, F-62930 Wimereux, France; [3] CNRS, UMR8187, R-62930 Wimereux; aline.aubry@univ-pau.fr ; antoine.gardel@univ-littoral.fr ; matthieu.jeanson@univ-pau.fr ; sandric.lesourd@univ-littoral.fr ; Télécopie : 00 33 3 21 99 64 01
Adresse postale : LOG, UMR CNRS 8187, 32 avenue Foch 62930 Wimereux

Soumis le 23 mai 2011 ; accepté le 25 avril 2012 - © *Revue Télédétection*, 2012, vol. 11, n° 1, pp. 251-262

Résumé
Cette étude évalue la capacité des capteurs satellites multispectraux SPOT5 et Formosat-2 d'une résolution spatiale respective de 10 m et 8 m, pour la mesure indirecte de la topographie des estrans d'une plage macrotidale dans le nord de la France. Le secteur d'étude (12 km²) caractérisé par une grande diversité morphologique (plage à barres intertidales, sandflat, dunes) et sédimentaire (dépôts vaseux en milieu ouvert) est de ce fait approprié pour l'utilisation de la télédétection. La méthode utilisée consiste à (1) extraire indirectement la topographie des zones intertidales en utilisant des séries d'images satellites acquises à des pas de temps fins mais à des hauteurs de marée différentes et à (2) comparer les mesures extraites et celles réalisées in situ le long de transects topographiques et en semis de points réguliers (Modèle Numérique de Terrain). La quantification des marges d'erreurs entre les deux approches démontre l'intérêt de cette méthode pour compléter des mesures conventionnelles in situ ou aéroportées et qui peut se montrer particulièrement intéressantes sur des zones intertidales éloignées voire difficiles d'accès.

Mots-clés : ligne de rivage, macrotidale, topographie, SPOT5, Formosat-2.

IMPROVEMENT OF THE DIGITAL MODELLING OF AN INTERTIDAL FORESHORE OF THE NORTH SEA COAST OF FRANCE BY THE CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING: THE SHORELINE DETECTION METHOD.

Abstract
This study evaluated the ability of the SPOT5 and Formosat-2 satellite based-sensors, which have different band wavelengths and different spatial resolutions (10 m, 8m) , to extract waterlines of a macrotidal beach in northern France. The study area (12 km²) is characterized by a large suite of sedimentary facies and morphological features (beach with multiple intertidal bars, sandflat, coastal foredune….) relevant in evaluating remote sensing monitoring methods.
Extracting waterlines under various water-level conditions can provide topographic information on the intertidal area because the waterlines can be regarded as contours. Satellite sensors can extract waterlines across a wide area, and this waterline detection method can serve as an alternative to digital elevation models (DEM) created by an aircraft-based light-detection and photogrammetric methods. By regarding beach waterlines as shorelines, data from satellite sensors can be used to detect shorelines and supplement the conventional aerial photograph method of shoreline change analyses or in situ measurements.

Ability to extract waterlines was quantified by calculating errors of extracted waterline positions relative to the true positions, which were determined by measuring topography along some transects using a differential GPS and a total station.

Finally this work focuses on the use of SPOT and Formosat-2 images and their comparison with topographic in situ data. The results serve as general guidelines for using satellite-derived data to estimate intertidal topography. Waterline extraction based on satellite sensor data should prove particularly useful in remote areas difficult to access.

Keywords: Shoreline, waterlines, macrotidal, topography, SPOT5, Formosat-2.

1. INTRODUCTION

Les côtes basses sableuses représentent environ 20 % du linéaire côtier autour du monde et doivent faire face à de fortes pressions anthropiques (villes, complexes-industrialo-portuaires...), aux changements globaux (intensification présumée des tempêtes, élévation du niveau de la mer), à la récurrence des évènements paroxysmiques (cyclones, crues, tempêtes, fortes houles, surcotes, tsunamis, événements météo-marins extrêmes…) et ceci dans un contexte érosif global lié à l'affaiblissement du stock sédimentaire. Il est ainsi primordial d'analyser ces milieux aux multiples enjeux (humains, économiques, fonciers, écologiques et scientifiques) et tout particulièrement les côtes basses en accrétion pour mieux comprendre leur dynamique en vue d'une meilleure gestion.

Compte tenu de la complexité, de l'hétérogénéité et de la très forte mobilité dans le temps et dans l'espace de l'environnement côtier, l'utilisation de la télédétection en complément des approches de terrain est devenue particulièrement intéressante. La télédétection permet d'obtenir une vision à toute échelle (du synoptique au local), multidate et multispectrale des espaces littoraux.

Tous ces outils allant du très court terme à une échelle temporelle pluri-annuelle présentent aujourd'hui un énorme potentiel notamment pour le suivi de la dynamique morpho-sédimentaire (Lee *et al.,* 1998 ; Lafon *et al.*, 2000, 2001, 2002a, 2004 ; Alexander et Holman, 2004 ; Gilvear *et al.,* 2004 ; Gardel et Gratiot, 2005 et 2006,), du trait de côte (White and El Asmar, 1999 ; Ryu *et al.*, 2002 et 2008; Siddiqui and Maajid, 2004 ; Yamano *et al.*, 2006 ; Maiti, et Bhattacharya, 2009 ; Kumar *et al.*, 2010) ou de la bathymétrie des eaux peu profondes (Dehouck *et al.*, 2009 et 2010 ; Lafon *et al.*, 2002b).

Le couplage d'observations et de mesures à la fois par télédétection et par expérimentation *in situ* a été développé pour les besoins de cette étude. Les mesures topographiques *in situ* sur des secteurs difficilement accessibles par l'homme ou spatialement très étendus, sont généralement lourdes et fastidieuses à mettre en œuvre. Cette nouvelle approche indirecte utilisant des capteurs satellites à haute résolution temporelle s'avère être un moyen pertinent et facile à développer pour restituer la topographie de ce type d'estran.

Il a été convenu pour cet article de ne pas utiliser des images à très haute résolution spatiale (métrique ou sub-métrique) mais plutôt des images dont la résolution spatiale est proche de 10 m. Ce choix permet ainsi d'utiliser ou réutiliser des images que l'on rencontre fréquemment dans les bases de données des laboratoires (donc déjà disponibles). Souvent plus anciennes, elles sont par conséquent des sources potentiellement exploitables pour l'analyse à plus long terme des littoraux.

2. PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE

L'originalité des littoraux du Nord-Pas-de-Calais (Figure 1) repose sur deux traits majeurs : (1) un contexte morpho-sédimentaire marqué par une alimentation du littoral par des sables provenant exclusivement de mers épicontinentales peu profondes caractérisées par de nombreux bancs de sables (Figure 1) (Garlan, 1990; Houthuys *et al.*, 1994 ; Aernouts, 2005); (2) un fonctionnement hydrodynamique étroitement conditionné par des courants combinés liés à de fortes marées, à des houles et à des vents de tempête (Vasseur & Héquette, 2000 ; Sedrati & Anthony, 2007). Ces interactions complexes contrôlent les mouvements de sédiments au sein du profil côtier et le long de la côte (Héquette *et al.*, 2008). Cette dynamique sédimentaire se manifeste par des formes littorales mobiles de plus ou moins grande ampleur (rides de sables, barres de plages, dunes hydrauliques…) qui migrent au sein du profil côtier (Reichmüth & Anthony, 2002) en modifiant la topographie et en influençant l'approvisionnement des plages et des dunes côtières en sable (Anthony *et al.*, 2006).

La plage des Hemmes de Marck se démarque régionalement par une stabilité relative avec une tendance lente à l'accrétion, mais surtout par la présence de cette large plate-forme sableuse (Figure 2) très plane ou sandflat (d'une largeur d'environ 1500 m) adossée à une plage à barres et à bâches assez prononcées.

Ce travail propose d'apporter des précisions sur ce sandflat à travers l'étude d'un site en accrétion. Celui-ci est caractérisé par une plage à barres intertidales, au profil convexe, surplombée d'une large plateforme sableuse. Or cette plateforme présente une sédimentation vaseuse singulière (Figure 2) sans apports fluviatiles sur un milieu macrotidal ouvert pourtant soumis à des houles de tempêtes (Aubry *et al.*, 2009).

Le but de cette étude est de développer une approche d'extraction topographique indirecte et d'évaluer sa potentialité. La topographie du site ayant été levée régulièrement durant ce travail les comparaisons sont alors facilitées. Ce choix a été fait initialement pour ce type d'estran très large, difficile à mesurer avec précision avec des mesures *in situ* mais il est totalement transposable pour tout type d'estrans de par le monde et particulièrement ceux qui restent difficilement accessibles.

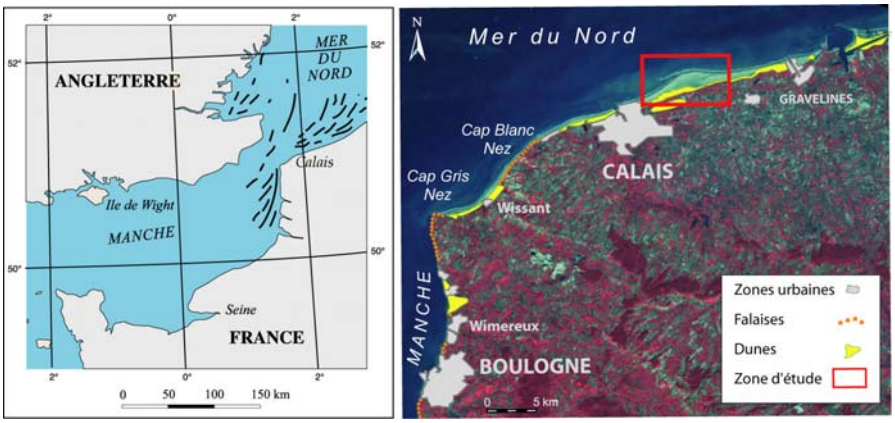


Figure 1 : Localisation et caractéristiques morphologiques des littoraux du Nord Pas-de-Calais et du secteur d'étude. (Extrait image SPOT5 © CNES 2003 distribution Spot Image S.A.). *Location map of the study area showing the position of the nearshore sand banks and the different morphological characteristics of the Northern coast of France. (Satellite picture SPOT5 © CNES 2003 distribution Spot Image S.A.).*

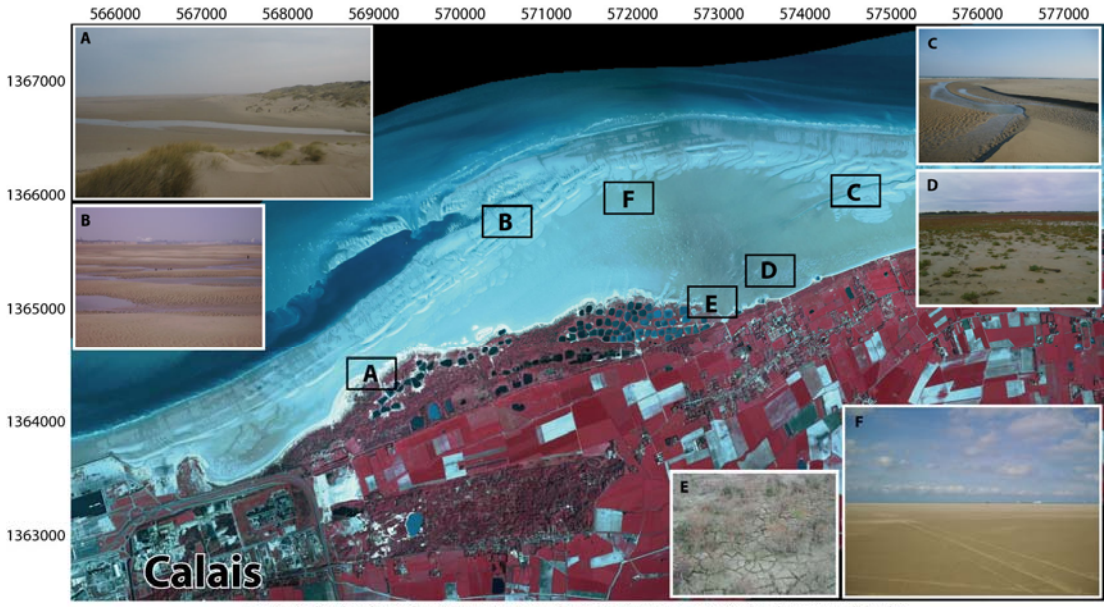


Figure 2 : Planche photographique géoréférencée en Lambert 1 présentant la diversité des formes du secteur d'étude.
Photo assemblage showing the different form of study area on an aerial photograph (IGN 2000). A: Photograph of embryo dune on the upper beach, west of study area ; B: Megaripples under high energy conditions ; C: Drainage channel ; D: Sandy tidal flat to mudflat ; E: mud cracks ; F: large sand flat.

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1. Télédétection spatiale

3.1.1. Acquisitions

Les changements morphologiques saisonniers (période de temps calme estivale à période de temps agité hivernale) des littoraux sont à l'heure actuelle visibles depuis l'espace. Cependant la quantification des évolutions morphologiques côtières à échelle de temps plus court (évènementiel) liée par exemple aux tempêtes nécessitent des acquisitions de

données sur des pas de temps fins (mensuelle, hebdomadaire, voire journalière) pour notamment étudier le profil d'une plage et sa dynamique morphologique.

Or, aujourd'hui, seuls certains capteurs peuvent fournir des données multispectrales à haute résolution (< 10 m) à des pas de temps suffisamment fins. Compte tenu des combinaisons possibles capteurs - vecteurs à l'heure actuelle, les satellites SPOT et Formosat-2 ont permis d'envisager une situation théorique optimale de plusieurs images par an, voire des acquisitions théoriques quotidiennes pour une grande partie des littoraux mondiaux. Les orbites spécifiques de ces deux satellites, permettent d'envisager des acquisitions régulières. Il faut également préciser que l'orientation de la côte étudiée par rapport aux traces du satellite, joue un rôle dans le nombre théorique d'images nécessaires pour couvrir la zone d'intérêt. Ainsi, un littoral orienté est-ouest (ce qui est le cas pour cette étude) nécessite théoriquement plusieurs acquisitions pour couvrir la totalité du secteur analysé par rapport à un trait de côte orienté nord-sud.

Le capteur optique SPOT 5 acquiert des images dans les longueurs d'ondes du visible, du proche et moyen-infrarouge (bandes spectrales B1 : 0,50 - 0,59 µm, B2 : 0,61 - 0,68 µm, B3 : 0,78 - 0,89 µm) et le moyen infrarouge (1,58 - 1,75 µm). Sa résolution spatiale en mode multispectral est de 10 m. FORMOSAT-2 est le premier satellite qui permet d'obtenir des images quotidiennes à haute résolution spatiale (8 m en multispectral, 2 m en panchromatique) dans 4 bandes spectrales allant de 0,40 µm à 0,90 µm (bande bleue de 0,40 à 0,52 µm ; bande verte de 0,52 à 0,6 µm, bande rouge de 0,63 à 0,69 µm ; PIR de 0,76 à 0,9 µm).

Cependant, la disponibilité de ce type d'image est soumise aux situations météorologiques, souvent défavorables sur le littoral de la côte d'Opale et principalement à de fortes contraintes marégraphiques nécessitant des programmations. En effet, l'asynchronisme de ces deux phénomènes (marée et orbite des satellites) reste aujourd'hui la principale limite quant au bon déroulement des acquisitions, particulièrement pour l'étude des littoraux méso- à macrotidaux particulièrement mobiles à des pas de temps court.

Au final, deux images SPOT5 (Tableau 1) ont pu être acquises durant des périodes de campagne de mesures intensives *in situ* (le 05/04/2007 et le 07/05/2008). Par la suite, une seconde commande a permis d'acquérir un couple d'images FORMOSAT-2 (Tableau 1), acquisitions réalisées les 27 et 28 septembre 2008. Les hauteurs de marée au moment des acquisitions ont été déterminées à partir du logiciel du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) puisqu'aucune donnée marégraphique n'était disponible (problèmes de lacunes récurrentes). Un déploiement de capteurs de pressions pendant les acquisitions programmées pourrait permettre d'avoir la hauteur d'eau réelle mais complexifierait la logistique *in situ*.

L'ensemble des acquisitions satellites a été effectué à marée montante ce qui peut favoriser une meilleure distinction de la limite eau/sable, la partie haut de plage n'ayant pas encore été atteinte par l'eau et le sable étant par conséquent sec.

Tableau 1 : Détails des données satellites et conditions de marée (coefficient et hauteur d'eau en côte marine au moment des acquisitions).
Summary of the satellite-derived data used in this study, water level and tide condition (water level affects the degree of inundation of the beach or sandflat).

Type d'image	Documents	Date	Résolution spatiale	Mode	Heure (UTC)	Hauteur de marée	Coefficient de marée
Programmation Bon Isis	SPOT 5	05/04/07	10 m	Multispectral	10h40	2,81 m	83
Programmation Bon Isis	SPOT 5	07/05/08	10 m	Multispectral	11h22	4,81 m	103
Programmation	Formosat-2	27/09/08	8 m	Multispectral	10h28	5,64 m	85
Programmation	Formosat-2	28/09/08	8 m	Multispectral	10h28	5,72 m	93

3.1.2. Géoréférencement et corrections géométriques

Le positionnement géographique des scènes SPOT5 et Formosat-2 a été réalisé par pointage de points d'amers reconnaissables, en se basant sur l'orthophotoplan de 2000 en projection Lambert 1. Les amers sont répartis de façon homogène et sont choisis pour leur constance temporelle. Au total, une quarantaine de points de calage ont été créés pour chaque image. La transformation appliquée est un polynôme de 2ème ordre pour la rectification. Une fois cette étape effectuée les déformations ont été réduites et l'image géoréférencée.

3.2. Topographie

L'utilisation de divers outils topométriques et différentes techniques de mesures (radiale transversale, mesures surfaciques, densité de points variables) s'est avérée nécessaire durant cette étude. Le fait que la surface à mesurer soit

particulièrement étendue a certes favorisé cette méthodologie mais il s'agit avant tout d'un choix raisonné d'investigations complémentaires permettant une analyse comparée et discutée des résultats obtenus.

3.2.1. Station électronique

Des levés topographiques de haute précision ont été effectués à l'aide de stations électroniques de type Leica TC 407 dont le degré de précision fabricant est de l'ordre de ± 0,2 mm et 0,2 degré avec une distance maximale de mesure d'environ 1800 m et des variations de cette précision en fonction des conditions atmosphériques.

Les coordonnées métriques cartographiques sont géoréférencées en altitude en mètre IGN 69 et géographiquement selon les coordonnées du système géodésique français Lambert I. La marge d'erreur en distance et altitude a été estimée à ± 3 cm et 0,0015 ° en direction, en intégrant à la fois la précision de l'appareil et les incertitudes liées à l'opérateur sur le terrain en estran sableux (Reichmüth et Anthony, 2007).

Les levés sont effectués en profil transversal. Une tête de station fixe est alors établie ; ces coordonnées (X, Y, Z) sont connues ainsi que l'angle de levé du profil par rapport au Nord pour avoir le même profil à chaque levé répété mensuellement. Lors de la réalisation du profil, un point de mesure est pris tous les 7 à 10 mètres dans l'axe transversal du profil.

3.2.2. DGPS

En raison du nombre important d'opérateurs nécessaires et de l'étendue de la surface d'étude à couvrir (près de 3,5 km²), les mesures surfaciques du secteur ont donc été effectuées grâce au DGPS (Differential Global Positionning System) Leica System 1200. L'ensemble des mesures a été réalisé avec une précision toujours décimétrique en temps réel. Les levés ont été effectués en semis de points à maillage régulier avec une mesure tous les 25 m pour obtenir des Modèles Numériques de Terrain (MNT).

En raison de la difficulté à couvrir la totalité de la zone en un minimum de journées et du handicap de la marée qui empêche et rend dangereux la prise de mesures à marée montante et/ou modifie la topographie, nous avons couvert les surfaces totales en 5 jours avec des levés longitudinaux pour minimiser les variations topographiques intermédiaires. En plus de levés réguliers, une prise de points supplémentaires a été effectuée notamment lors de relevés topographiques des zones dunaires et plus généralement lors de la rencontre d'une rupture de pente ou d'un changement de surface.

3.2.3. Comparaison des mesures topographiques

La diversité des outils utilisés et des types de mesures (radiale transversale, mesures surfaciques en MNT, densité de points variables) pose le problème de l'homogénéité des résultats, de leurs marges d'erreur et la possibilité ou non de comparer ces mesures issues d'appareils divers avec des modes d'acquisitions et des densités de prises de points différents.

La superposition des altitudes du profil topographique mesurées (tachéomètre et densité de point élevée) d'une part et interpolées d'autre part (interpolation à partir du MNT mesuré au DGPS avec une densité de point plus faible) montre de très bonnes correspondances. Les valeurs des coefficients de corrélation dépassent 0,98 pour les différentes périodes de mesures.

3.3. Méthode d'extraction topographique indirecte

Le but de ce travail consiste à caractériser la surface topographique de l'estran par la méthode SDM (Shoreline Detection Method). Cette méthode vise à extraire indirectement la topographie de l'estran en utilisant des séries d'images satellites acquises à des pas de temps fins mais à des hauteurs de marées différentes (Mason *et al.*, 1995 ; Lohani and Mason, 1999 ; Gratiot *et al.*, 2005, Gensac *et al.*, 2011). Avec cette technique, on peut ainsi extraire des lignes de rivage instantanées correspondant à différents niveaux de l'eau (équivalent à des courbes de niveau).

La limite terre/eau est alors digitalisée sur chaque image satellite géoréférencée et comparée à l'isohypse théorique créée artificiellement dans le MNT afin de mesurer les différences planimétriques et altitudinales des deux types d'informations topographiques. La digitalisation de cette limite terre/eau est ici déterminée manuellement (sur la bande du proche infrarouge) par choix pour un meilleur rendu et une diminution des marges d'erreur en raison des confusions possibles sur ce type de milieu très hétérogènes liées à l'humidité, aux surfaces sédimentaires variables. Elle peut cependant être effectuée par classification automatique des pixels de l'image.

Pour calculer les marges d'erreurs, la méthode statistique des points extrêmes, (End Point Rate ; EPR, Dolan *et al.*, 1991) est utilisée. Cette méthode, consiste à diviser la distance entre la position de la ligne de rivage lors de l'acquisition entre les deux courbes de niveaux réelles extrêmes (relation linéaire entre les deux valeurs MIN et MAX de la série spatiale) afin d' en déduire la marge d'erreur moyenne. Le taux d'évolution est égal au taux moyen d'erreur par rapport à la ligne d'eau réelle, ligne de repère initial. Ainsi une densité spatiale est déterminée en calculant ce rapport :

[distance cumulée entre les deux courbes]/[nb total de courbes de niveau]

Une fois ces calculs effectués pour chaque point de contrôle, on détermine l'erreur moyenne arithmétique (*ema)* défini par l'équation 1, qui correspond à la moyenne arithmétique des *n* erreurs, où les résidus élémentaires (ou erreur vrai) notés e_i sont pris en valeur absolue, soit :

$$ema = \sum_{i=1}^{n} \frac{|e_i|}{n} \quad (1)$$

L'incertitude de la mesure (Δ) qui se définit comme étant le paramètre associé au résultat de la mesure et qui décrit l'étendue des valeurs possibles dans laquelle se trouve la valeur vraie avec une probabilité prédéfinie est également calculée.

4. RÉSULTATS

4.1. Extraction topographique à partir d'un couple d'image Formosat-2

La confrontation des levés simultanés topographiques (réalisés au tachéomètre) avec des données Formosat-2 (offrant une résolution temporelle quotidienne sur notre site) acquises par programmation les 27 et 28/09/08 (Figure 3a), a permis tout d'abord d'évaluer la précision de la méthode SDM (*Shoreline Detection Method*). Un profil topographique transversal, représentatif de la morphologie générale du secteur a pu être levé 10 jours avant (le 18/09/2008) et 19 jours après (le 17/10/2008) les deux passages satellites.

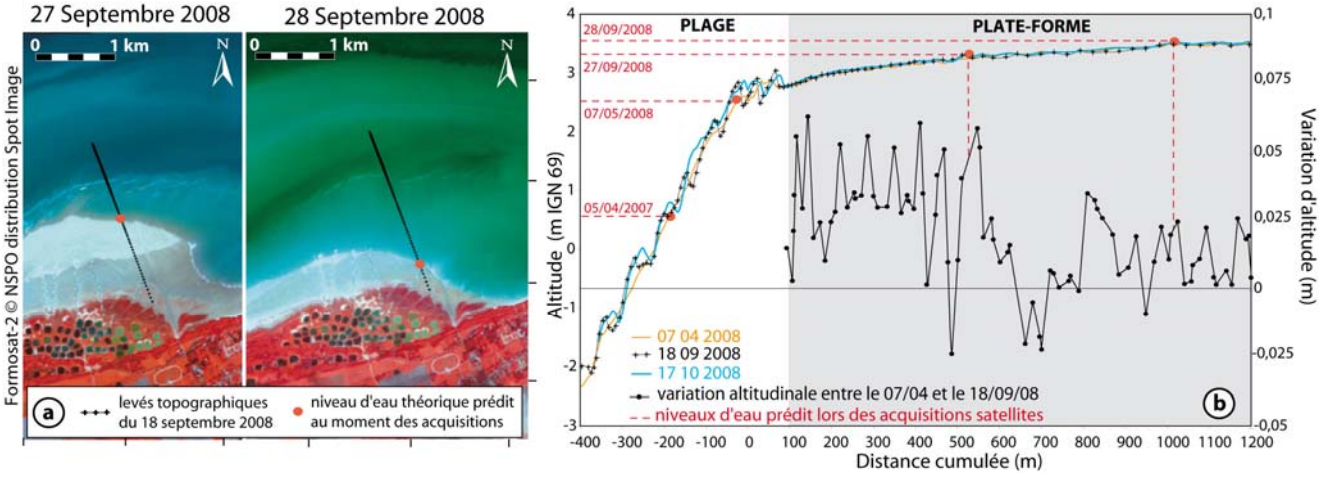


Figure 3 : a) Superposition des points du transect levés au tachéomètre sur les images satellites montrant la correspondance avec l'altitude théorique estimée par le SHOM du niveau de la ligne de rivage au moment des acquisitions Formosat-2. b) Superposition des profils topographiques mesurés *in situ* avant et après les acquisitions satellites présentant les faibles variations altitudinales du haut de la plate-forme depuis avril 2008. *a) Overlapping of Formosat-2 image and topographic transect in rough conditions. b) Variations of typical profile envelopes before and after remote sensing data acquisition and low variations since April, 2008 on the upper part of the sandflat.*

La superposition des informations réellement mesurées par tachéomètre et de celles du niveau de la ligne de rivage transformées en altitude théorique du niveau d'eau montre une très bonne correspondance. La résolution spatiale des images Formosat-2 en mode multispectral de 8 m semble donc suffisante pour permettre leur utilisation dans l'extraction topographique de la zone intertidale.

Durant ces acquisitions, un unique transect topographique a pu être réalisé et comparé directement avec les images satellites. Cependant, le secteur étudié, principalement celui de la plate-forme (zone grisée en Figure 3b) n'enregistre que de très faibles variations altitudinales (variations centimétriques) entre le mois d'avril 2008 (date du dernier levé surfacique réalisé au DGPS sur l'ensemble de la zone) et le mois de septembre 2008. Ainsi le MNT de l'ensemble de la zone intertidale généré à partir des levés surfaciques réguliers d'avril 2008 est réutilisable dans sa partie la plus haute en altitude (zone dite de plate-forme) afin d'évaluer la précision de cette méthode d'extraction d'informations et surtout de comparer les altitudes réelles mesurées au DGPS et celles extraites indirectement grâce à la limite du niveau d'eau sur les deux extraits des images Formosat-2.

Deux isolignes d'altitude théorique correspondant aux deux niveaux d'eau théoriquement atteints au moment des acquisitions (3,37 m IGN 69 pour le 27/09 et 3,67 m IGN 69 pour le 28/09/2008) sont crées artificiellement dans le MNT généré à partir des levés topographiques *in situ*. Ce nouveau MNT (exemple pour l'image du 28/09 en figure 4) est ensuite superposé à chaque extrait d'image Formosat-2 afin d'estimer la bonne concordance des informations.

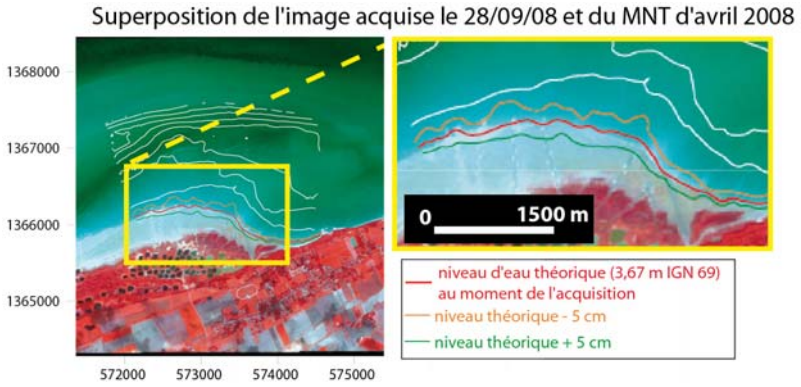


Figure 4 : Comparaison des isohypses du MNT de la zone générées à partir des mesures *in situ* avec l'isohypse théorique créée à l'altitude théorique du niveau d'eau atteint au moment de l'acquisition satellite. L'ensemble des informations est ici superposé sur l'extrait de l'image Formosat-2 du 28 septembre 2008 © NSPO distribution Spot Image. *Shoreline estimated by the in situ Digital Elevation Model (DEM) at the time of the Formosat-2 satellite acquisition.*

La méthode des points extrêmes (End Point Rate, EPR, Dolan *et al.*, 1991) a été utilisée sur 24 transects espacés régulièrement pour mesurer les variations entre les deux lignes de même altitude obtenues par les deux méthodes (ligne noire digitalisée et ligne rouge altitude théorique en Figure 5).

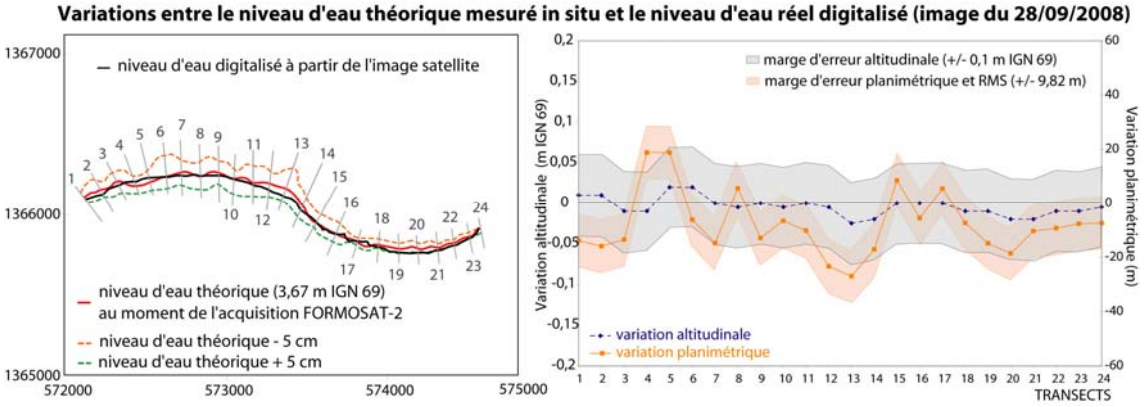


Figure 5 : Calculs de la variation des marges d'erreurs planimétriques et altitudinales pour chaque transect entre le niveau d'eau digitalisé (noir) et le niveau d'eau théorique estimé à partir des mesures *in situ* (rouge) lors de l'acquisition Formosat-2 du 28/09/2008. *Elevation and planimetric errors and uncertainties between the shorelines obtained by the in situ DEM (in red) and the originally extracted waterline from the satellite image, 28 September 2008 (in black).*

Les marges d'erreurs moyennes (ema) et incertitudes (Δ) planimétriques et altitudinales (Figure 5) ont été calculées en se basant sur les erreurs provenant des mesures de terrain (densité de points, incertitudes opérateurs et appareils), des calculs d'extrapolations du MNT ainsi que des erreurs liées à la méthode SDM (digitalisation de la limite terre/eau), à la résolution spatiale de l'image Formosat-2 (pixel de 8 m) et du root mean square (RMS ou EMQ, erreur quadratique moyenne) lors de la rectification des images (RMS inférieurs 0,3 pixel). Ce RMS correspond à la précision du géocodage de l'image.

L'estimation de l'altitude du niveau d'eau sur l'image du 28 septembre 2008 par rapport au niveau d'eau estimé à partir du MNT est de très bonne qualité (Figure 5 et Tableau 2). L'erreur altitudinale totale comprenant l'erreur moyenne de mesure (ema) et l'incertitude de la mesure (Δ) est inférieure à 7 cm. L'erreur planimétrique moyenne est relativment faible : 6,8 m (± 9,8 m liée notamment à la taille des pixels).

Pour l'image du 27 septembre 2008, l'erreur moyenne altitudinale initiale est encore diminuée (< 5 cm) mais atteint tout de même 15 m en ce qui concerne l'erreur planimétrique initiale. Ces erreurs moyennes peuvent cependant être améliorées, en corrigeant de +5 cm l'altitude de cette zone de la plate-forme (estimation de l'accumulation moyenne entre avril et septembre 2008 de la zone d'après le profil transversal en figure 3b). Une fois la base de données des altitudes de la plate-forme corrigée et le MNT à nouveau interpolé, l'erreur altitudinale moyenne atteint 3,1 cm et celle planimétrique est alors réduite à 7,3 m ± 9,8 m d'incertitude (Tableau 2).

Les images SPOT5 sont également testées sur la zone d'étude avec moins de précisions, liées entre autre à l'augmentation de la résolution spatiale des images. Les images du 07 mai 2008 et du 05 avril 2007 acquises à des hauteurs d'eau faibles (Tableau 1 et Figure 3b), présentent une ligne de rivage située en haut de plage pour l'image du 07/05 et à mi-plage pour celle du 05/04. Ces deux zones à morphologie complexe (présence de barres intertidales très

mobiles) et particulièrement variable localement dans le temps et l'espace favorisent l'augmentation des erreurs moyennes et des incertitudes à mettre en lien notamment avec une trop faible densité de levés *in situ* ne permettant pas un bon contrôle de la réalité topographique. Pour ces deux images, les erreurs moyennes planimétriques (ema en Tableau 2) dépassent les 20 m (avec des erreurs maximales proches des 30 m pour certains transects de contrôle) mais restent relativement correctes concernant les erreurs moyennes altitudinales (7 cm ± 5 cm pour 2008 et 5,4 cm ± 15 cm pour celle de 2007). Nous noterons une incertitude de mesure relativement élevée pour l'image SPOT5 de 2007, en raison d'un problème inhérent et surtout non prévisible du domaine intertidal, à savoir l'enregistrement d'une surcote (surélévation du niveau théorique marin liée à une tempête) lors de l'acquisition de l'image. Dans l'ensemble, la superposition des deux types de mesures (*in situ* et extraction indirecte de la topographie) montre une bonne correspondance sur la zone de la plate-forme particulièrement pour les deux extraits d'images Formosat-2 et valide ainsi cette approche de mesures de topographie indirecte pour l'ensemble de la ligne de rivage sur l'intégralité de l'image satellite.

Tableau 2 : Synthèse des erreurs et incertitudes pour chaque image acquise. (1) Ema : Ecart moyen arithmétique (erreur moyenne) ; (2) Max erreur : Valeur absolue de l'erreur maximale mesurée ; (3) Δ : Marge d'erreur (incertitude). *Mean errors(1), maximal errors(2) and uncertainties(3) between positions of extracted waterlines and GPS tracks of the sandflat for all images used in the study.*

Détail Image				Erreur planimétrique			Erreur altitudinale		
Type Image	Date acquisition	Résolution spatiale (m)	RMS rectification (pixel)	Ema(1) (m)	Max erreur(2) (m)	Δ(3) (m)	Ema(1) (m)	Max erreur(2) (m)	Δ(3) (m)
Formosat-2	28/09/2008	8	< 0,3	6,8	16	9,8	0,018	0,030	0,050
Formosat-2	27/09/2008	8	< 0,3	7,3	15	9,8	0,031	0,090	0,100
SPOT5	07/05/2008	10	< 0,9	23,8	29	10,1	0,070	0,015	0,050
SPOT5	05/04/2007	10	< 0,9	20,1	30	10,1	0,054	0,070	0,150

4.2. Intégration des nouvelles données

La limite terre/eau ayant été digitalisée pour chacune des deux images satellite, l'altitude théorique prédite du niveau d'eau au moment de l'acquisition satellite a donc été associée aux points de chacune des deux isolignes obtenues par digitalisation. Ces nouvelles isohypses ont ensuite été intégrées à la base de données initiale du MNT qui contenait jusqu'ici uniquement des mesures directes de la topographie. Les données ont ensuite une nouvelle fois été interpolées en intégrant la totalité des informations pour générer un nouveau MNT (Figure 6).

Certaines zones ayant d'une part des densités de levés topographiques plus faibles liées à l'immensité de la surface de mesure et d'autre part des variations locales d'altitude très faibles, l'ajout de ces nouvelles informations topographiques obtenues indirectement par satellite peut donc permettre d'améliorer localement la justesse du MNT sur la partie haute de la plate-forme (Figure 6).

L'intégration des altitudes des lignes de rivage à la base de données topographiques initiales ajoute des précisions sur les variations locales de l'altitude (Figure 6) sur la partie la plus haute de la zone intertidale. La constitution du maillage des levés *in situ* (organisation spatiale et densité des points) ne permet pas de distinguer les très faibles variations altitudinales de certaines zones.

La partie est-sud-est du secteur (encadré A en figure 6) apparaît plus élevée grâce à l'apport des informations extraites à partir de l'image datée du 27/09 dont le niveau d'eau était situé au milieu de la plate-forme (Figure 4). Cette zone semble suivre la morphologie générale de la côte et enregistre des courbes de niveau parallèles à la crête du banc subtidal (banc visible en figure 2).

L'image du 28/09 (niveau d'eau situé dans la partie haute de la plate-forme en Figure 3a) apporte des précisions pour les parties sud-ouest et sud du MNT (encadré B en Figure 6). Ces zones apparaissent encore plus planes et la présence d'une cuvette topographique assez étendue, que les relevés *in situ* n'avaient pas mis en valeur, correspond d'autant plus aux zones particulièrement envasées.

5. DISCUSSION

5.1. Intérêts de la méthode et capacité des images SPOT5 et Formosat-2

La méthode développée lors de cette étude, apporte concrètement des précisions topographiques pour la zone étudiée (Figure 6). Les images SPOT5 d'avril 2007 et mai 2008 acquises à des niveaux d'eau bas, donnent des précisions au

MNT mesuré *in situ* en particulier dans la zone d'accolement du banc tidal à la côte surtout là où la densité des levés topographiques *in situ* est insuffisante.

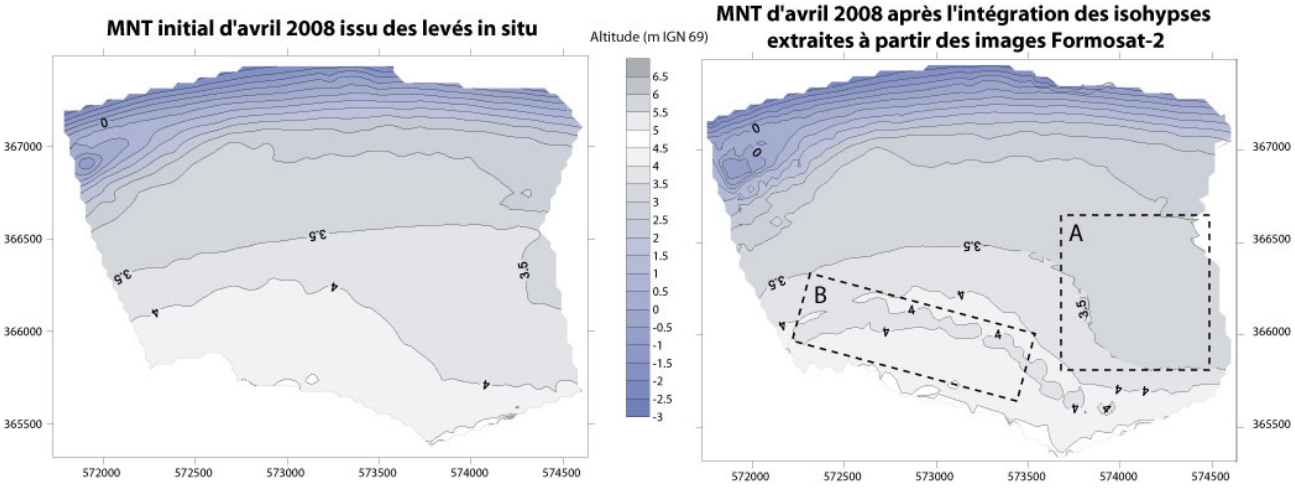


Figure 6 : Comparaison entre le modèle numérique de terrain initial de la zone d'étude engendré à partir des levés topographiques *in situ* et celui ré-interpolé après intégration des informations issues des images satellites. Encadrés A et B : zones de principaux changements. *Comparison between initial DEM of study area and transformed DEM after integrate extracted waterlines. Boxes A and B show the main modifications.*

Les images Formosat-2 valident également les informations déjà connues grâce aux levés de terrain, mais apportent principalement des précisions topographiques localisées sur le haut de la plate-forme et complètent les levés *in situ* de faible densité dans certaines zones. L'arrondi de la courbe de niveau situé au milieu de la plate-forme (encadré A en figure 6) ou la découverte d'une cuvette topographique (forme favorisant dépôts vaseux particulièrement présents dans la zone) située en haut de plate-forme (encadré B en figure 6) ont été découverts grâce à la complémentarité des données issues des levés terrain et issues des images satellites.

Cette méthode d'extraction indirecte de la topographie est donc complémentaire et particulièrement utile sur ce type de larges surfaces submergées quotidiennement et dont les très faibles variations topographiques sont difficilement mesurables (notamment avec des marges d'erreurs liées à la densité de levés, à l'appareil et/ou à l'opérateur et à l'interpolation).

Enfin grâce à la haute répétitivité, il est désormais possible d'acquérir des informations topographiques sur des pas de temps fins (ici 2 images journalières successives), limitant ainsi les risques de changements morphologiques importants entre deux acquisitions (sauf en cas de tempête).

L'atout majeur de cette méthode est de pouvoir obtenir rapidement et sans difficultés des informations topographiques sur de vastes zones et particulièrement pour celles difficiles d'accès par l'homme. Il va sans dire qu'aujourd'hui la totalité des littoraux du monde deviennent visibles et sont donc potentiellement mesurables à l'aide de l'outil satellite. La possibilité d'acquérir des documents cartographiques à grandes échelles a favorisé l'émergence de nouvelles applications liées aux préoccupations récentes concernant la gestion et la préservation de ces espaces sensibles (cartographie des écosystèmes marins, des faciès géomorphologiques, des teneurs en matières en suspension, de la qualité des eaux…).

L'étude du mode de représentation, de la distribution et de la cinématique des caractéristiques littorales se heurte cependant à la disponibilité des moyens d'acquisition et à la mise en œuvre de techniques de traitement de données adaptées à la variabilité spatiale et temporelle des éléments qui les constituent. A l'heure actuelle de multiples possibilités existent pour l'étude des littoraux, qu'il s'agisse d'utiliser des images d'archives pour étudier les variations morphologiques ou l'impact humain à plus long terme (Kurosawa et Tanaka, 2001 ; Gilvear *et al.*, 2004 ; Ryu *et al.*, 2008). Ce type d'approche peut également être utilisé pour l'étude des milieux estuariens, particulièrement dynamiques dans le temps et l'espace ou même pour des études bathymétriques (Lafon *et al.*, 2002b ; Dehouck *et al.*, 2009 et 2010) en complément d'études LIDAR dont les données sont parfois moins précises sur ces milieux humides et à sédimentations mixtes vaso-sableuses (Populus *et al.*, 2004 ; Rayburg *et al.*, 2009) particulièrement difficiles à délimiter et mesurer précisément avec un signal LIDAR qui peut être perturbé (absorption/diffusion).

Les milieux tropicaux, par essence moins accessibles ou du moins dont les mesures *in situ* sont plus difficiles à effectuer sont des environnements propices à l'utilisation de la télédétection. Des études d'évolution de la dynamique des bancs de vase (Gardel et Gratiot, 2005), de la superficie des mangroves (Thu et Populus, 2007 ; Rakotomavo et Fromard, 2010) ou de mesures topographiques en milieu récifal (Yamano *et al.*, 2006) en sont quelques exemples.

5.2. Limites de l'utilisation de la méthode SDM en milieu intertidal

La disponibilité des images est soumise principalement à de fortes contraintes marégraphiques nécessitant une programmation auprès de SPOT Image. En effet, l'asynchronisme de ces deux phénomènes (marée et orbite des satellites) reste la principale limite quant au bon déroulement des acquisitions, notamment pour l'étude des littoraux macrotidaux. Enfin, même si cet asynchronisme est corrigé (acquisition satellitale aux rythmes des marées) les acquisitions à différents niveaux d'eau deviendraient dans ce cas impossibles.

L'influence de la météorologie (vitesse et direction du vent) peut engendrer des surcotes ou décotes qui limitent l'utilisation de cette méthode en modifiant l'estimation théorique de la hauteur de la marée (Plant et Holman, 1997 ; Aarninkhof *et al.*, 2003). Ce problème est donc à prendre en compte dans les prévisions d'acquisitions d'images satellites (période hivernale potentiellement plus risquée). Cependant, la mesure exacte de ces phénomènes de surcotes ou décotes est réalisable (mesures hydrodynamiques simultanées) ou estimable avec des valeurs météorologiques locales (pression atmosphérique, vitesse et direction du vent) au moment de l'acquisition satellite.

Il existe aussi une limite inhérente aux régions à forte nébulosité (ce qui est le cas pour le littoral de la Côte d'Opale) avec l'utilisation des capteurs optiques et l'importance de la couverture nuageuse durant les acquisitions voire même plus généralement la restriction d'achat d'images aux heures de luminosité journalière. L'imagerie radar, qui pourrait en partie résoudre cette dernière difficulté, ne peut cependant pas être envisagée en raison de problèmes de résolution et plus largement de répétitivité des acquisitions (période de revisite de l'imagerie satellitaire supérieure à 10 voire 20 jours).

Au-delà des limites techniques, pour cette étude, nous avons obtenu une meilleure précision en altitude lorsque le niveau d'eau était moyen au moment de l'acquisition (liée à la topographie très plane du secteur) et une meilleure précision planimétrique lorsque le niveau d'eau était bas (liée à la pente de la plage). Il est donc important de programmer des dates de prévision d'acquisitions d'images satellites en fonction des niveaux d'eau prédits mais aussi de la topographie des sites étudiés afin de minimiser les erreurs.

Un des paramètres essentiels quant à la bonne réussite de ce type d'approche reste l'importance d'une bonne distinction de la limite de la ligne de rivage. Il convient de bien définir la notion et la position exacte de la ligne de rivage, ce qui peut parfois être délicat, s'agit-il d'une limite à un instant donné ou une limite moyenne dans une échelle temporelle plus longue (Boak and Turner, 2005 ; Chen and Chang, 2009). Ensuite de façon plus technique, il semble important aujourd'hui d'améliorer la détection de cette limite en la rendant automatique afin d'analyser au mieux les jeux de données de plus en plus volumineux.

Enfin, qu'elle soit effectuée manuellement ou par une routine mathématique cette délimitation de la ligne de rivage semble avoir de meilleurs résultats plutôt sur les types de plages dissipatives (morphologie plane) que sur les réflectives à pentes plus fortes et à morphologie très changeante dans l'espace et le temps (Aarninkhof *et al.*, 2003, Plant *et al.*, 2007, Ruiz de Alegría-Arzaburu *et al.*, 2010).

Ce type d'approche indirecte nécessite forcément d'associer un jour ou l'autre des mesures *in situ* pour préciser ou valider les informations. La complémentarité des données satellitaires et de terrain reste donc fondamentale pour une meilleure précision de l'étude de l'évolution morphologique des littoraux et constitue une aide à la gestion de ces milieux à équilibre fragile. Ces méthodes transposables à d'autres sites et d'autres dates peuvent être utilisées dans un outil de type Observatoire du Littoral.

CONCLUSION

L'étude des variations topographiques des profils de plage, à travers l'utilisation de paramètres obtenus par télédétection, est donc une méthode alternative pertinente qu'il convient de privilégier lorsque les données de terrain sont difficiles à acquérir. En résumé, la résolution spatiale de 8 à 10 m offre la possibilité en utilisant des séries hebdomadaires voire journalières pour multiplier les informations, si l'acquisition est possible, de reconstituer indirectement la topographie des plages. A long terme, des études sur les variations morphologiques de plages à partir des images d'archives (Ryu *et al.,* 2008) seraient donc intéressantes à développer particulièrement dans des zones difficiles d'accès. De plus, les images satellites à hautes résolutions de types capteurs SPOT et/ou Formosat-2, utilisées pour cet article se rencontrent fréquemment dans les bases de données des laboratoires et sont par conséquent des sources potentiellement exploitables pour l'analyse à plus long terme des littoraux.

De nouveaux et futurs capteurs satellitaires offriront dans un avenir proche de nouvelles compétences. La communauté scientifique française s'organise de plus en plus efficacement autour de la conception et la définition de missions spatiales d'observation des surfaces continentales dédiées aux différents objectifs tant thématiques qu'appliqués et méthodologiques. Elle est à l'origine de plusieurs missions spatiales consacrées aux surfaces continentales dont les lancements seront prévus prochainement. Les deux satellites Pléiades HR1 - HR2 dont les lancements sont prévus respectivement fin 2011 et 2012 viendront compléter les jeux de données. Ces nouvelles images seront particulièrement adaptées à l'étude de la bande côtière "terrestre" du fait de leurs hautes résolutions spatiales (70 cm en mode panchro-

matique et 2,8 m en multispectral) et de la présence d'une bande proche infra-rouge. Enfin la mission en collaboration avec Israël, VENμS (Vegetation and Environment monitoring on a New Micro-Satellite) opérationnelle en 2013, devrait permettre une augmentation des fréquences d'acquisitions dans de nouvelles zones d'intérêt en apportant également des images de résolution spatiale de 10 m.

La télédétection est donc un outil essentiel et complémentaire aux mesures *in situ* pour l'étude des milieux littoraux. Le développement technologique des capacités des capteurs satellitaires (amélioration des résolutions) permet et permettra d'autant plus d'exploiter au mieux les capacités des satellites particulièrement en milieu intertidal. La possibilité d'acquérir des documents cartographiques à grandes échelles est indispensable en termes de gestion et de préservation de ces espaces sensibles voués à de profondes mutations dans le contexte global actuel de changement climatique et de rehaussement du niveau marin.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les programmes INSU PLAMAR (Plage à MARée) et BQR (Approche intégrée pour le suivi du transport particulaire en milieu côtier et de ses impacts morphodynamiques sur les littoraux) pour le financement des acquisitions des images satellite ainsi que l'ensemble des personnes qui ont participé à la collecte des données et aux interventions sur le terrain. L'acquisition des programmations SPOT5 a été financée par le CNES grâce au programme ISIS SPOT.

Bibliographie

Aarninkhof S.G.J., Turner I.L., Dronkers T.D.T., Caljouw M., Nipius L. (2003) A video-based technique for mapping intertidale beach bathymetry. Coastal Engineering, vol. 49, pp. 275-289.

Aernouts, D. (2005) Le rôle des changements bathymétriques à l'avant-côte sur l'évolution des littoraux meubles du Cap Gris-Nez à Dunkerque, Côte d'Opale, Nord de la France. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque 195 p.

Alexander P.S., Holman R.A. (2004) Quantitative analysis of nearshore morphological variability based on video imaging. Marine Geology, vol. 208, n° 1, pp. 101-111.

Anthony, E.J., Vanhée, S., Ruz, M.H. (2006): Short-term beach-dunes and budgets on the North Sea coast of France: sand supply from shoreface to dunes, and the role of wind and fetch. Geomorphology, vol. 81, pp. 316–329.

Aubry A., Lesourd S., Gardel A. Dubuisson P., Jeanson M. (2009) Sediment textural variability and mud storage on a large accreting sand flat in a macrotidal, storm-wave setting: the North Sea coast of France. Journal of Coastal Research, vol. 56 (SI), pp. 163-167.

Boak, E.B., Turner, I.L. (2005) Shoreline definition and detection: a review. Journal of Coastal Research, vol. 21, n° 4, pp. 688–703.

Chen W.W., Chang H.K. (2009) Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 84, pp. 54–60

Dehouck A., Almar R., Balouin Y, Jaud M., Delacourt C. (2010) Bathymétrie littorale par télédétection : méthodes, précision et finalités. Actes des Journées Nationales Génie Cotier Génie Civil, Sables d'Olonne, pp. 457-468.

Dehouck A., Martiny N., Froidefond J.M., Sénéchal N. and Bujan S. (2009) New outcomes from spatial remote sensing during the ECORS experiment : towards validation of ocean color products and large-scale bathymetry mapping in a coastal zone. Journal of Coastal Research, vol. 56 (SI), pp. 1756-1760.

Dolan R., Fenster M.S. et Holme S.J. (1991) Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion. Journal of Coastal Research vol. 7, pp. 723-744.

Gardel A, Gratiot N. (2005) A Satellite imagery–based method for monitoring mud bank migration rates, French Guiana, South America. Journal of Coastal Research, vol. 21, n°. 4, pp. 720-728

Gardel A, Gratiot N. (2006) Monitoring of coastal dynamics in French Guiana from 16 years of SPOT satellite images. Journal of Coastal Research, vol. 39, pp. 1503-1509.

Garlan, T. (1990) L'apport des levés bathymétriques pour la connaissance de la dynamique sédimentaire. L'exemple des Ridens de la rade aux abords de Calais. Littoral '90, Eurocoast Symposium, 71-75.

Gensac, E., Lesourd, S., Gardel, A., Anthony, E.J., Proisy, C., Loisel, H. (2011) Short-term prediction of the evolution of mangrove surface areas: The example of the mud banks of Kourou and Sinnamary, French Guiana. Journal of Coastal Research, vol. 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), pg pg. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208.

Gilvear, D., Andrew, T., Corine, D. (2004) Detection of estuarine and tidal river hydromorphology using hyper-spectral and LiDAR data: forth estuary, Scotland. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 61, pp. 379-392.

Gratiot, N., Gardel, A., Polidori, L. (2005) Remote sensing based bathymetry on the highly dynamic amazian coast. 9th International Coastal Symposium, Iceland.

Hequette, A., Hemdane, Y. & Anthony, E.J. (2008) Sediment transport under wave and current combined flows on a tide-dominated shoreface, northern coast of France. Marine Geology, vol. 249, pp. 226-242.

Houthuys, R., Trentesaux, A. & De Wolf, P. (1994) Storm influence on a tidal sandbank's surface Middelkerke Bank, southern North Sea. Marine Geology, vol. 121 pp. 23-41.

Kumar A., Narayana A.C., Jayappa K.S. (2010) Shoreline changes and morphology of spits along southern Karnataka, west coast of India : A remote sensing and statistics-based approach. Geomorphology, vol. 120, pp. 133-152.

Kurosawa, T., Tanaka, H. (2001) A study of detection of shoreline position with aerial photographs. Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, vol. 48, pp. 586–590.

Lafon V, De Melo Apoluceno D, Dupuis H, Michel D, Howa H, Froidefond JM (2004) Morphodynamics of nearshore rhythmic sandbars in a mixed-energy environment (SW France): I. Mapping beach changes using visible satellite imagery. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 61, pp. 289-299.

Lafon V, Dupuis H, Howa H, Froidefond JM (2002a) Determining ridge and runnel longshore migration rate using Spot imagery. Oceanologica Acta, vol. 25, pp. 149-158.

Lafon, V., Froidefond, J.M., Lahetb, F., Castaing, P. (2002b) SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements. Remote Sensing of Environment, vol. 81, pp. 136-138.

Lafon V, Froidefond JM, Lahet F, Castaing P (2001) SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements. Remote Sensing of Environment, vol. 81, pp. 136-148.

Lafon V, Froidefond JM, Castaing P (2000) Méthode d'analyse de l'évolution morphodynamique d'une embouchure tidale par imagerie satellite. Exemple du bassin d'Arcachon (France). C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences, vol. 331, pp. 373-378.

Lee Z, Carder KL, Mobley CD, Steward RG & Patch JS (1998) Hyperspectral Remote Sensing for Shallow Water. I. A Semianalytical Model, Applied Optics, vol. 37, pp. 6329-6338

Lohani, B., Mason, D.C. (1999) Construction of a digital elevation model of the Holderness Coast using the waterline method and Airborne Thematic Mapper data. International Journal of Remote Sensing, vol. 20, pp. 593–607.

Maiti, S., Bhattacharya, A.K. (2009) Shoreline change analysis and its application to prediction: a remote sensing and statistics based approach. Marine Geology, vol. 257, pp. 11–23.

Mason D.C., Davenport I.J., Robinson G.J. (1995) Construction of an inter-tidal digital elevation model by the 'water-line' method. Geophysical Research Letters, vol. 22, n° 23, pp. 3187-3190.

Plant N.G et Holman R.A. (1997) Intertidal beach profile estimation using video image. Marine Geology, vol. 140, pp. 1-24.

Plant N.G., Aarninkhof S.G.J., Turner I.L., Kingston K. (2007) The performance of shoreline detection models applied to video imagery. Journal of Coastal Research, vol. 23, n° 3, pp. 658-670.

Populus J., Laurentin A., Rollet C., Vasquez M., Guillaumont B., Bonnot-Courtois C. (2003) Surveying coastal zone topography with airborne remote sensing for benthos mapping, eProceedings of Earsel's GIS , Remote Sensing of the Coastal Zone, Ghent, 2003 June 5-7, pp. 105-117.

Rakotomavo, A., F. Fromard, F. (2010) Dynamics of mangrove forests in the Mangoky River delta, Madagascar, under the influence of natural and human factors. Forest Ecology and Management, vol. 259, pp. 1161-1169.

Rayburg S., Thoms M. and Neave M. (2009) A comparison of digital elevation models generated from different data sources, Geomorphology, vol. 106, pp. 261-270.

Reichmüth, B., Anthony, E.J. (2002) The variability of ridge and runnel beach morphology: examples from northern France. Journal of Coastal Reserch, vol. 36 (SI), pp. 612-621.

Reichmüth, B., Anthony, E.J. (2007) Tidal influence on the intertidal bar morphology of two contrasting macrotidal beaches. Geomorphology, vol. 90, pp. 101-114.

Ruiz de Alegria-Arzaburu A., Pedrozo-Acuña A., Horrillo-Caraballo J.M., Masselink G., Reeve D.E. (2010) Determination of wave-shoreline dynamics on a macrotidal gravel beach using Canonical Correlation Analysis. Coastal Engineering, vol. 57, pp. 290-303.

Ryu, J.H., Won, J.S., Min, K.D. (2002) Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: a case study in Gosmo Bay, Korea. Remote Sensing of Environment, vol. 83, pp. 442–456.

Ryu, J.H., Kim, C.H., Lee, Y.K., Won, J.S., Chun, S.S., Lee, S., 2008. Detecting the intertidal morphologic change using satellite data. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 78, pp. 623–632.

Sedrati, M., Anthony, E.J. (2007) Storm-generated morphological change and longshore sand transport in the intertidal zone of a multi-barred macrotidal beach. Marine Geology, vol. 244, pp. 209-229.

Siddiqui, M.N., Maajid, S. (2004) Monitoring of geomorphological changes for planning reclamation work in coastal area of Karachi, Pakistan. Advanced Space Research, vol. 33, pp. 1200-1205.

Thu, P.M., Populus, J. (2007) Status and changes of mangrove forest in Mekong Delta: Case study in Tra Vinh, Vietnam. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 71, pp. 98-109.

Vasseur, B., Hequette, A. (2000) Storm surges and erosion of coastal dunes between 1957 and 1988 near Dunkerque (France), southern North Sea. In: Pye, K. & Allen, J.R.L.

Yamano, H., Shimazaki, H., Matsunaga, T., Ishoda, A., McClennen, C., Yokoki, H., Fujita, K., Osawa, Y., Kayanne, H. (2006) Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands. Geomorphology, vol. 82, pp. 398-411.

White, K., El Asmar, H.M. (1999) Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta. Geomorphology, vol. 29, pp. 93-105.