

# CARTOGRAPHIE ET SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES SCHORRES DE LA BAIE DU MONT SAINT-MICHEL (1986-2006) À PARTIR D'IMAGES SATELLITES HAUTE RÉOLUTION

**A. PUISSANT\*, S. LEFÈVRE\*\*, R. DESGUÉE\*\*\*, F. LEVOY\*\*\***

\*Laboratoire Image et Ville, UMR 7011 CNRS, Université Louis Pasteur, F-67000 Strasbourg (France) – anne.puissant@lorraine.u-strasbg.fr

\*\* Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection, UMR 7005 CNRS, Université Louis Pasteur, F-67000 Strasbourg (France) – lefevre@lsiit.u-strasbg.fr

\*\*\* Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR 6143 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie, F-14000 Caen (France) – {romain.desguee, franck.levoy}@unicaen.fr

---

## RÉSUMÉ

*Parmi les espaces littoraux français, la Baie du Mont Saint-Michel est un site exceptionnel, mais également l'un des plus complexes et des plus riches du point de vue des enjeux (écologique, patrimonial, économique et touristique). Les dynamiques hydro-sédimentaires actuelles de la baie (chenaux et marées) favorisent la conquête du schorre (localement appelé herbus ou pré salé) sur les grèves (slikke). Ceux-ci colonisent la partie supérieure de l'estran au fur et à mesure de la sédimentation de la baie.*

*Dans ce contexte, l'objectif de cet article est de cartographier automatiquement et de quantifier l'évolution du front des schorres sur les vingt dernières années (1986-2006). Cette analyse est effectuée sur une des zones les plus dynamiques à proximité du Mont-Saint-Michel et à partir d'images satellites haute résolution spatiale (entre 10 et 20 m) sur des temporalités courtes (7 images disponibles). Une méthode de traitement d'images fondée sur une segmentation par ligne de partage des eaux est proposée afin de faciliter la détection automatique des schorres.*

## MOTS CLÉS

*Baie du Mont-Saint-Michel, environnement macro-tidal, schorre, extraction semi-automatique, segmentation, suivi, images satellites haute résolution.*

---

Article remis le 27 juin 2008, accepté définitivement le 15 novembre 2008.

## 1. CONTEXTE

Les littoraux sont soumis à de grandes pressions environnementales et sociétales. Leur position d'interface renvoie de fait à des enjeux multiples et leur fonctionnement apparaît particulièrement complexe au regard de leurs dynamiques physiques particulières et à la présence d'acteurs multiples aux intérêts souvent divergents. À ce titre, l'équilibre des espaces littoraux français reste relativement fragile, notamment pour ceux supportant des enjeux forts, notamment touristiques. Pour ceux-ci, la cohérence entre des intérêts patrimoniaux et les contraintes environnementales garantit la pérennité de leur valorisation. En conséquence, le besoin de connaissance à des fins de préservation et d'aménagement devient de plus en plus prégnant, le tout relayé par un cadre réglementaire et législatif de plus en plus marqué.

Parmi les espaces littoraux français, la Baie du Mont-Saint-Michel est un site exceptionnel, de renommée internationale. Elle est sans aucun doute l'une des plus complexes et des plus riches du point de vue des enjeux : écologique, patrimonial, économique et touristique (Marchand, 1997). Cependant, l'équilibre de la Baie soulève de nombreuses interrogations. Surtout, l'équilibre hydro-sédimentaire y reste fragile, et l'ensablement menace le caractère insulaire du mont (Bonnot-Courtois *et al.*, 2002).

Les dynamiques hydro-sédimentaires actuelles de la baie (chenaux et marées) favorisent la conquête du schorre (localement appelé herbus ou pré salé) sur les grèves (slikke). Les schorres colonisent la partie supérieure de l'estran au fur et à

mesure de la sédimentation de la baie (Levoy, 1994). Cette opposition schorre/slikke, à l'interface entre le milieu terrestre et le domaine maritime, est l'une des principales caractéristiques de la baie.

Dans ce contexte, l'élaboration d'une cartographie des schorres s'avère indispensable pour l'analyse et le suivi du colmatage de cet environnement tidal abrité. En effet, la limite d'extension des schorres constitue un indicateur intéressant dont la cinématique reflète le degré de colmatage du milieu par des sédiments. La colonisation végétale apparaissant à des côtes d'environ 5,5 m (Migniot, 1998), toute extension des surfaces de schorre vers le large témoigne donc d'un exhaussement des fonds sédimentaires, condition nécessaire préalable à la croissance des schorres. Le suivi de la position du front des schorres et le calcul de leur surface à l'échelle annuelle permet ainsi de préciser de manière relative la vitesse de colmatage du système étudié, celle-ci n'étant pas linéaire compte-tenu de la variabilité temporelle de certains paramètres physiques (marée, agitation, crues de manière combinée) qui contrôlent ce phénomène.

La possibilité de disposer d'images satellites acquises dans des délais plus courts que ceux autorisés par les missions aériennes (annuelles voire pluriannuelles), ou à des périodes précises (suivi des effets d'une tempête, périodes caractéristiques des stades phénomenologiques de la végétation, période de forte pression touristique) constituent un des apports majeurs de l'imagerie satellite. En effet, avec la multiplication des images satellites à haute résolution spatiale (entre 10 et 20 m) et/ou spectrale, les applications se multiplient dans le domaine de l'environnement (Gourmelon *et al.*, 2004, Fournier *et al.*, 2004). Ces images sont une véritable opportunité pour la cartographie de l'occupation du sol à des échelles du 1/15 000 au 1/25 000 et l'analyse des changements (Puissant, 2003). Toutefois, le manque (ou l'inadéquation) des méthodes permettant l'automatisation de l'extraction d'information, et aidant à son interprétation se fait cruellement sentir (Puissant et Weber, 2003).

Dans ce contexte, l'objectif de cet article est de suivre et de quantifier l'évolution de la limite schorre/slikke à partir d'images satellites entre 1986 et 2006. Après une présentation de la zone d'étude (section 2) et des données utilisées (section 3), la méthodologie proposée pour suivre et quantifier l'évolution du front des schorres est détaillée à la section 4. Celle-ci est fondée sur une méthode de traitement d'images issue de la morphologie mathématique, et consiste en une segmentation semi-automatique guidée par l'utilisateur. Les résultats sont ensuite validés, analysés et discutés en section 5 avant de conclure (section 6).

## 2. ZONE D'ÉTUDE

La Baie du Mont-Saint-Michel, qui s'étend sur plus de 400 km<sup>2</sup>, se situe au nord-ouest de la France, entre les régions Basse-Normandie et Bretagne (**Planche 1, page 69**). Le site est inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO pour son abbaye, mais aussi pour un patrimoine naturel riche et remarquable. Les paysages y sont d'une grande diversité avec des paysages maritimes (estran, herbus, dunes, falaise) auxquels s'ajoutent des paysages agraires de type bocage d'une grande variabilité. La Baie du Mont-Saint-Michel dispose d'atouts largement valorisés par l'activité touristique.

La marée, aux amplitudes exceptionnelles (jusqu'à 15 mètres en périodes de vives-eaux) placent la Baie du Mont-Saint-Michel au 5<sup>e</sup> rang mondial des plus forts marnages. C'est le phénomène naturel principal qui construit l'environnement de la baie et contrôle son fonctionnement sédimentologique, laissant apparaître un vaste estran. Le vaste système estuarien reste lui aussi important dans le fonctionnement de la baie, notamment avec la divagation des chenaux (3 fleuves : la Sée, la Sélune, le Couesnon). Le reste de la baie correspond aux grèves (slikke) et aux herbus (schorre) (**Planche 2, page 70**). La basse et la moyenne slikke sont submergées à chaque marée, mais ne sont pas recouvertes par la végétation. Au contraire la haute slikke et le schorre sont couverts d'une végétation plus ou moins dense. La haute slikke est une zone pionnière de végétation, cette dernière y est peu dense et discontinue. De plus, elle n'est submergée que par les pleines mers de coefficients moyens. Le schorre, quant à lui, est recouvert seulement lors des marées hautes de vives-eaux. Il est colonisé par une végétation halophile dense et continue, parcouru par des chenaux.

Cette étude se limite à la partie orientale de la baie, centrée sur la partie estuarienne et plus particulièrement sur une zone à l'ouest du Mont-Saint-Michel entre les cordons coquilliers de Cherruieux et les schorres à l'est du Mont (**Planche 1, page 69**). En effet, cette zone est une des plus actives du point de vue hydraulique et sédimentaire.

## 3. DONNÉES UTILISÉES

Des images satellites à haute résolution spatiale (entre 10 et 20 m) ont été acquises afin d'analyser le suivi des schorres depuis les vingt dernières années. Le **tableau 1** résume les images et leurs caractéristiques spatiales et spectrales. Ces images ont toutes été acquises à marée basse. Elles ont été corrigées géométriquement et géoréférencées dans le système de projection Lambert I nord carto.

Capteur	Date	Instrument / Résolution spatiale (m) / Bandes spectrales
Spot 1	09/06/1986	XS 20 m (V – R – PIR)
Spot 3	28/08/1991	XS 20 m (V – R – PIR)
Spot 3	22/08/1995	XS 20 m (V – R – PIR)
Aster	07/04/2000	MS 15 m (V – R – PIR)
Spot 5	24/09/2002	MS 10 m (V – R – PIR)
Aster	09/09/2004	MS 15 m (V – R – PIR)
Spot 4	20/09/2006	XS 20 m (V – R – PIR)

**Tableau 1.** Images satellites disponibles ©Ecosgil 2005 -2008.

La saison de la prise de vue a été sélectionnée en priorité dans la période estivale entre juin et septembre. Toutefois, une image était disponible en dehors de cette saison (avril). Elle a été prise en compte car les objets que nous cherchons à extraire sont des formations végétales permanentes qui varient surtout en termes d'humidité (liés aux marées). L'objectif n'est pas ici d'assurer une comparaison radiométrique de ces images mais de fournir à l'aide d'une méthode semi-automatique une information sur la spatialisation de cet objet afin d'en assurer le suivi dans le temps.

## 4. MÉTHODOLOGIE

### 4.1. Méthode de traitement d'images proposée

L'analyse automatique ou semi-automatique des images satellites pour cartographier et suivre des objets géographiques requiert l'emploi de techniques de traitement d'image. Plus particulièrement, il est nécessaire de passer des données brutes (ensembles de pixels) à des données plus structurées appelées objets ou régions. Ces régions sont définies comme des ensembles de pixels connexes (voisins) formant des ensembles homogènes au sens d'un certain critère (réponses spectrales, texture, type d'occupation du sol, etc.). Le processus permettant de passer des images brutes à une représentation en régions est une segmentation, et de nombreux algorithmes de segmentation ont été proposés dans la littérature depuis plus d'une trentaine d'années (Gonzalez et Woods, 2007). On distingue les approches par seuillage ou par classification qui affectent à chaque pixel une classe et qui construisent ensuite les régions comme les composantes connexes, des approches où les régions sont construites itérativement en s'intéressant à leurs frontières (approches contours) ou à leur contenu (approches régions).

Parmi les méthodes existantes pour la segmentation d'images, l'approche par Ligne de Partage des

Eaux (LPE) est sans doute l'une des plus utilisées en télédétection (Carleer *et al.*, 2005). Cette technique offre l'avantage de ne pas nécessiter le réglage de nombreux paramètres ni l'utilisation de pré- ou post-traitement, contrairement à nombre d'autres méthodes telles que les classifications supervisées. Son appellation a pour origine un parallèle avec le processus d'écoulement des eaux et l'identification des lignes de partage des eaux (Vincent et Soille, 1991). La construction du relief ou de la surface à inonder est un critère primordial pour la réussite du processus de segmentation. L'objectif de la segmentation étant la création de régions homogènes au sens d'un certain critère, il est nécessaire que l'altitude d'un pixel soit inversement proportionnelle à son homogénéité (les bassins de rétention étant initialisés aux pixels les plus homogènes), ou proportionnelle à son niveau d'hétérogénéité. Au sein d'une image, l'hétérogénéité est généralement mesurée à l'aide d'un opérateur de type gradient, tel que l'opérateur Sobel ou le gradient morphologique. Dans le cas d'images multispectrales, il est possible de calculer le gradient morphologique sur chaque bande spectrale. Il en résulte une nouvelle image multispectrale où chaque pixel est associé à un vecteur. L'obtention d'une surface s'effectue alors en considérant la norme euclidienne du gradient vectoriel calculé précédemment.

Les deux inconvénients de la technique décrite ci-dessus concernent (1) la tendance à la sur-segmentation (le nombre de régions créées est généralement plus important que le nombre d'objets géographiques à identifier, et (2) le caractère entièrement automatique de la solution (il n'est pas possible de guider la solution vers un résultat attendu).

Afin de s'affranchir des limites de cet algorithme, l'utilisation de marqueurs a été introduite dans Rivest *et al.*, 1992. Dans cette variante, les positions spatiales des bassins de rétention ne sont pas les minima locaux du relief mais plutôt des marqueurs prédéfinis. Ces marqueurs correspondent aux initialisations spatiales des régions obtenues à l'issue du processus de segmentation, et peuvent être soit saisis manuellement, soit calculés automatiquement. Comme le nombre de régions générées lors de la segmentation correspond au nombre de marqueurs définis initialement, le problème de sur-segmentation n'est plus observé. De plus, le choix des marqueurs doit s'effectuer avec attention et constitue un moyen pour l'utilisateur de guider le processus.

Depuis l'introduction, il y a une quinzaine d'années, de la méthode de segmentation par LPE et de sa variante faisant appel à des marqueurs, les travaux de recherche autour de ces méthodes ont porté essentiellement sur la définition automatique des marqueurs. Or le relief est également un élément

déterminant dans la qualité de la segmentation produite. Ainsi, s'il est calculé à l'aide d'un gradient multispectral mesuré en chaque pixel, les zones texturées formeront des zones de haute altitude qui perturberont le processus de segmentation. A contrario, l'utilisation d'un gradient textural ne sera pas utile en cas de zones non texturées. Cependant il est délicat de définir *a priori* le type de gradient qui doit être employé pour construire le relief.

L'exploitation des marqueurs pour fournir des informations additionnelles à la seule initialisation spatiale, et en particulier pour modifier le relief utilisé lors de la segmentation, a été récemment proposée dans Lefèvre (2007) afin d'améliorer la qualité de la segmentation obtenue. Dans cette approche, décrite à la **Planche 3, page 70**, le relief est construit par une pondération du relief initial calculé à l'aide d'un gradient multispectral, avec le résultat d'une classification supervisée floue de chaque pixel. Pour ce faire, chaque marqueur est associé à une classe (plusieurs marqueurs peuvent être associés à la même classe). Les pixels appartenant à un marqueur sont ensuite considérés comme ensemble d'apprentissage pour la classe à laquelle le marqueur est associé. La classification supervisée floue permet alors d'obtenir en chaque pixel, un vecteur de probabilités d'appartenance. La classification génère donc autant de cartes d'appartenance qu'il existe de classes associées aux marqueurs.

Si la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée est forte, il est naturel que ce pixel soit facilement atteint par l'inondation d'un marqueur associé à cette classe, même si son hétérogénéité calculée avec le gradient multispectral est importante. Afin de garantir cette propriété, un nouveau relief est construit pour chaque classe en multipliant le gradient multispectral (commun à toutes les classes) avec la carte inversée des appartenances (où la valeur associée à un pixel est inversement proportionnelle à son degré d'appartenance à la classe en question). Les deux images utilisées, le gradient multispectral et la carte inversée des appartenances, ont des tailles identiques et sont normalisées toutes les deux entre [0,1] pour garantir la robustesse de l'algorithme.

L'utilisation de multiples reliefs nécessite la modification du processus d'inondation qui est alors le suivant. L'initialisation spatiale reste identique à la méthode classique basée sur les marqueurs, mais l'inondation de chaque marqueur s'effectue uniquement sur le relief correspondant à la classe associée au marqueur. Les inondations des différents reliefs sont effectuées en parallèle, et chaque pixel est associé au marqueur dont les eaux l'atteignent en premier. Le résultat est une image segmentée et classée (représentée sous la forme de régions et/ou frontières).

Cette méthode a été implantée dans une interface libre (Java) en cours de validation scientifique (©Ecosgil). Cette interface dispose de fonctions classiques de gestion d'images ainsi qu'un menu permettant (1) de sélectionner ou importer des marqueurs, (2) de lancer le processus de traitement, (3) de visualiser le résultat sous la forme d'une frontière. Enfin, un menu de validation permet de calculer un indicateur de qualité du résultat obtenu par rapport à une image de référence (contenant une frontière). Les résultats peuvent également être exportés dans un système d'information géographique.

#### 4.2. Protocole de test et validation des résultats

Un protocole de test unique est appliqué à l'ensemble des images satellites disponibles (**Planche 4, page 71**). En effet, les résolutions spatiales de ces images sont comparables et permettent de détecter des objets géographiques en particulier ceux de grande étendue à des échelles de l'ordre du 1/15 000 au 1/25 000. L'objectif n'est pas ici de tester la sensibilité de la méthode proposée en termes notamment de choix des marqueurs (nombre, taille, forme) et de résolution spatiale. Dans ce contexte, le protocole proposé se déroule en trois étapes.

La première étape consiste à choisir les marqueurs représentatifs des objets à identifier. Dans notre étude, la limite schorre/slikke constitue l'objet de recherche. Il s'agit donc de repérer des zones spectrales représentatives, d'une part, de la slikke et, d'autre part, du schorre.

Sur chaque image, cinq marqueurs de taille et de forme identique (carré de 10 pixels de côté) sont sélectionnés (**Planche 4, page 71**). Les deux premiers sont caractéristiques des réponses spectrales de la zone d'estran. Le marqueur n° 1 représente la slikke et le n° 2 les zones plus réfléchissantes caractéristiques des bancs coquilliers. Les deux marqueurs suivants (n° 3-4) sont représentatifs de deux réponses spectrales typiques des schorres : (n° 3) ceux très chlorophylliens, denses et soumis uniquement aux marées les plus fortes et (n° 4) ceux moins denses (de type pionnier, plus proche de la slikke) et plus humides (soumis plus fréquemment aux marées). Le dernier marqueur (n° 5) représente également les zones de schorre mais il est caractéristique des schorres localisés à l'est du Couesnon. En effet, comme expliqué ci-dessus, les schorres localisés à l'est du Couesnon ne sont pas connexes aux schorres situés à l'ouest du Couesnon. Ainsi lorsque ceux-ci ne sont pas connexes (en raison du chenal du Couesnon), la méthode s'arrête et détecte uniquement la zone à l'ouest du Couesnon.

La seconde étape correspond au traitement proprement dit (**Planche 3, page 70**) qui permet d'extraire une limite entre la slikke et les schorres. La troisième étape consiste à valider quantitativement et qualitativement le résultat obtenu par rapport à une limite de référence (fournie par photo-interprétation visuelle).

## 5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 5.1 Évaluation quantitative et qualitative

La validation des résultats s'est opérée, pour chaque date, selon deux modalités : une évaluation quantitative par le calcul d'un indicateur statistique et une évaluation qualitative par une comparaison visuelle entre la limite de référence et le résultat obtenu.

L'indicateur de qualité calcule l'écart entre les deux lignes (mesuré comme une surface, en nombre de pixels). Une normalisation est ensuite effectuée en divisant la valeur obtenue par la longueur du trait de référence (mesurée également en nombre de pixels). Par cet indicateur une estimation de l'erreur de localisation moyenne en chaque pixel est obtenue. Par exemple, une erreur de 1 signifie que chaque pixel extrait avec la méthode proposée est (en moyenne) à une distance de 1 pixel de la référence soit à une distance de 20 m (si la résolution spatiale de l'image est de 20 m). Le calcul de cet indicateur (**Tableau 2**) met en évidence pour les images satellites à 20 m de résolution spatiale une erreur de localisation moyenne d'un demi-pixel soit un écart de 10 m par rapport à la référence. Les images satellites avec une résolution spatiale meilleure (à 10 et 15 m) ont une erreur plus grande qui reste inférieure à la taille du pixel. Autrement dit, on peut affirmer que la méthode proposée permet d'extraire une limite entre deux objets spectralement différents avec une précision au pixel près.

Cette évaluation est complétée par une analyse visuelle afin d'affiner ces résultats et de spatialiser

Date	Erreur moyenne de localisation (en pixels)	Résolution spatiale (m)
09/06/1986	0,4	20 m
28/08/1991	0,5	20 m
22/08/1995	0,5	20 m
07/04/2000	0,9	15 m
24/09/2002	0,6	10 m
09/09/2004	0,6	15 m
20/09/2006	0,5	20 m

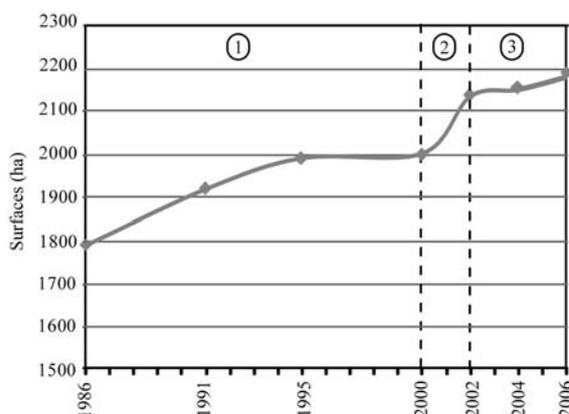
**Tableau 2.** Évaluation quantitative des résultats.

les erreurs de détection. Les écarts les plus importants sont en majorité localisés à l'emplacement de chenaux dans le schorre et/ou sur le front pionnier avec des formations très éparées où les réponses spectrales se confondent avec la slikke. D'une manière générale, comme le montre la **Planche 4, page 71**, le résultat obtenu est assez proche (décalé en moyenne de 1 pixel) de la limite de référence. La spatialisation de la limite schorre/slikke apparaît donc comparable et une analyse de l'évolution de celle-ci est donc tout à fait pertinente à partir d'images HR.

### 5.2. Analyse de l'évolution des schorres et discussion

En 1986, sur la zone d'étude qui couvre une surface d'environ 5 300 ha, les schorres représentent 34 % de la surface totale soit 1 800 ha. La zone de slikke et les surfaces agricoles représentent respectivement 47 % (2 500 ha) et 19 % (1 000 ha) de la surface totale. Leur surface atteint en 2006 près de 2 200 ha. Sur les vingt dernières années, la progression des schorres s'élève en moyenne à 19,5 ha/an. Toutefois, on peut différencier trois grandes périodes d'évolution (**Figure 1**) :

- la première entre 1986 et 2000 avec une évolution légèrement inférieure à la moyenne générale (15 ha/an) avec une période de stabilité entre 1995 et 2000 ;
- la seconde période entre 2000 et 2002 avec une évolution très supérieure à la moyenne générale soit de 66 ha/an ;
- la troisième période depuis 2002 jusqu'à 2006 avec une évolution moyenne inférieure à la moyenne générale de 11 ha/an.



**Figure 1 :** Evolution de la surface des schorres entre 1986 et 2006.

L'analyse de la spatialisation de l'évolution des schorres permet de préciser le type d'évolution (**Planche 5, page 72**). En effet, si globalement la

tendance est à la progression de ces surfaces, localement, certains secteurs sont plutôt en régression.

Entre 1986 et 2000, on observe uniquement une progression des schorres dans les secteurs directement à l'est et à l'ouest du Mont-Saint-Michel (**Planche 5 – Période 1, page 72**). La partie complètement à l'ouest ne subit pas d'extension importante. Par contre, dans la période 2000-2002, si une progression importante des surfaces est observée sur cette dernière zone, des secteurs de régression sont localement détectés (**Planche 5 – Période 2, page 72**). La progression des schorres à l'ouest s'explique en partie par l'avancée des bancs coquilliers. Ceux-ci, en abritant ce secteur, permettent alors aux sédiments de se déposer en aval de ces bancs coquilliers, favorisant par la suite le développement des schorres. D'autres facteurs entrent également en ligne de compte (marée, tempête, etc.). Ces derniers sont en cours d'analyse dans les travaux de Desguée (en cours 2008).

Ce phénomène de progression en liaison avec les bancs coquilliers se confirme dans la période 2002-2006. On observe également une dynamique importante directement à proximité du Mont (**Planche 5 – Période 3, page 72**) : au nord ouest, une zone régression des schorres qui s'explique en partie par la position du chenal du Couesnon, dont le tracé passe à proximité de cette zone et au sud une progression plus lente mais régulière. D'une manière générale, les secteurs à l'embouchure d'un chenal, quelle que soit son importance, sont des secteurs très dynamiques.

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette analyse, menée sur les vingt dernières années à partir d'images satellites et en utilisant une méthode semi-automatique, a montré que la sédimentation de la baie est un phénomène complexe avec une dynamique forte et non linéaire. Elle a permis, d'une part, de préciser les périodes où celle-ci a été la plus forte et, d'autre part, de spatialiser le phénomène avec des précisions de 5 à 10 m et avec des temporalités de plus en plus courtes. La détection semi-automatique de ce type de phénomène sur de grandes étendues spatiales est facilitée par l'exploitation des images satellites. Elle permet de produire une information pertinente qui est utile à la compréhension des processus et qui pourra être mise à la disposition des acteurs locaux.

Ce type d'analyse est souvent rendue difficile à partir de photographies aériennes en raison de l'étendue de la zone (nécessite des centaines de photographies aériennes) et du nombre de campagnes aériennes disponibles (en général tous les 3 à 5 ans). Les images satellites permettent de remonter jusqu'au début des années 70. Pour les

dates ultérieures, les photographies aériennes restent une source de données indispensables pour des analyses diachroniques sur de longues périodes.

L'information produite à partir d'images constitue une véritable source d'information potentielle à combiner avec d'autres sources de données (mesures in-situ, etc.) afin d'améliorer la compréhension du processus de sédimentation de la baie. Notamment depuis le début des travaux dans la baie (juin 2006), il sera intéressant de poursuivre cette étude avec une temporalité si possible annuelle, voire biannuelle, afin d'observer l'impact des travaux sur le phénomène. Avec la mise à disposition d'images à très haute résolution spatiale (métrique à sub-métrique), la détection de la limite des schorres sera d'autant plus précise. Une cartographie des phénomènes de l'ordre du 1/10 000 deviendra possible. D'autres objets, tels que les chenaux, pourront être détectés et suivis dans le temps.

## 7. REMERCIEMENTS

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR JC 2005-2008 ECOSGIL « Extraction des Connaissances Spatiales pour le gestion intégrée du littoral » (JC05-50539). Les images SPOT ont été acquises dans le cadre du programme ISIS (CNES).

## 8. BIBLIOGRAPHIE

- BONNOT-COURTOIS, C., CALINE, B., L'HOMER, A., LE VOT, M. 2002, La Baie du Mont-Saint-Michel et l'estuaire de la Rance. Environnements sédimentaires, aménagements et évolutions récentes, *Bull. Centre Rech. Elf Explor. Prod.*, Mém. 26, 256 pp.
- CARLEER A.P., DEBEIR O., WOLFF E., 2005, Assessment of Very High Spatial Resolution Satellite Image Segmentations, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, (71), n° 11, 1285-1294.
- DESGUEE R., (en cours 2008), *Processus hydro-sédimentaires et évolutions morphodynamiques autour du Mont-Saint-Michel*, Thèse en cours de l'Université de Caen Basse-Normandie.
- FOURNIER J., COTONNEC A., ANSELME B., GOUÉRY P., TALEC P., DUBREUIL V., MOKRANI M., DRÉAU A., PANIZZA A., LE VOT M., 2004, *Premières évaluations SPOT5 pour la cartographie des habitats benthiques littoraux : Application à l'archipel des Chausey* (golfe Normand-Breton, France), Séminaire de restitution du 5 octobre 2004, CNES-IFEN, Paris.
- GONZALEZ R., WOODS R., *Digital Image Processing*, 3<sup>e</sup> édition, Prentice Hall, 976 pages, 2007.

- GOURMELON F., SAUVE L., BIORET F., 2004, *Potentialités de l'imagerie satellitaire Spot 5 pour la cartographie de la végétation terrestre : application à l'île de Ouessant (Finistère)*, Séminaire de restitution du 5 octobre 2004, CNES-IFEN, Paris
- LEFÈVRE S., 2007. *Knowledge from markers in watershed segmentation*, Proceedings of the IAPR International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP), Vienne, Août 2007, Springer-Verlag Lecture Notes in Computer Sciences, Volume 4673, 579-586.
- LEVOY F., 1994. *Évolution et fonctionnement hydrosédimentaire des plages macrotidales, l'exemple de la côte ouest du Cotentin*. Thèse de l'Université de Caen, 424 p.
- MARCHAND Y., 1997, *Cartographies sédimentologiques et morphologiques par télédétection de la baie du Mont Saint-Michel (Ouest de la France). Comparaison de capteurs et de méthodes de segmentation d'images*, BRGM, Techniques et Méthodes, 259, 196 p.
- MIGNIOT C., 1998, *Rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel. Synthèse des connaissances hydro-sédimentaires de la baie*. Mission Mont-Saint-Michel. DDE Manche, 111 p.
- PROVOST S. et MAUXION A., 2005, *Observer les oiseaux de la baie du Mont-Saint-Michel*, éditions du Petit Démon, 96 p.
- PUISSANT A., 2003, *Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, <http://eprints-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/33/01/html/index-frames.html>
- PUISSANT A. et WEBER C., 2003, *Vers une démarche orientée-objets pour extraire les objets urbains sur des images THR*, Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, 173-174, 123-134.
- RIVEST J., BEUCHER S., DELHOMME J., 1992, *Marker-controlled segmentation: an application to electrical borehole imaging*. *Journal of Electronic Imaging* 1(2), 136–142.
- VINCENT L., SOILLE P., 1991, *Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13(6), 583-598.

# MAPPING AND MONITORING OF SALT MARSH VEGETATION FROM HIGH RESOLUTION IMAGERY. EXAMPLE OF THE MONT SAINT-MICHEL BAY

A. PUISSANT\*, S. LEFÈVRE\*\*, R. DESGUÉE\*\*\*, F. LEVOY\*\*\*

\*Laboratoire Image et Ville, UMR 7011 CNRS, Université Louis Pasteur, F-67000 Strasbourg (France) – anne.puissant@lorraine.u-strasbg.fr

\*\* Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection, UMR 7005 CNRS, Université Louis Pasteur, F-67000 Strasbourg (France) – lefevre@lsiit.u-strasbg.fr

\*\*\* Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR 6143 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie, F-14000 Caen (France) – {romain.desguee, franck.levoy}@unicaen.fr

## ABSTRACT

Coastal landscapes are severely affected by environmental and social pressures. Their long term development is controlled by both physical and anthropogenic factors, which spatial dynamics and interactions may be analysed by Earth Observation data.

The Mont-Saint-Michel Bay (Normandy, France) is the European coastal system experiencing the highest tidal range (approximately 15m) because of its geological, geomorphological and hydrodynamical contexts at the estuary of the Couesnon, Sée and Sélune rivers. It is also an important touristic place with the location of the Mont-Saint-Michel Abbey, and an invaluable ecosystem of wetlands forming a transition between the sea and the land. Since 2006, engineering works are performed with the objective of restoring the maritime character of the Bay. These works will lead to many changes in the spatial dynamics of the Bay which can be monitored with two indicators: the sediment budget and the wetland vegetation. In this context, the aim of this paper is to map and monitor the extension of the salt marsh vegetation formation in the tidal zone of the Mont-Saint-Michel Bay by using satellite images (**Plate 1, page 69**).

Multitemporal high resolution (from 10 to 20 m) satellite images (Spot 4 and 5, Aster, Landsat) are used in order to analyse the development of salt marsh over the period 1986-2006 (**Table 1**). These images are acquired in low tide periods. The objective is to highlight the extension of salt marshes (**Plate 2, page 70**) by proposing a semi-automatic method.

The method uses a semi-automatic segmentation algorithm based on an improved marker-based watershed segmentation tool. In the watershed paradigm, the image to be segmented is considered

as a topographic surface which is flooded from some initial locations defined by the markers. Dams are built to prevent merging water from different catchment basins in order to produce a segmentation map. The markers are used to modify the topographic surface according to their spectral content (Lefèvre, 2007). Thus the segmentation algorithm is able to consider regions of heterogeneous spectral content as long as markers are adequately chosen by the user and well represent the regions to be segmented. A reliable result can then be achieved by integrating both spatial and spectral information and by taking into account the user knowledge (**Plate 3, page 70**).

A three steps protocol is then applied for all types of images (**Plate 4, page 71**): (1) the choice of markers adapted to identify the objects (slikke, salt marsh); (2) the extraction of the objects with the watershed algorithm and (3) the evaluation of the result by qualitative and quantitative indicators. The qualitative evaluation consists in comparing the detected limit with a reference digitized by a visual photo-interpretation. The quantitative assessment is based on a quality indicator which measures the shift between the reference and the extracted lines (in pixels). This measure is then normalized by the size of the reference line to get a value invariant of the length of the coastline and the size of the image. This normalized value can be interpreted as an average location error in each pixel. For instance, an error of 1 means that each detected pixel is (on average) only distant of one pixel from the ground-truth (corresponding to a distance of 20m if the spatial resolution of the image is 20m). **Table 2** indicates the detection error of a half-pixel for images with a 20m spatial resolution (corresponding to a gap of 10 m between the detected line and the reference line). For satellite images with a finer spatial resolution (10 to 15 m), the average location error is higher but still lower than one pixel.

In summary, the proposed method allows to detect a line between the slikke and salt marshes with a quality index near to one pixel. The qualitative evaluation allows to precise results and to locate the detection errors. The main errors are located near tidal stream or on the pioneer line characterized by scattered salt marsh patches. Indeed, in these areas spectral responses are confused with the slikke (sandflat). **Plate 4, page 71** shows that the detected line is very close to the reference (with a gap of one pixel in average).

The multi-temporal analysis between 1986 and 2006 highlights that in 1986 when the study area is 5300 ha, salt marshes cover 34% and the sandflat (slikke) and the arable land represent respectively 47% and 19% of the area. In 2006, salt marshes represent 2200 ha. Then, in twenty years, salt marshes have increase in average of 19 ha.yr<sup>-1</sup>. Three periods can be identified (**Table 2**): (1) the 1986-2000 period characterized by an increase lower than the average (15 ha.yr<sup>-1</sup>) with a stability period from 1995; (2) the 2000-2002 period with a high development of salt marshes (66 ha.yr<sup>-1</sup>) and (3) the 2002-2006 period with a lower development of salt marshes (11 ha.yr<sup>-1</sup>).

The location of the salt marshes evolution allows to define accretion sectors and regression sectors (**Plate 5, page 72**). For instance, in the 2000-2002 period, some regression sectors are locally detected. The increase of salt marshes on the West sector is partly explained by the presence of shell banks. Highly dynamic sectors are also detected near the Mont with both regression sector near the Couesnon river and accretion sector in the South.

In conclusion, this analysis showed that satellite images are an important information source to locate some changes and allows to perform the understanding of a dynamic and complex system such as the Mont-Saint-Michel Bay. With the multiplication of very high spatial resolution images, the detection of the salt marshes limits could ever be more accurate. As well, other objects such as tidal streams network could be analysed and monitored by satellite images.

## **KEYWORDS**

Mont Saint-Michel Bay, macro-tidal environment, salt marshes vegetation, semi-automatic extraction, segmentation, management, high resolution imagery.

## **BIBLIOGRAPHY**

See French text.

## **LIST OF FIGURES AND PLATES**

**Figure 1:** Salt marsh vegetation formation evolution between 1986 and 2006.

**Plate 1:** Study zone.

**Plate 2:** Main objects of the tidal zone.

**Plate 3:** Flowchart of the proposed method.

**Plate 4:** Protocol of test in three steps applied on satellite images between 1986 and 2006.

**Plate 5:** Extraction of the limit between salt marsh and tidal zone and evolution between 1986 and 2006 in three periods.

**Table 1:** Available satellite images ©Ecosgil 2005-2008.

**Table 2:** Quantitative assessment of the results.





Planche 2 : Principaux objets de l'estran.

Plate 2: Main objects of the tidal zone.

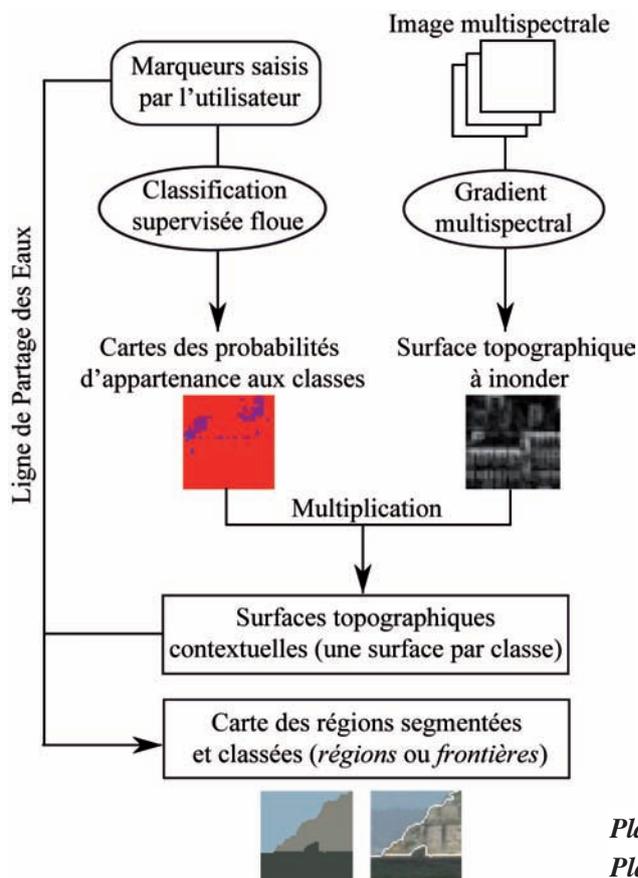
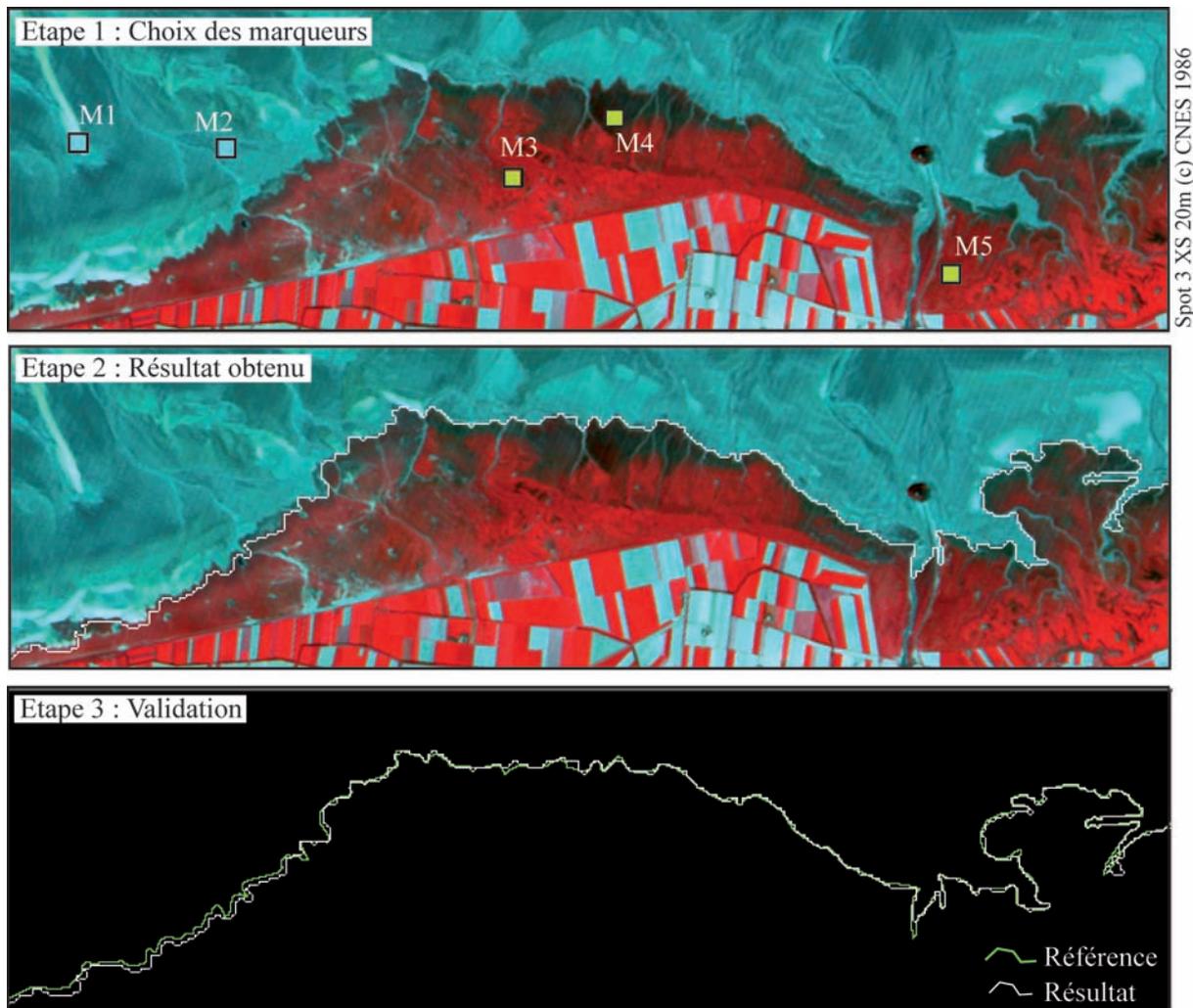
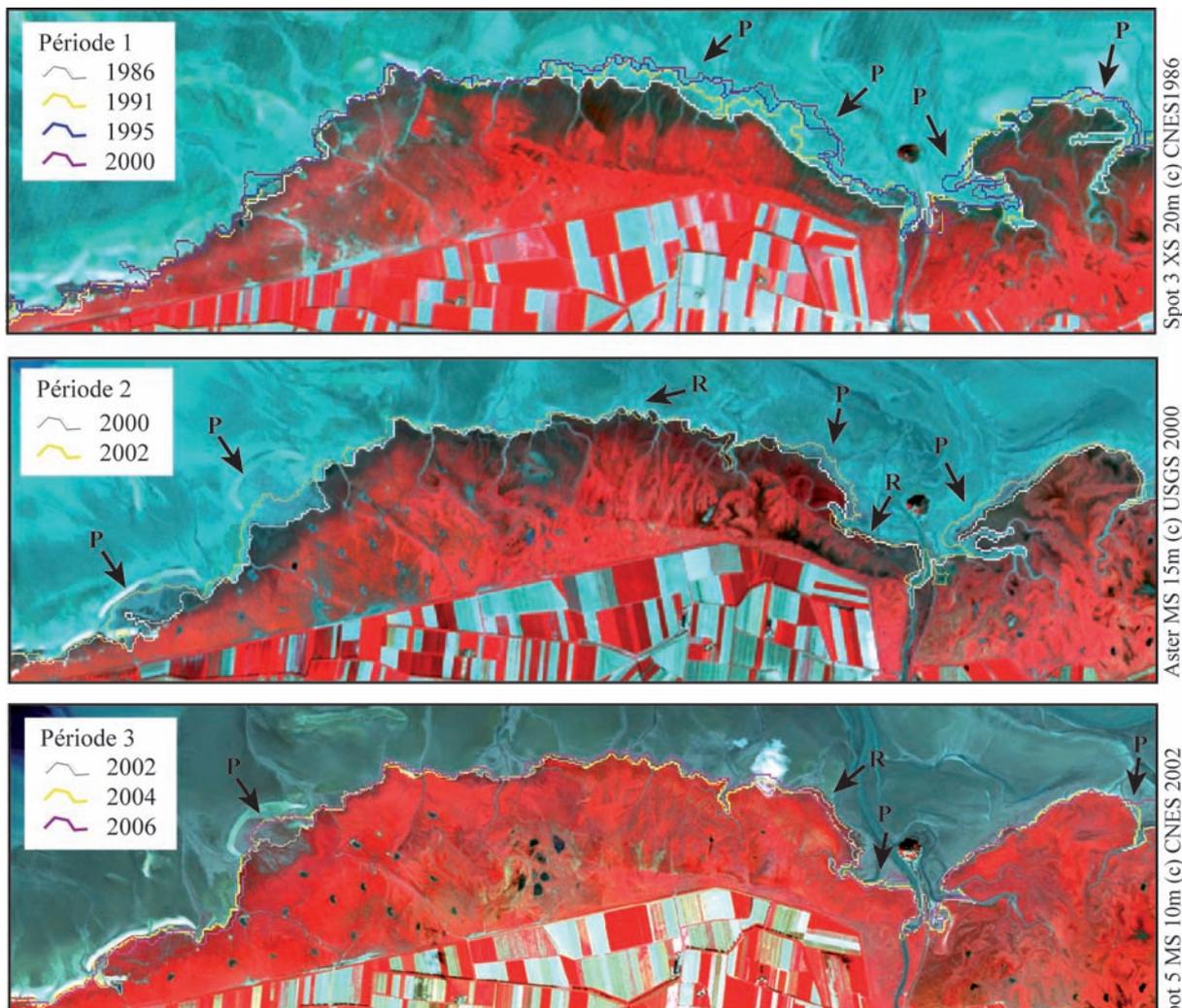


Planche 3 : Organigramme de la méthode proposée.

Plate 3: Flowchart of the proposed method.



*Planche 4 : Protocole de test en 3 étapes appliqué sur les images satellites entre 1986 et 2006.  
 Plate 4: Protocol of test in three steps applied on satellite images between 1986 and 2006.*



*Planche 5 : Spatialisation de la limite schorre/slikke et évolution entre 1986 et 2006 en trois périodes.*

*Plate 5: Extraction of the limit between salt marsh and tidal zone and evolution between 1986 and 2006 in three periods.*