



Document public

Cartographie des faciès géomorphologiques du littoral aquitain à partir de l'imagerie spatiale FORMOSAT-2

Rapport final

BRGM/RP-56101-FR
Décembre 2007



Document public



Cartographie des faciès géomorphologiques du littoral aquitain à partir de données FORMOSAT-2

Rapport final

BRGM/RP-56101-FR
Décembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 06LITA06

C. Mallet , V. Lafon, J.F. Desprats



Vérificateur :

Nom : E. PALVADEAU

Date : 04/03/2008

Original signé par

Approbateur :

Nom : Ph. DUTARTRE

Date :

Original signé par

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : Aquitaine, géomorphologie, trait de côte, cartographie, télédétection, FORMOSAT-2

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Mallet C., Lafon V., Desprats J.F. (2007) – Cartographie des faciès géomorphologiques du littoral aquitain à partir des données FORMOSAT-2. BRGM/RP-56101-FR. Rapport final 69 p., 39 ill..

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Avant-propos

Dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région (CPER) 2000-2006, l'Etat, le Conseil Régional d'Aquitaine, le BRGM et l'ONF se sont associés pour mettre en place l'Observatoire de la Côte Aquitaine au travers de la Convention d'Application du CPER Aquitaine – Programme 313-5 Littoral – Observatoire de la Côte Aquitaine – Outil de Connaissance des Milieux et de Gestion des Aménagements Côtiers, à compter du 29/12/2005 pour une durée de 2 ans. Cette convention qui prend fin en décembre 2007 est renouvelée dans le cadre du Contrat de Projet Etat-Région 2007-2013.

L'objectif principal de ce projet est de mettre à disposition des gestionnaires du littoral aquitain un outil d'aide à la décision, et en particulier concernant la problématique de l'érosion côtière.

La présente étude porte sur la détermination par télédétection des faciès géomorphologiques du système plage-dune.

Ce projet a en outre bénéficié de l'appui du programme Kalideos (CNES) mettant à disposition de différents partenaires (UMR CNRS 5809 EPOC, INRA, BRGM,...) des données satellitales acquises sur le Bassin d'Arcachon.



Synthèse

L'Observatoire de la Côte Aquitaine vise en particulier à réaliser des suivis réguliers et fréquents de l'évolution géomorphologique du littoral. L'objectif de cette étude est de mettre en place une méthode de suivi d'un certain nombre de faciès sédimentaires et biologiques du système plage-dune qui caractérisent les avancées et recul de la côte. Habituellement réalisés par des levés de terrain (topographie au GPS ou au théodolite par exemple) ou bien par interprétation de photographies aériennes, ces levés présentent des inconvénients, notamment les coûts de mise en œuvre à l'échelle des 270 km de la côte aquitaine. Il est donc recherché une méthode mixte combinant la précision des levés de terrain et la vision synoptique des images satellites à haute résolution pour réaliser ces suivis.

La cartographie par télédétection des différents faciès géomorphologiques constituant le littoral aquitain s'est appuyée sur l'imagerie satellitale FORMOSAT-2. En effet, la télédétection spatiale peut constituer un outil précieux pour une mise à jour régulière de ces différents faciès comme le haut de plage, la bas de plage, les dunes grises et blanches, mais aussi les limites majeures constituées par le trait de côte et l'interface dune / forêt.

L'approche méthodologique a permis de tester différentes approches de classification et de définition des parcelles d'entraînement, les classifications s'appuyant sur une partie des points reconnus sur le terrain, l'autre partie servant à la validation. La classification non supervisée basée sur une prise de parcelles d'entraînement (méthode du recuit simulé) permet d'atteindre des niveaux de performance élevés : 69,33% en prenant en compte la totalité des faciès : haut et bas de plage, dunes blanches et grises, et forêt. La précision passe à 77,42% après regroupement en trois classes majeures : plage, dune et forêt.

La précision de la cartographie du trait de côte, optimisée par l'utilisation du filtre Sobel est de 71,72% (84,55% après regroupement des trois classes majeures).

Seule l'image de Soulac pose des problèmes de classification, l'hypothèse d'une particularité géo-pédologique entraînant une singularité radiométrique de l'imagerie spatiale étant posée.



Sommaire

1. Introduction	13
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	13
1.2. METHODE	16
1.2.1. Compatibilité géographique des scènes FORMOSAT-2	16
1.2.2. Compatibilité radiométrique des scènes FORMOSAT-2	16
1.2.3. Discrimination des faciès sur l'imagerie FORMOSAT-2	17
1.2.4. Définition de classes d'entraînement	18
1.2.5. Définition du trait de côte	19
1.2.6. Validation de la reconnaissance des faciès et de la position du trait de côte	19
2. Données disponibles	21
2.1. DONNÉES SATELLITALES FORMOSAT-2	21
2.1.1. Caractéristiques des images FORMOSAT-2	21
2.1.2. Données acquises par le projet	21
2.2. MESURES IN SITU	23
3. Compatibilité géométrique et radiométrique des scènes FORMOSAT-2	27
3.1. PRECISION GEOGRAPHIQUE DES DONNEES FORMOSAT-2 ORTHORECTIFIEES	27
3.2. VARIABILITE DE LA RADIOMETRIE DE L'EAU, DE LA FORÊT ET DU SABLE	29
3.3. MOSAÏQUAGE	31
3.4. CONCLUSION	32
4. Analyse des méthodologies de classification sur une scène test	35
4.1. DISCRIMINATION DES FACIES LITTORAUX	35
4.1.1. Caractérisation visuelle	35
4.1.2. Méthode du KMEANS	37
4.1.3. Méthode du recuit simulé	39
4.2. TEST DES DIFFERENTS JEUX DE ROIS POUR LA CLASSIFICATION SUPERVISÉE DE LA SCÈNE 6	41
4.3. EXTRACTION DU TRAIT DE CÔTE PAR LE FILTRE DE SOBEL	48

4.4. CONCLUSION	49
5. Extrapolation de la classification à tout le littoral.....	53
5.1. RESULTATS DE LA CLASSIFICATION POUR LA MOSAIQUE CENTRE	53
5.2. RESULTATS DE LA CLASSIFICATION POUR LA MOSAIQUE SUD.....	54
5.3. RESULTATS DE LA CLASSIFICATION POUR LA MOSAIQUE NORD.....	56
5.4. BILAN DE LA VALIDATION DE LA CLASSIFICATION POUR LES SCENES 1 À 12.....	59
5.5. CONCLUSIONS	60
6. Extraction du trait de côte	63
7. Recommandations et perspectives	65
8. Conclusion.....	67
9. Bibliographie	69

Liste des illustrations

Illustration 1 – Morphologie d'une plage sableuse.....	14
Illustration 2 – Morphologie type du cordon dunnaire (d'après Favennec 1997)	14
Illustration 3 – Valeurs de l'éclairement solaire dans les bandes Formosat-2	17
Illustration 4 – Organigramme de la méthodologie	17
Illustration 5 – Description des données FORMOSAT-2	21
Illustration 6 - Trace au sol des acquisitions FORMOSAT-2	22
Illustration 7 – Scènes FORMOSAT-2 sur le littoral aquitain.....	22
Illustration 8 – Caractéristiques des scènes FORMOSAT-2	23
Illustration 9 – Conditions de vent et de marée au moment des prises de vue FORMOSAT-2	23
Illustration 10 – Reconnaissance des faciès localisés par GPS.....	24
Illustration 11 – Observations in-situ, à gauche : transects réalisés sur l'ensemble du littoral aquitain, à droite : exemple de transect plage-dune	25
Illustration 12 – Superposition de l'image FORMOSAT-2 d'un blockhaus et de son contour DGPS sur le terrain	27
Illustration 13 – Répartition spatiale des points de contrôles issus du Scan25 (© IGN) et utilisés pour la validation de l'orthorectification FORMOSAT-2	28
Illustration 14 – Détail du défaut du Scan25 (© IGN)	28
Illustration 15 – Comparaison des réflectances au sommet de l'atmosphère (r_{toa} , nombre sans dimension) de l'eau, de la forêt et de la dune blanche des scènes FORMOSAT-2 n°0 et 6	29
Illustration 16 – Comparaison des réflectances (r_{toa} , nombre sans dimension) au sommet de l'atmosphère de l'eau, de la forêt et de la dune blanche des scènes FORMOSAT-2 n°6 et 11	30
Illustration 17 – Comparaison des réflectances (r_{toa} , nombre sans dimension) au sommet de l'atmosphère de la dune blanche des scènes FORMOSAT-2 n°5 à 9.....	31
Illustration 18 – Mosaïquage des scènes FORMOSAT-2.....	32
Illustration 19 – Pointages DGPS (croix) et ROIs délimitées à l'aide de ces contours.....	35
Illustration 20 – Test de séparabilité spectrale des faciès définis par caractérisation visuelle par la méthode Transformed Divergence.....	36

Illustration 21 – Superposition des contours de faciès obtenus à l'aide des levés DGPS (domaines colorisés à gauche) sur l'imagerie FORMOSAT-2 (contours noirs à droite).....	37
Illustration 22 – Classification des pixels au niveau du transect TG18 à l'aide de la méthode du KMEANS (les contours DGPS sont superposés à l'image classée)	38
Illustration 23 – Classes obtenues par la méthode du KMEANS et compilées après le test de séparabilité.....	39
Illustration 24– Imagettes utilisées pour identifier les faciès littoraux par la méthode du recuit simulé.....	40
Illustration 25 – ROIs obtenus à partir des classes issues du recuit simulé	41
Illustration 26 – Classification supervisée au niveau du transect TG 18 pour les parcelles d'entraînement « Visuel » (en haut à gauche), et non supervisée « KMEANS » (en haut à droite) et « Recuit » (en bas).....	43
Illustration 27 – Classification supervisée au niveau du transect TG 15 pour les parcelles d'entraînement « Visuel » (en haut à gauche),et non supervisée « KMEANS » (en haut à droite) et « Recuit » (en bas).....	44
Illustration 28 – Précision de la classification de la scène 6, à partir des ROIs définies visuellement	46
Illustration 29 – Précision de la classification de la scène 6, à partir des ROIs définies par la méthode KMEANS	46
Illustration 30– Précision de la classification de la scène 6, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé).....	47
Illustration 31 – Zooms de la bande 2 filtrée à l'aide de l'algorithme de Sobel de la scène 6, au niveau des transects TG 15 (à gauche) et TG 18 (à droite) (superposition du trait de côte observé - DGPS).....	49
Illustration 32 – Chaîne de traitement proposée.....	51
Illustration 33 – Précision de la classification de la mosaïque centre, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé).	54
Illustration 34 – Précision de la classification de la mosaïque sud, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé).....	55
Illustration 35– Précision de la classification des scènes 1 et 2, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé).....	56
Illustration 36 – Représentation des argiles du Gulp (à gauche) et des résurgences de nappes superficielles (à droite - extraits de Géoportail 2007)	57
Illustration 37 – Représentation des argiles du Gulp (encadré) à partir du: Geoportail (à gauche) et de FORMOSAT-2 (à droite).....	58

Illustration 38 – Précision de la classification supervisée des scènes 1 à 12, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé).....	59
Illustration 39 – Trait de côte 2007 superposé à la classification (à gauche) et à l'image FORMOSAT-2 non traitée (à droite)	63



1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Des protocoles ont été mis en place dans le cadre de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (<http://littoral.aquitaine.fr>) pour effectuer des suivis réguliers de l'évolution géomorphologique du littoral aquitain depuis 2002. Les mesures concernent :

- le trait de côte (pied de dune),
- les contacts plage-dune,
- les entailles d'érosion dunaire,
- la morphologie de la plage.

Ces mesures sont classiquement réalisées par des levés au GPS (précision métrique) et DGPS (précision centimétrique), combinées à l'interprétation d'ortho photo-plans. Dans le cadre de cette étude, il est recherché une méthode d'analyse utilisant des images spatiales haute résolution. En effet, comparée à la photographie, l'utilisation de la télédétection spatiale offre la capacité de disposer d'informations spectrales plus riches qui devraient permettre d'améliorer les mesures des descripteurs précités du système plage-dune.

Depuis les travaux de Pouget (1988) utilisant les images SPOT pour cartographier les faciès géomorphologiques du système plage-dune du littoral aquitain, d'autres études ont été entreprises. En 2005, le BRGM et l'UMR CNRS 5805 EPOC de l'Université Bordeaux 1 ont étudié l'intérêt de la télédétection haute résolution SPOT 5 pour l'identification d'entités géomorphologiques du Bassin d'Arcachon (y compris plage et dune), dans le cadre d'un projet piloté par le CNES et l'IFEN (Pedreros *et al.*, 2005). Cette étude a été poursuivie par un stage de Master2 en 2007, en collaboration entre l'UMR EPOC et le BRGM.

En 2007, en collaboration avec SPOTIMAGE et le CNES, il a été convenu d'utiliser le capteur FORMOSAT-2 pour acquérir des scènes sur l'ensemble du littoral aquitain. En effet, pour les périodes de programmation des prises de vue demandées, il est difficile de disposer d'images SPOT5 compte-tenu de la forte demande des utilisateurs. Techniquement FORMOSAT-2 permet de répondre aux besoins de l'Observatoire de la Côte Aquitaine car il offre les bandes spectrales proches de SPOT5, il était plus disponible au moment de la programmation et il offre en outre une meilleure résolution (2 m au lieu de 2,5 m). Ainsi, les 26 et 27 août 2007, quatorze scènes ont été acquises, couvrant la totalité de la côte depuis la Pointe de Grave jusqu'à la frontière espagnole.

La présente étude vise à définir les capacités d'utilisation des images FORMOSAT-2 pour la côte sableuse aquitaine uniquement.

Les différents faciès qui caractérisent la plage et la dune sont représentés respectivement sur l'illustration 1 et l'illustration 2.

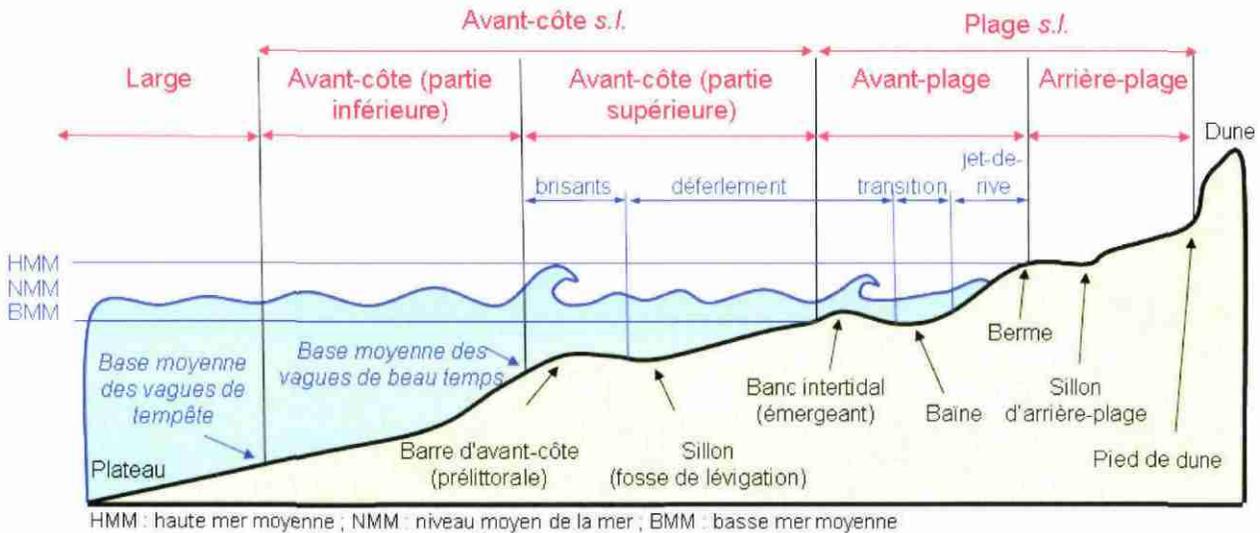


Illustration 1 – Morphologie d'une plage sableuse

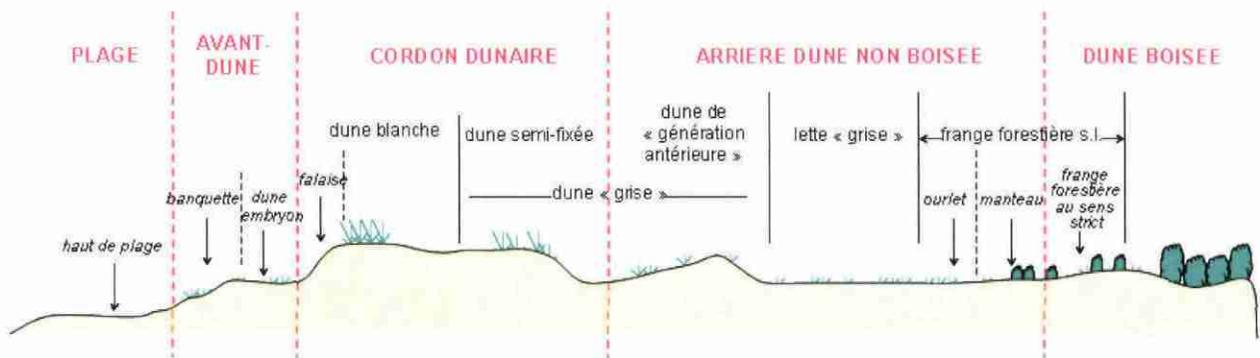


Illustration 2 – Morphologie type du cordon dunnaire (d'après Favennec 1997)

Dans le cadre de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, les descripteurs géomorphologiques qui doivent être mesurés correspondent d'une part à la plage et d'autre part au cordon dunnaire :

Les descripteurs du cordon dunnaire sont des témoins essentiels de l'état général du littoral, tant ils jouent un rôle tampon entre l'océan et le continent :

- **La dune grise fixée** témoigne de la végétalisation de la zone en dépression située en arrière de la dune mobile.
- **La dune grise** témoigne d'un état de végétalisation intermédiaire entre la dune blanche et la dune grise fixée. L'absence de cet indicateur annonce un ensablement de l'arrière dune, et une reprise de la mobilité.
- **La dune blanche** est définie comme le témoin spécifique de la mobilité dunnaire. Il est important de la cartographier afin d'en déterminer l'évolution. Parfois peu recouverte de végétaux, elle nécessite l'intervention d'aménagements précis (plantation, branchage, ganivelles etc.).

- **La dune embryonnaire** est un indicateur d'importants apports sédimentaires provenant de la plage ainsi que d'une période de répit vis-à-vis des attaques marines.

Les principaux descripteurs de plage que l'on souhaite mesurer sont :

- **Le trait de côte**, défini comme étant la limite entre l'océan et le continent, il se retrouve localement entre le haut de plage et la dune embryonnaire (pied de dune ou bas de falaise). Sa localisation annuelle est une priorité pour la connaissance du milieu, sa dynamique et son évolution.
- **La berme** est un corps sédimentaire qui marque la limite d'action des houles en période de beau temps. Cet indicateur se forme par accrétion sédimentaire lorsque le régime des houles devient moins important au printemps. Il disparaît par l'inverse du phénomène à l'automne. En été, lorsque les vents sont favorables (principalement de secteur ouest), cette entité alimente en sable la dune. Cette dernière, d'un bon état phytosanitaire devient une unité de stockage essentielle pour les futures attaques érosives.

D'autres indicateurs géomorphologiques de la plage et de la dune existent (système barre-baïne, falaise dunaire, etc....) mais ne font pas l'objet du présent rapport.

En s'appuyant sur l'étude menée par Pedreros *et al.* (2005), les faciès qui seront cartographiés en s'appuyant sur l'imagerie FORMOSAT-2 sont :

En zone de plage :

- le pied de dune ; considéré comme le trait de côte pour l'Observatoire de la Côte Aquitaine, c'est l'indicateur qu'il est essentiel de pouvoir suivre,
- les formes des systèmes barre-baïnes,
- le sable sec et le sable humide,
- la limite terre-mer,
- la crête de la berme,
- les laisses de mer,

en zone dunaire :

- les banquettes à agropyrum
- les falaises dunaires,
- la dune blanche (végétation dominée par l'oyat),
- la dune grise,
- la limite de la frange forestière.

1.2. METHODE

Après une validation de la précision géographique, il conviendra de valider la compatibilité radiométrique des différentes scènes FORMOSAT-2, préalable à tout mosaïquage des scènes.

1.2.1. Compatibilité géographique des scènes FORMOSAT-2

Cette analyse préliminaire a été entreprise afin d'évaluer précisément la qualité de la restitution géographique des scènes FORMOSAT-2 (F2) pour lesquelles nous ne disposons pas d'expérience concernant les prétraitements et traitements, en particulier sur les zones côtières.

Dans ce but, nous comparerons la scène la plus au nord avec le Scan 25® de l'IGN (résolution 2,5 m, précision métrique) mis à disposition par l'UMR EPOC. Enfin, le contour d'un blockhaus levé par le BRGM au DGPS sera directement superposé à la scène FORMOSAT correspondante.

1.2.2. Compatibilité radiométrique des scènes FORMOSAT-2

La réflectance au sommet de l'atmosphère (R_{toa}) de trois scènes de référence sera sommairement analysée afin de définir si des classes issues de ces trois scènes, et portant le même label, présentent ou non des réflectances similaires. Une modification significative de cette réflectance peut être soit liée à la variabilité naturelle de la réflectance de la cible considérée, soit à l'hétérogénéité des conditions atmosphériques. Pour repérer l'impact de l'atmosphère sur les valeurs radiométriques, nous utiliserons l'eau et la forêt de pin pour lesquelles nous pouvons considérer que les réflectances, intégrées sur une surface importante, sont homogènes à l'échelle des deux jours d'acquisition (26 et 27 août 2007).

En complément, les zones de dunes blanches (extraites avec le support des observations de terrain) seront analysées afin d'avoir une première estimation de la variabilité spatiale de la couleur de ce faciès.

R_{toa} a été calculée d'après les relations suivantes fournies par Spot Image :

Relation (1) : $L_k = CN_{x,k} \times A_k - B_k$ où

- L représente la luminance extra atmosphérique,
- CN la valeur du pixel (x) de l'image brute dans la bande k ,
- A est la valeur du gain dans la bande k (<PHYSICAL_GAIN> dans le fichier de métadonnées) qui intègre le gain de programmation (<GAIN NUMBER>) et
- B est la valeur du biais dans la bande k (<PHYSICAL_BIAS> dans le fichier de métadonnées).

Relation (2) : $R_{toa} = \frac{\pi \times L}{E_s \times D \times \cos \theta}$ où

- E_s représente l'éclairement solaire dans la bande k (valeurs consignées dans le tableau de l'illustration 3 pour les correspondances),
- θ est l'angle solaire zénithal ($90 - \langle \text{SOLAR_ELEVATION} \rangle$ du fichier de métadonnées) et
- D est fonction du jour julien d (voir relation 3).

Relation (3) : $D = \left[1 + \left(0,0167 * \cos \left(2 \times \pi \times \left(\frac{d-3}{365} \right) \right) \right) \right]^2$

Bandes	B1	B2	B3	B4
E_s	1953,4	1836,2	1553,6	1079,8

Illustration 3 – Valeurs de l'éclairement solaire dans les bandes Formosat-2

1.2.3. Discrimination des faciès sur l'imagerie FORMOSAT-2

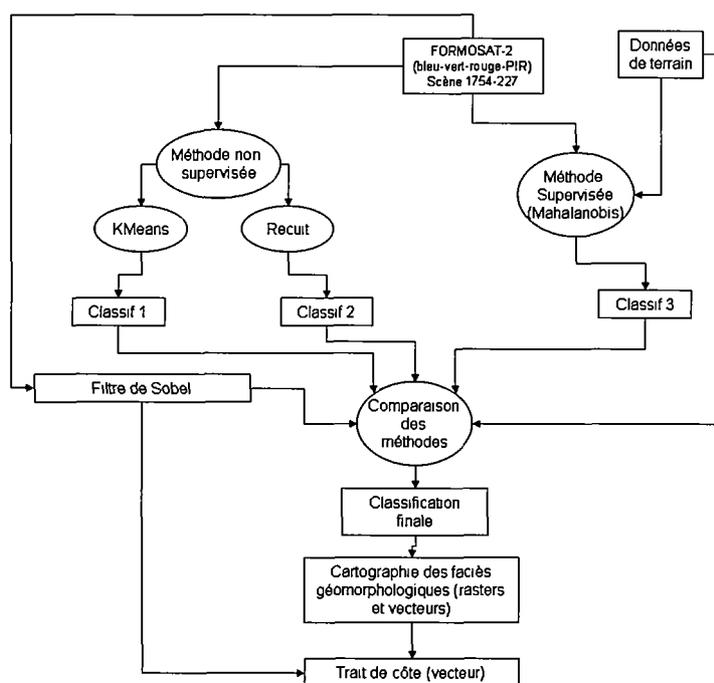


Illustration 4 – Organigramme de la méthodologie

Ces tests ont été réalisés sur la scène du Cap-Ferret (1754-227 du 27/08/2007, voir le chapitre 2 pour la description des données) (Illustration 4) qui présente plusieurs zones très bien documentées sur le terrain. En particulier, le transect topographique n°TG18 a été exploité (voir description dans le chap. 2). Les résultats de ces tests seront ensuite extrapolés aux autres scènes FORMOSAT-2.

Discrimination à partir des observations de terrain. En suivant la méthode de Pedreros *et al.* (2005) des Régions d'Intérêt (ROIs) typiques de chaque faciès seront définies à partir de la connaissance du terrain, et en utilisant strictement les limites de faciès observées. Puis la séparabilité des ROIs sera testée grâce aux méthodes de Jeffries-Matusita et Transformed Divergence disponibles dans le logiciel ENVI (© ITT). Le cas échéant, des ROIs seront regroupées si l'analyse de séparabilité se montre inefficace à différencier les pixels de ROIs distinctes.

Générations des ROIs à partir de méthodes de classification non supervisées. Deux méthodes ont été testées : (i) une méthode non optimisée (KMEANS), (ii) et la méthode du Recuit Simulé implémentée sous ENVI (© ITT) par Rémi Butel (Butel *et al.* 2002).

Pour information, deux méthodes optimisées (Amoeba et Powell) intégrées par défaut à IDL (interface de programmation © ITT) ont aussi été testées. Dans le cas de ces méthodes optimisées, les composantes des centres de gravité des classes sont vectorisées et envoyées à la procédure d'optimisation. Celle-ci fait des appels à une fonction de calcul de la somme de la distance de chaque pixel au centre de gravité le plus proche, jusqu'à trouver la valeur minimale. Les méthodes de Powell et d'Amoeba s'avèrent très rapides mais peuvent converger vers un minimum local. Il a alors été décidé d'utiliser la méthode du Recuit Simulé pour converger vers le minimum global.

(i) La méthode du KMEANS fonctionne sur le principe suivant :

- une classification initiale arbitraire est effectuée ;
- les pixels sont rangés dans les classes les plus proches ;
- les centres de gravité des classes sont recalculés.

Ces trois actions sont répétées jusqu'à ce que le pourcentage de pixels qui se déplacent soit inférieur à un seuil déterminé par l'utilisateur. KMEANS effectue le calcul pour un nombre de classes fixé par l'utilisateur. L'initialisation de la méthode implémentée sous ENVI répartit les classes de manière régulière sur la plage comprise entre le minimum et le maximum de l'image dans chaque bande.

(ii) La méthode du Recuit Simulé, fonctionnant sur le même principe que les méthodes Amoeba et Powell a été développée à l'unité EPOC (Université Bordeaux 1) ; elle offre un second choix pour l'initialisation : celui de prendre le premier pixel comme centre de classe, puis de sélectionner successivement les pixels les plus éloignés (dans l'espace spectral) des précédents.

Ces méthodes étant relativement coûteuses en temps, des tests de classification non supervisés seront effectués sur de petites zones recoupant le transect TG18.

1.2.4. Définition de classes d'entraînement

Les classes d'entraînement seront établies à partir de la connaissance du terrain ou de la méthode non supervisée la plus apte à discriminer des faciès de nature différente. Elles seront soit compilées à partir de plusieurs images, soit propres à chaque image. Les classes seront définies sous forme de ROIs. La méthode de classification supervisée par distance de Mahalanobis, basée sur ces ROIs sera appliquée à l'ensemble des scènes pour restituer la cartographie des faciès littoraux ainsi que le trait de côte.

1.2.5. Définition du trait de côte

Le trait de côte est défini comme le pied de dune. Il sera extrait des scènes FORMOSAT-2 après classification, ce qui implique une discrimination correcte entre les zones dunaires et les zones de plage. Une méthode alternative sera testée, basée sur des outils d'extraction de contour. L'extraction de contours consiste à identifier les points de l'image séparant des zones homogènes ou des textures, elle dépend peu de l'homogénéité radiométrique inter-scène et, à ce titre, est éligible pour définir le trait de côte dans son ensemble. Les méthodes de détection de contours consistent à faire passer dans l'image des opérateurs assimilables à des calculs de dérivées premières ou secondes. L'extraction des contours revient alors à rechercher des maxima locaux, ou des lieux de passages par zéro, dans les images résultant de ces transformations. Nous nous intéresserons en particulier à l'algorithme de Sobel non-linéaire (implémenté sous ENVI), un filtre passe-haut destiné à extraire le contour extérieur des objets. Cet opérateur calcule le gradient de l'intensité de chaque pixel. Le gradient d'une fonction de deux variables (ici l'intensité en fonction des coordonnées de l'image) est un vecteur de dimension 2 dont les coordonnées sont les dérivées selon les directions horizontale et verticale. En chaque point, le gradient pointe dans la direction du plus fort changement d'intensité, et sa longueur représente le taux de variation dans cette direction. Le filtre de Sobel présente l'avantage d'être insensible à la direction des bords qu'il peut détecter. En outre, il donne généralement un contour de 2 pixels d'épaisseur qu'il place à cheval sur la ligne de contour.

Ce filtre sera appliqué sur la bande Vert (canal 2) des images FORMOSAT-2 car cette longue d'onde indique les meilleurs contrastes au niveau de la plage et plus particulièrement du trait de côte.

1.2.6. Validation de la reconnaissance des faciès et de la position du trait de côte

Le calcul de l'erreur sur le positionnement du trait de côte sera effectué pour l'ensemble des scènes FORMOSAT-2. Le trait de côte sera comparé aux tracés DGPS et à l'ensemble des pointages effectués par le BRGM. La validation des faciès sera faite pour toutes les scènes à partir de l'ensemble des transects disponibles. Pour cette validation, en fonction de la précision du calage en latitude et longitude des scènes FORMOSAT-2, des zones tampons seront calculées autour de chaque pointage DGPS, faciès par faciès et, séparément, pour le trait de côte. Ces zones tampons seront superposées au résultat des classifications. Un pixel sera considéré comme bien classé lorsque qu'il est superposé à une zone tampon de label identique.

La validation se fera pour l'ensemble des faciès, et pour des classes de faciès regroupant les zones forestières, dunaires et de plage.



2. Données disponibles

2.1. DONNEES SATELLITALES FORMOSAT-2

2.1.1. Caractéristiques des images FORMOSAT-2

Le satellite taïwanais FORMOSAT-2 (F2), lancé en 2004, a été développé dans le cadre du « Plan national à long terme de développement des technologies spatiales » qui a pour ambition de permettre à Taïwan de devenir producteur et non plus uniquement consommateur de données spatiales. Il a été développé en utilisant largement les industries locales pour les composants intégrés sur une plateforme du constructeur franco européen EADS Astrium.

Les données haute résolution F2 sont décrites dans l'illustration 5.

Produits	N&B : 2 m Couleur : 2 m (produit fusionné) Multispectral (R, V, B, PIR) : 8 m Bundle (images Pan et MS séparées)
Bandes spectrales	P : 0,45 – 0,90 μm B1 : 0,45 – 0,52 μm (Bleu) B2 : 0,52 – 0,60 μm (Vert) B3 : 0,63 – 0,69 μm (Rouge) B4 : 0,76 – 0,90 μm (Proche Infra Rouge)
Emprise	24 km x 24 km
Revisite	Quotidienne
Angles de visée	latéral et avant-arrière : +/- 45°
Programmation	Oui L'acquisition simultanée des images panchromatiques et multispectrales est possible
Dynamique de l'image	8 bits/pixel
Taille des images (niveau 1A hors métadonnées)	MS : 35 Mo Pan : 137 Mo

Illustration 5 – Description des données FORMOSAT-2

2.1.2. Données acquises par le projet

Quatorze scènes FORMOSAT-2 ont été acquises les 26 et 27 août 2007. Les 4 scènes acquises le 26 août correspondent à la trace Ouest, les 10 autres correspondant à la trace Est (*Illustration 6, Illustration 7*).

Toutes les scènes acquises ont été livrées au niveau ortho. Ceci implique :

- Une correction radiométrique des distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs élémentaires de l'instrument de prise de vue.
- Une mise en projection cartographique à partir de points d'appui et d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) issu de Reference3D (© IGN) pour éliminer les

distorsions dues au relief. Les données ont été livrées dans la projection UTM zone 30 / WGS84 .

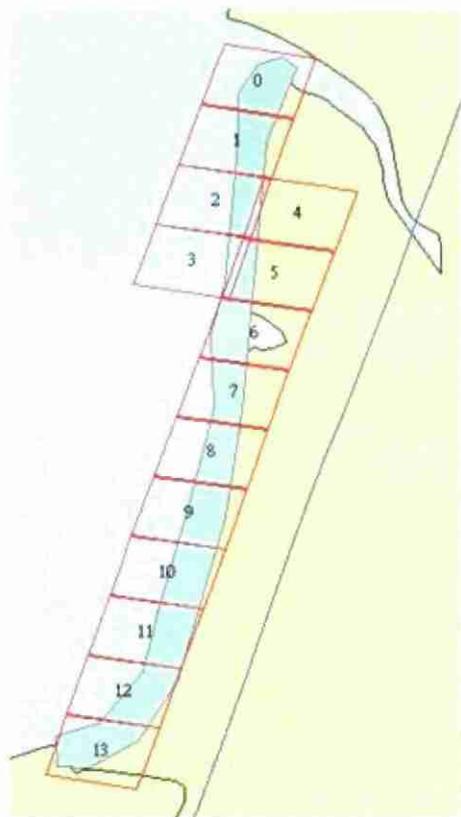


Illustration 6 - Trace au sol des acquisitions FORMOSAT-2

(crédit image : Spot Image)



Illustration 7 – Scènes FORMOSAT-2 sur le littoral aquitain

Les 14 scènes FORMOSAT-2 sont décrites dans le tableau de l'illustration 8. Elles sont en mode P+XS « pan-sharpened » (panchromatique 2 m fusionné avec le multispectral 8 m). Les hauteurs d'eau et conditions de marée au moment des prises de vue, issues du modèle de marée du SHOM¹, ainsi que les conditions de vent et de houles, issues du site Windguru², sont reportées dans le tableau de l'illustration 9.

¹ <http://www.shom.fr/>

² <http://www.windguru.cz/fr>

Scène	K-J	Date acquisition	Heure acquisition
0	1752-0223	2007-08-26	10:36:19.8
1	1752-0224	2007-08-26	10:36:23.423698
2	1752-0225	2007-08-26	10:36:27.025702
3	1752-0226	2007-08-26	10:36:30.635111
4	1754-0225	2007-08-27	10:36:38.528500
5	1754-0226	2007-08-27	10:36:42.125865
6	1754-0227	2007-08-27	10:36:45.735266
7	1754-0228	2007-08-27	10:36:49.337261
8	1754-0229	2007-08-27	10:36:52.954068
9	1754-0231	2007-08-27	10:36:56.565938
10	1754-0232	2007-08-27	10:37:00.182746
11	1754-0233	2007-08-27	10:37:03.769927
12	1754-0234	2007-08-27	10:37:07.364516
13	1754-0235	2007-08-27	10:37:10.988729

Illustration 8 – Caractéristiques des scènes FORMOSAT-2

	Prédictions de marée			Prédictions de vent et de houles		
	Pointe de Grave	Cap Ferret	Boucau	Soulac	Cap Ferret	Biarritz
26/08/2007	Flot, coefficient 60			ENE, 8 nœuds	ENE, 9 nœuds	ESE, 6 nœuds
	2,67 m	1,92 m		N, 0,5 m, 6 s	WNW, 0,5 m, 9 s	E, 0,9 m, 4s
27/08/2007	Flot, coefficient 76			NE, 10 nœuds	ENE, 8 nœuds	4 nœuds
	2,01 m	1,23 m	1,74 m	NE, 0,5 m, 3 s	NE, 0,5 m, 3 s	NE, 0,7 m, 5s

Illustration 9 – Conditions de vent et de marée au moment des prises de vue FORMOSAT-2

2.2. MESURES IN SITU

L'Observatoire de la Côte Aquitaine dispose de bornes géodésiques réparties entre l'estuaire de la Gironde et l'Adour pour suivre l'évolution géomorphologique de la côte. Une campagne de terrain s'est déroulée du 02 au 21 avril 2007 afin de mesurer :

- des profils topographiques dune-plage au droit des 50 couples de bornes, (orientés ouest-est, *Illustration 11*), associés à des observations morphologiques et de végétation,
- la cartographie sur le terrain des descripteurs de dune et de plage (berme, laisse de mer, trait de côte, banquette, dune blanche, dune grise, forêt...) sur deux secteurs de la commune de Lège Cap-Ferret le Grand Crohot (transect TG 16) et la Pointe (transect TG18 situé 2 km au nord de l'extrême pointe). D'autres objets ont été relevés tel que des blockhaus notamment pour tester le géoréférencement des images.

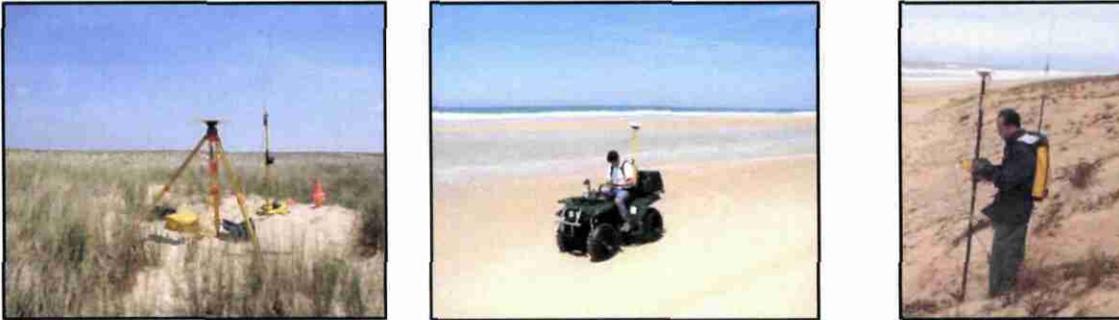


Illustration 10 – Reconnaissance des faciès localisés par GPS

L'ensemble des mesures a été effectué à l'aide d'un DGPS (différentiel) Trimble 5700 (Illustration 10). La précision de la mesure réalisée par le DGPS est centimétrique, cependant il faut tenir compte de la difficulté pour un opérateur de localiser *in-situ* certains faciès telle que la position du pied de dune que l'on peut rarement définir à moins de 5 m. Il faut donc considérer une précision de +/- 5 m dans la localisation des descripteurs géomorphologiques identifiés dans cette étude. Chaque point mesuré comprend les coordonnées (latitude, longitude, altitude rapportés en WGS84 et zéro NGF69), ainsi qu'un label avec la nomenclature suivante : baie, bord de plage, banquette, berme, avant-dune, dune blanche, dune grise, forêt.

Ces données de terrain sont utilisées au cours de deux phases :

- comme parcelle de calage pour la classification supervisée, lors de la définition des parcelles d'entraînement. (50% des données),
- comme parcelle de validation (50% restants).

En outre, dans le cadre de cette mission, des mesures spectroradiométriques des différents descripteurs ont été réalisées le 17/04/2007 par J.M. Froidefond (Université Bordeaux 1) et analysées par Lafosse (2007).

L'acquisition de données de terrain reste indispensable pour la définition des parcelles d'entraînement d'une part (ROIs) puis pour la validation, que ce soit lors d'une démarche méthodologique, ou bien en phase opérationnelle. Mais cette phase qui est très lourde et onéreuse pour une cartographie classique devient ici complémentaire, et limitée à certains secteurs de référence.

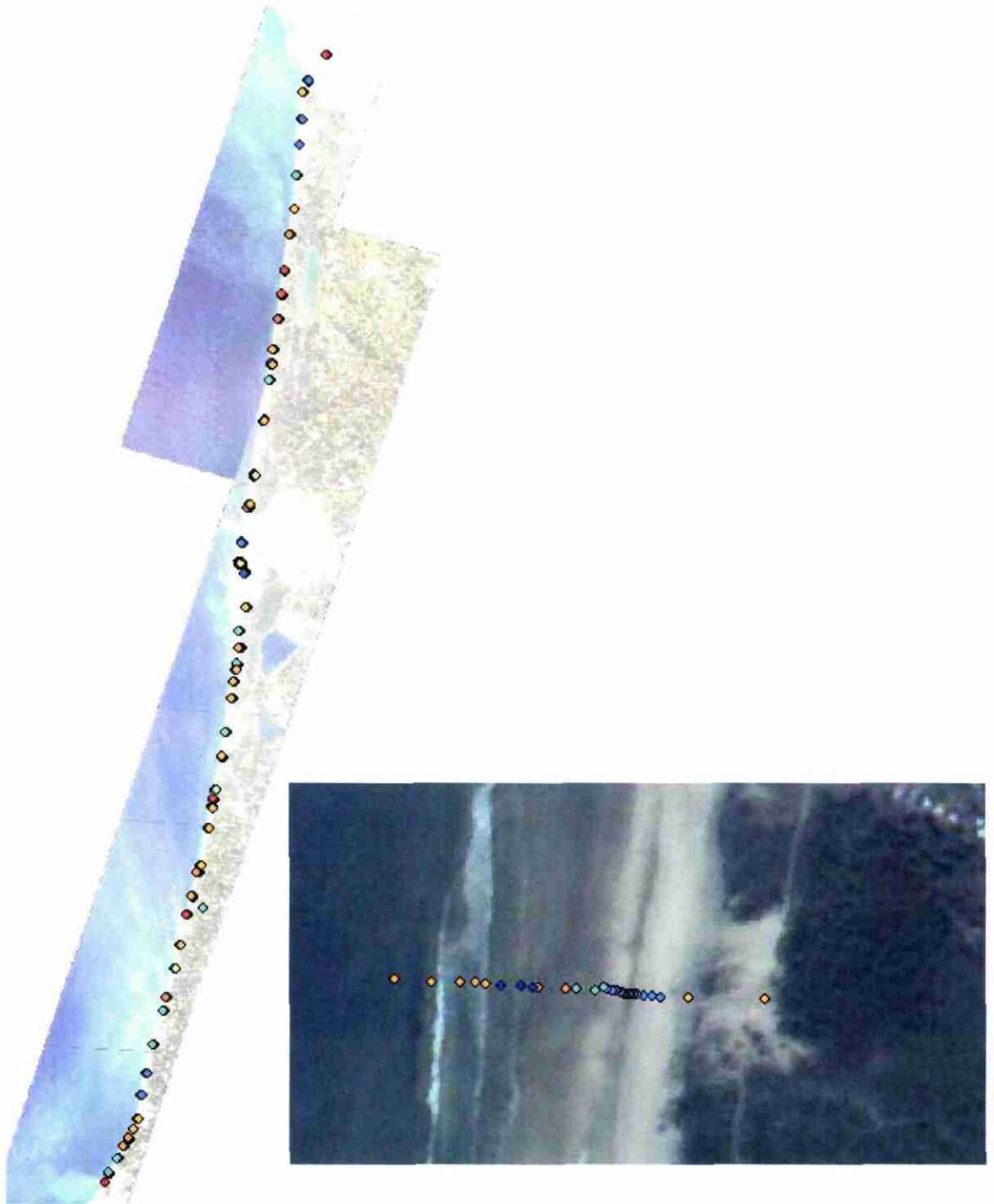


Illustration 11 – Observations in-situ, à gauche : transects réalisés sur l'ensemble du littoral aquitain, à droite : exemple de transect plage-dune



3. Compatibilité géométrique et radiométrique des scènes FORMOSAT-2

3.1. PRECISION GEOGRAPHIQUE DES DONNEES FORMOSAT-2 ORTHORECTIFIEES

Un premier test, effectué par comparaison d'un levé DGPS du contour d'un blockhaus et de la scène n°6, montre une excellente concordance spatiale entre les mesures de terrain et l'imagerie satellite (*Illustration 12*). La précision observée est de l'ordre du pixel (2 m).

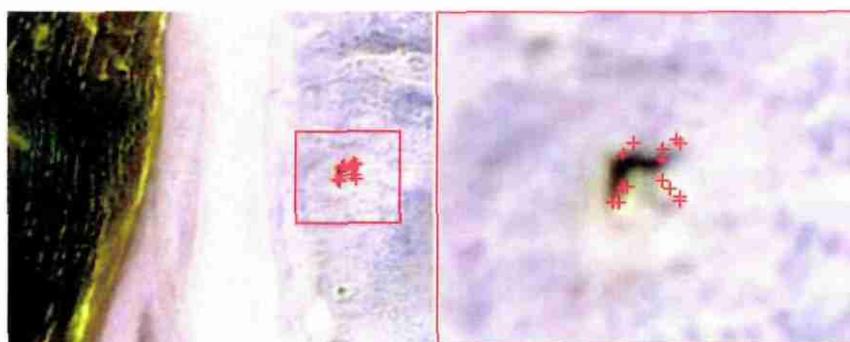


Illustration 12 – Superposition de l'image FORMOSAT-2 d'un blockhaus et de son contour DGPS sur le terrain

La précision exacte du positionnement des pixels FORMOSAT-2 a été évaluée sur la scène n°0 (Soulac / Pointe de Grave), à l'aide de 32 points de contrôle (*Illustration 13*) issus du Scan25 (©IGN). On notera que la tuile du Scan25 présente un défaut au niveau du Verdon-sur-Mer. A cet endroit, on trouve un décalage de 15 pixels (45 m) en X et 9 (27 m) en Y (*Illustration 14*). Les points de contrôle utilisés pour valider l'orthorectification ont donc été éloignés de cette source d'erreur.

L'erreur moyenne de positionnement (RMS) pour l'ensemble de la scène n°0 est de 2,54 pixels, soit de 5,1 m environ, avec des extrema de 1,7 et 6,9 m. L'erreur moyenne est équivalente à l'erreur de positionnement mesurée pour la scène SPOT-5 d'août 2003 utilisée dans le cadre de l'étude de faisabilité (Pedreros *et al.*, 2005) et valide l'utilisation de l'imagerie FORMOSAT-2 de niveau 3 pour la cartographie des faciès littoraux. Cette erreur sera prise en compte lors de la validation des cartes extraites de l'imagerie FORMOSAT-2 : une zone tampon de 2 pixels sera définie autour des observations DGPS pour tenir compte de l'incertitude sur le géoréférencement.



Illustration 13 – Répartition spatiale des points de contrôles issus du Scan25 (© IGN) et utilisés pour la validation de l'orthorectification FORMOSAT-2

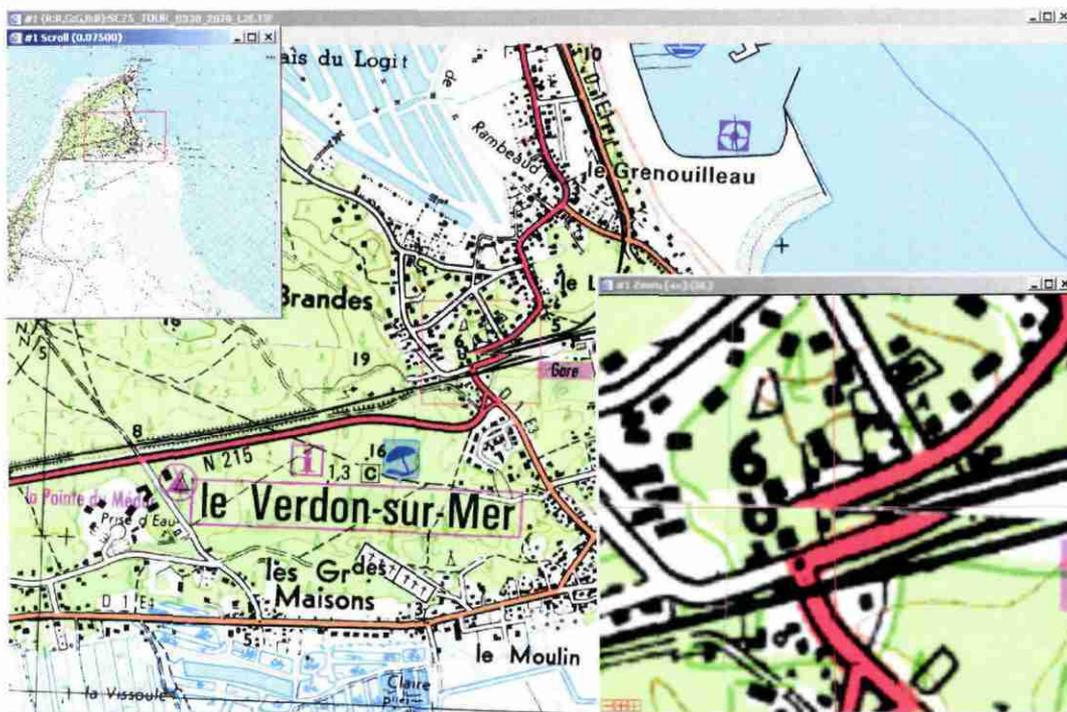


Illustration 14 – Détail du défaut du Scan25 (© IGN)

3.2. VARIABILITE DE LA RADIOMETRIE DE L'EAU, DE LA FORET ET DU SABLE

Nous avons comparé pour cette analyse les réflectances au sommet de l'atmosphère de l'eau profonde, de la forêt et de la dune blanche des scènes n° 0, 6 et 11. Les scènes 0 et 6 sont très différentes sur le plan radiométrique, particulièrement dans le cas de la dune blanche, mais également sur l'eau dans la bande 3 et sur la forêt dans les bandes 3 et 4 (*Illustration 15*). Cette analyse montre que les pixels de ces scènes ne pourront pas être classés à l'aide des mêmes ROIs.

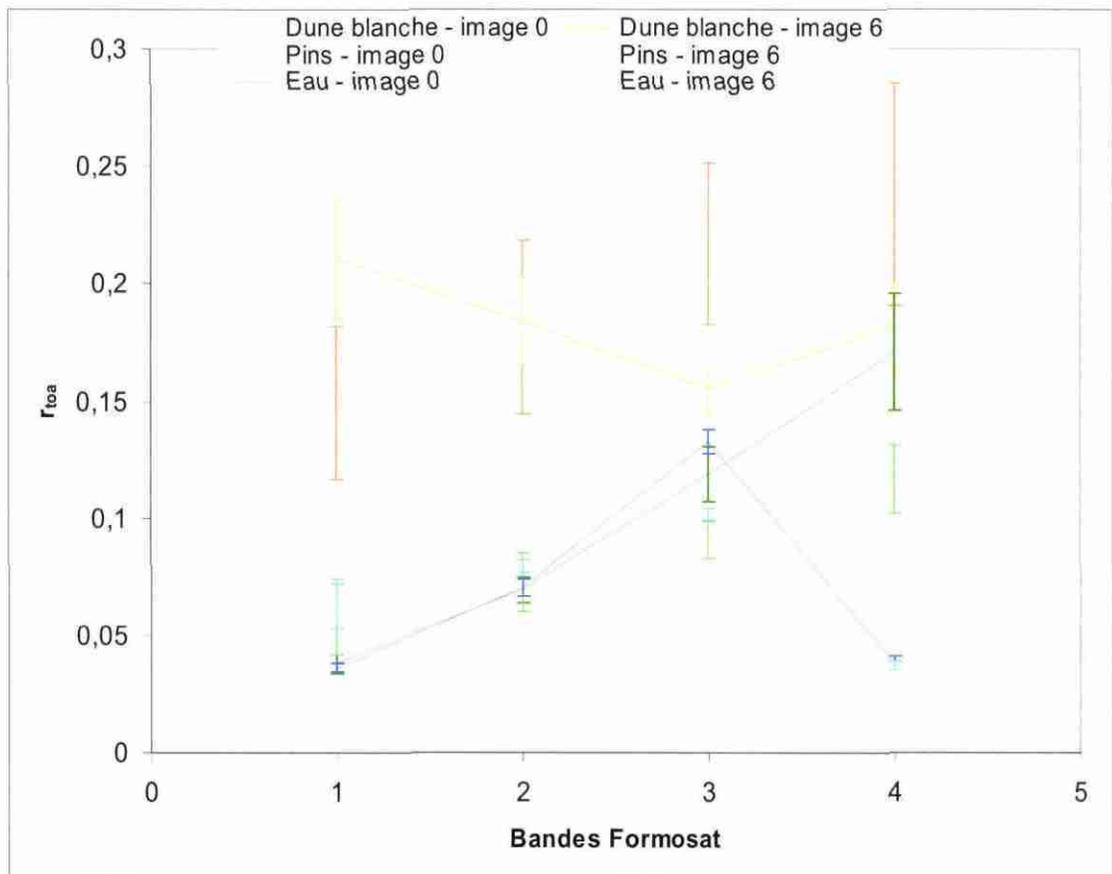


Illustration 15 – Comparaison des réflectances au sommet de l'atmosphère (r_{toa} , nombre sans dimension) de l'eau, de la forêt et de la dune blanche des scènes FORMOSAT-2 n°0 et 6

(Les barres verticales représentent l'écart-type autour de la moyenne)

Au contraire, les scènes 6 et 11 ont des radiométries proches (*Illustration 16*). Quelle que soit la surface considérée, la différence de réflectance entre les deux scènes est inférieure à la variabilité naturelle de la réflectance de la cible observée (exprimée par la barre d'erreur verticale qui représente l'écart type). Ceci confirme l'homogénéité de l'atmosphère entre ces deux scènes ainsi que l'homogénéité spectrale du faciès de dune blanche. Ces scènes peuvent donc être classées à l'aide d'un jeu de ROIs unique. En complément, la radiométrie de la dune blanche a été comparée pour les scènes 5 à 9 (*Illustration 17*). Seule la dune blanche sur la scène 7 (nous avons utilisé le transect pris au niveau de la Pointe d'Arcachon) présente une radiométrie significativement différente de celle des autres scènes. Comme le pied de dune est

l'indicateur du trait de côte, cette scène sera peut-être difficile à analyser simultanément aux autres. Pour les 4 autres scènes nous remarquons une grande proximité de la réflectance de la dune blanche dans la bande 3. Dans les autres bandes, les radiométries sont un peu plus élevées pour les scènes 8 et 9 (au sud) que pour les scènes 5 et 6. Toutefois, la dune blanche montre une importante variabilité spectrale et l'ensemble des radiométries pour les différentes scènes s'inscrivent dans cette variabilité.

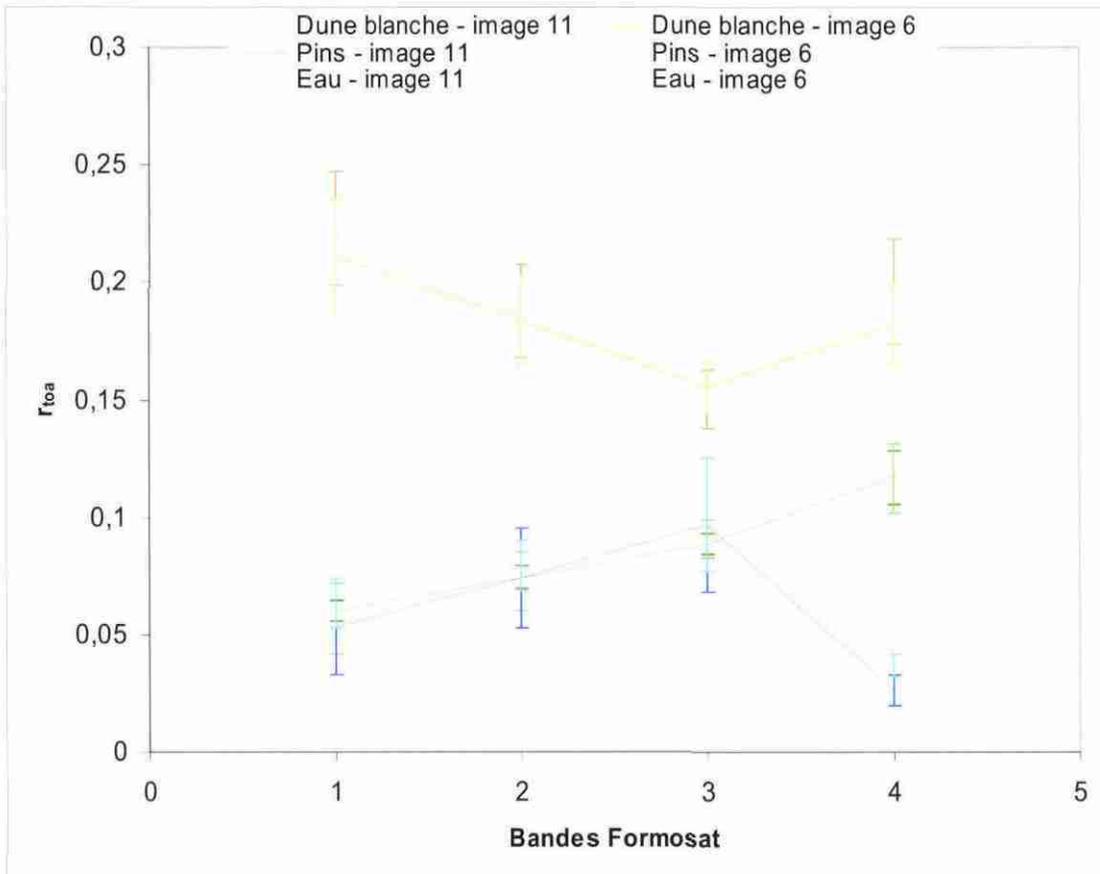


Illustration 16 – Comparaison des réflectances (r_{toa} , nombre sans dimension) au sommet de l'atmosphère de l'eau, de la forêt et de la dune blanche des scènes FORMOSAT-2 n°6 et 11

(Les barres verticales représentent l'écart-type autour de la moyenne)

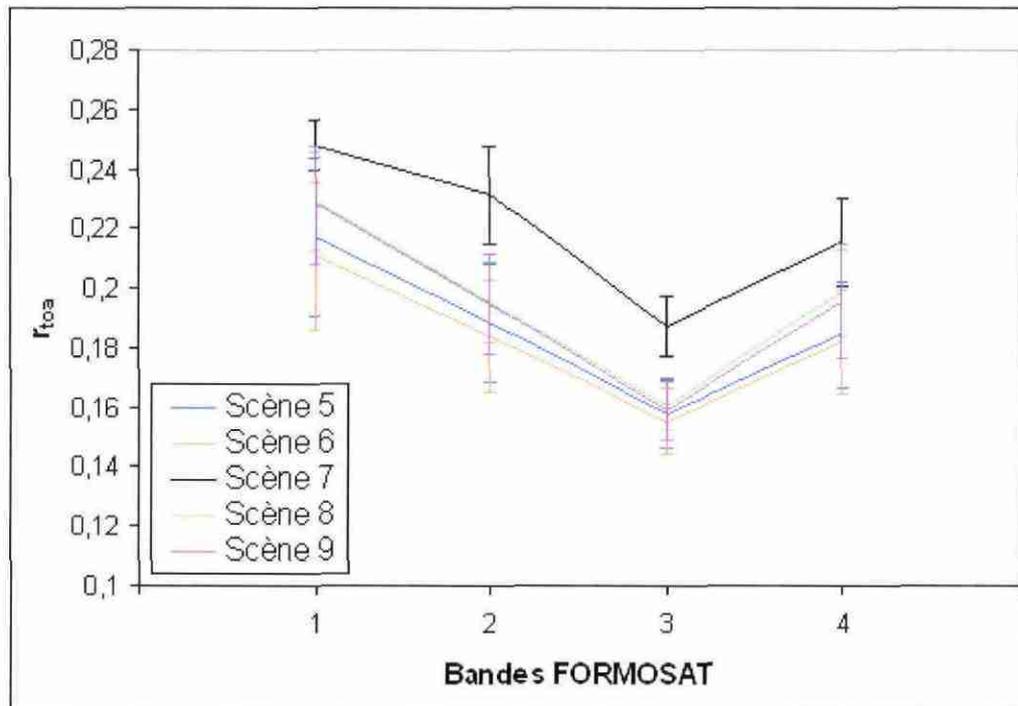


Illustration 17 – Comparaison des réflectances (r_{toa} , nombre sans dimension) au sommet de l'atmosphère de la dune blanche des scènes FORMOSAT-2 n°5 à 9

(Les barres verticales représentent l'écart-type autour de la moyenne)

3.3. MOSAÏQUAGE

Suite à cette analyse radiométrique, les scènes F2 ont été mosaïquées afin de pouvoir classer directement des entités géographiques plus vastes qu'une scène isolée. Cependant un traitement unique n'était pas possible du fait, d'une part, de l'acquisition des scènes sur deux jours, et d'autre part, des limites liées aux capacités de traitement informatique.

De plus, les tests montreront ultérieurement des difficultés à extrapoler sur la scène 0 (Soulac) les ROIs définies sur la zone nord. Cette scène sera donc classée séparément.

On aura pour l'ensemble du littoral aquitain 4 images (*Illustration 18*) correspondant :

- Au sud de la côte aquitaine : scènes 9 à 13 acquises le 27 août 2007 (de Saint-Girons-plage au nord, jusqu'à Biarritz).
- Au centre : scènes 5 à 8 acquises le 27 août 2007 (de Lacanau à Saint-Girons-plage).
- Au nord : scènes 1 à 3 acquises le 26 août 2007 (de Montalivet à Lacanau).

- Et enfin la scène 0 correspondant au littoral allant de la Pointe de Grave à Montalivet.

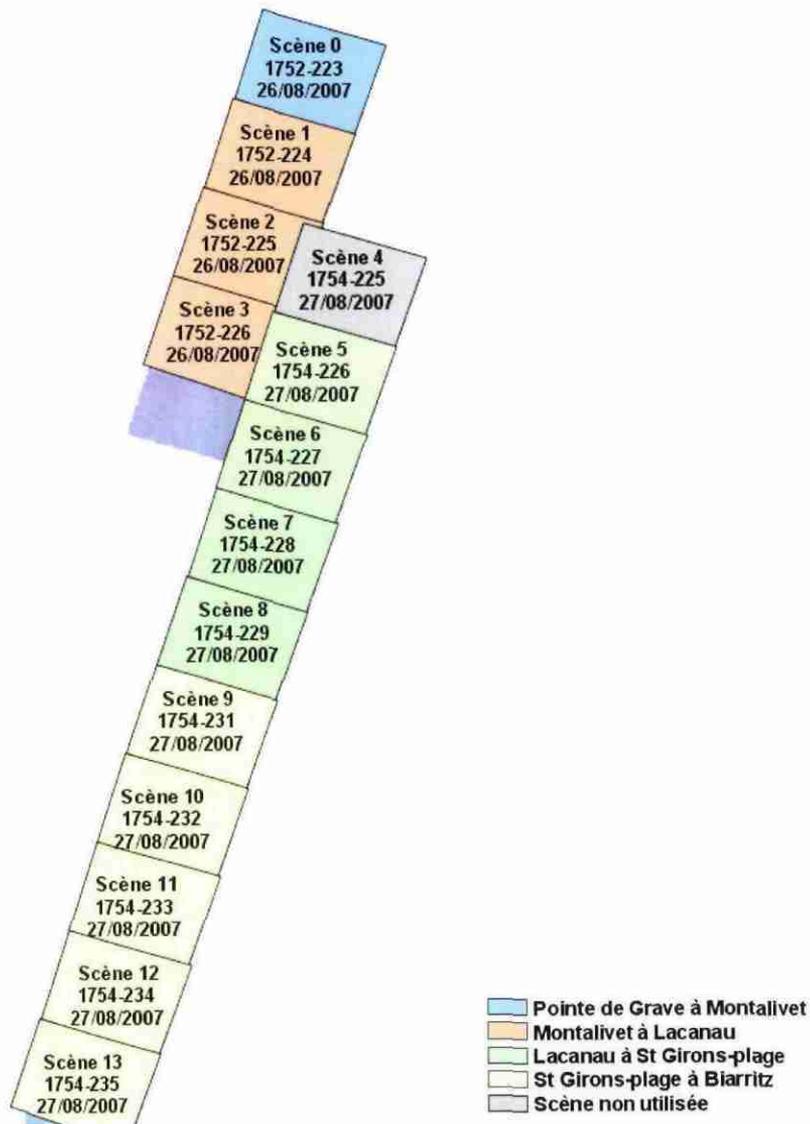


Illustration 18 – Mosaïquage des scènes FORMOSAT-2

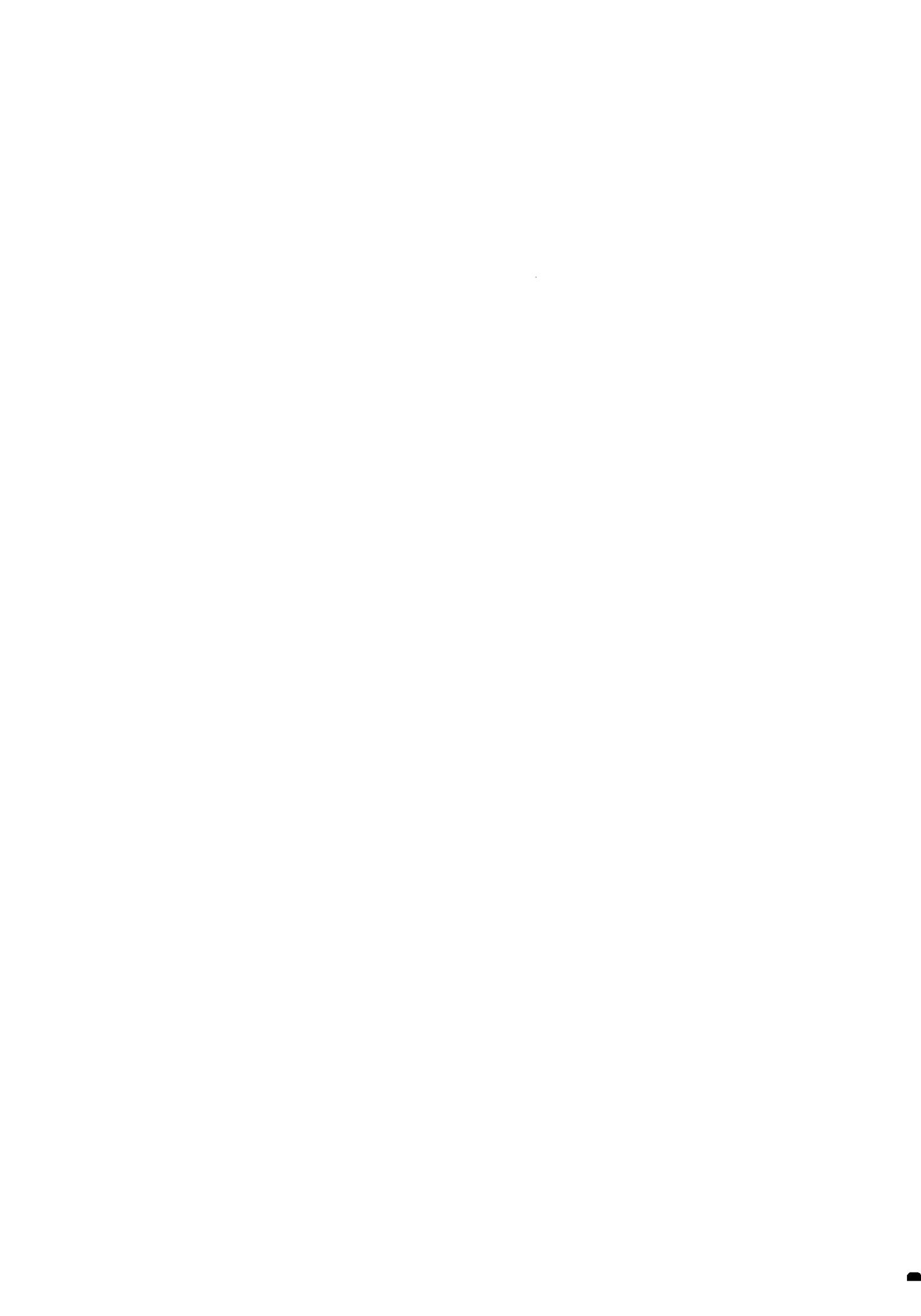
3.4. CONCLUSION

La comparaison de deux des scènes acquises le 26/08/07 et le 27/08/07 avec le Scan25 (© IGN) et des contours de blockhaus a permis de montrer que l'erreur moyenne de positionnement des pixels FORMOSAT-2 est de 5,1 m (2,54 pixels). La précision de l'imagerie FORMOSAT-2 est donc bien compatible avec la cartographie des indicateurs géomorphologiques du littoral, et en particulier à la délimitation du trait de côte.

L'étude de la variabilité de la radiométrie de l'eau, du couvert forestier et de la dune blanche sur les trois scènes 0, 6 et 11 a montré :

- que les scènes du 26/08 et du 27/08 ne peuvent pas être traitées ensemble : la réflectance au sommet de l'atmosphère de l'eau et de la forêt (présumée stable) est trop différente entre les deux jours d'acquisition ;
- la réflectance au sommet de l'atmosphère de l'eau et de la forêt des scènes 6 et 11 est au contraire très homogène, montrant donc la stabilité de l'atmosphère. De plus, la radiométrie de la dune blanche apparaît, elle aussi, très homogène. Cette continuité radiométrique a été démontrée à partir de l'analyse de la radiométrie de la dune blanche pour certains transects des scènes 5 à 9. A l'exception de la zone de la Pointe d'Arcachon (scène 7) qui présente des phases de progradation et de retrait à la fois rapides et marquées, le faciès de dune blanche a une radiométrie très cohérente, quoique relativement variable.

Ainsi ces tests montrent qu'il faut traiter séparément les scènes 0 à 3 d'une part (26 août), et 4 à 13 (27 août) d'autre part. Ils ne prouvent cependant pas qu'un seul jeu de ROIs permette de réaliser une classification précise pour l'ensemble des faciès, mais ils montrent que cette approche est envisageable.



4. Analyse des méthodologies de classification sur une scène test

4.1. DISCRIMINATION DES FACIÈS LITTORAUX

Dans cette partie de l'étude, différentes méthodes de discrimination des faciès littoraux sont analysées et comparées :

- méthode visuelle à partir des données terrain,
- méthode de classification non supervisée : KMeans et Recuit Simulé.

4.1.1. Caractérisation visuelle

Les faciès ont été délimités sur la scène F2 n°6, au niveau du transect TG 18, afin de générer des ROIs typiques de chaque faciès. Les contours correspondent aux pointages DGPS (*Illustration 19*). Plusieurs ROIs ont été générées pour un même faciès, lorsque celui-ci était le fruit d'un repérage de terrain discontinu.

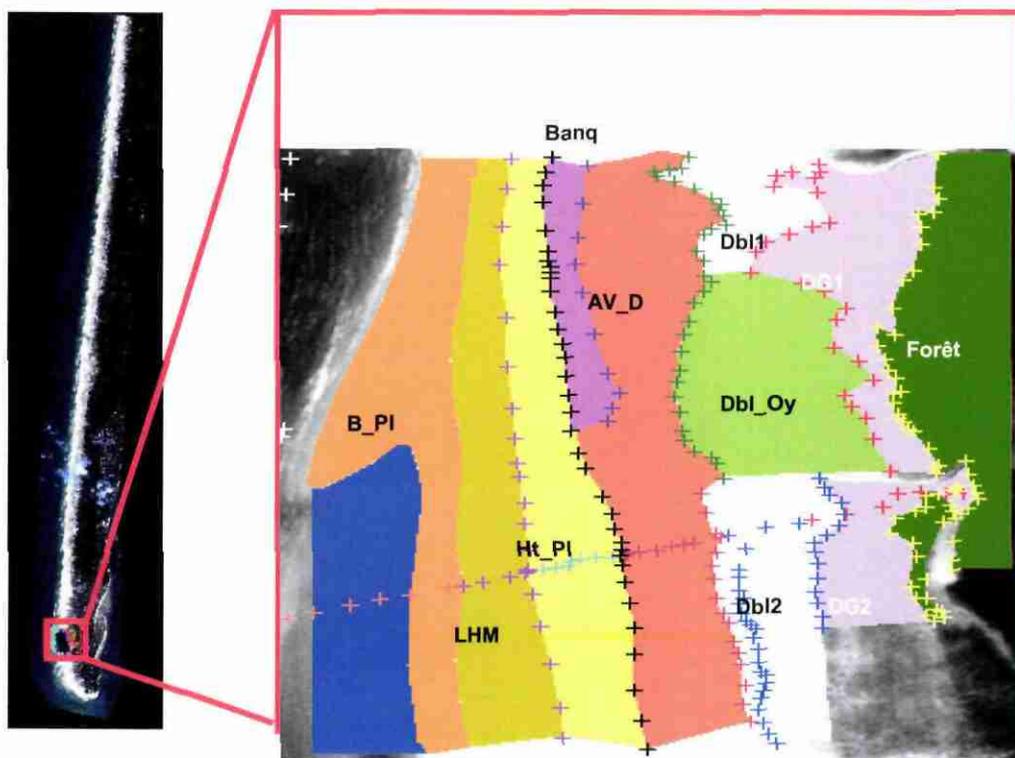


Illustration 19 – Pointages DGPS (croix) et ROIs délimitées à l'aide de ces contours.

Les abréviations représentent respectivement : DG, la dune grise, Dbl, la dune blanche, Oy, les oyats, Av_D, l'avant-dune, Banq, la banquette, Ht_PI, le haut de plage, LHM, la laisse de haute mer et B_PI, le bas de plage. Des chiffres d'incrémentation apparaissent lorsque plusieurs zones sont identifiées pour un même faciès.

La séparabilité spectrale des classes a été évaluée par les méthodes de Jeffries-Matusita et Transformed Divergence. Le résultat des tests est représenté par une valeur comprise entre 0 et 2. Plus la valeur est faible, plus les classes sont proches spectralement. La méthode de Transformed Divergence donne de meilleurs résultats, mais les deux valeurs sont bien corrélées. Nous montrons dans le tableau de l'illustration 20, le résultat de la comparaison des classes obtenue à l'aide de la méthode Transformed Divergence.

	Forêt	DG1	DG2	Dbl_Oy	Dbl1	Dbl2	Dbl3	Av_D	Banq	Ht_PI	LHM	B_PI	Eau
Forêt	-	1,99	1,97	1,99	1,99	1,99	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
DG1		-	0,49	1,50	1,45	1,16	1,42	1,97	1,99	2,00	2,00	1,99	1,99
DG2			-	1,89	1,80	1,70	1,80	1,99	2,00	2,00	2,00	1,99	2,00
Dbl_Oy				-	0,23	0,65	0,51	1,09	1,88	2,00	2,00	1,98	2,00
Dbl1					-	0,82	0,60	0,70	1,80	2,00	1,99	1,97	2,00
Dbl2						-	0,12	1,51	1,98	2,00	2,00	1,97	2,00
Dbl3							-	1,25	1,94	2,00	2,00	1,97	2,00
Av_D								-	0,71	1,99	1,99	1,85	2,00
Banq									-	1,76	1,89	1,94	2,00
Ht_PI										-	0,34	1,99	2,00
LHM											-	1,99	2,00
B_PI												-	1,99
Eau													-

Illustration 20 – Test de séparabilité spectrale des faciès définis par caractérisation visuelle par la méthode Transformed Divergence

(Les cellules grisées mettent en évidence les ROIs qui sont spectralement semblables, ou bien les moins bien dissociés – entre banquette et haut de plage, 1.76 indique que le niveau de dissociation est certes bon, mais qu'il est le plus faible comparé aux autres classes, entre 1.89 et 2-)

Ce test montre que l'eau et la forêt sont les deux seules surfaces qui sont clairement discriminées. Les ROIs DG1 et DG2 (dune grise) sont quasiment confondus, mais DG1 présente de fortes affinités spectrales avec les faciès de dune blanche. De même, les

faciès de dune blanche sont très proches de l'avant-dune ; quant à la laisse de haute mer, elle est confondue avec le faciès de haut de plage. Ces proximités spectrales s'expliquent par les diversités de couleur et de texture qui s'observent sur l'imagerie F2 notamment au sein du faciès d'avant-dune et de dune blanche, laquelle, par endroit, présente de fortes similitudes avec la dune grise (*Illustration 21*). Ces résultats montrent qu'il faut utiliser une méthode de définition des faciès plus objective que l'extraction visuelle basée sur les contours de terrain, comme, par exemple les classifications non supervisées qui tendent à séparer mathématiquement les classes les plus éloignées spectralement.

4.1.2. Méthode du KMEANS

La méthode du KMEANS initialisée en prenant le premier pixel comme centre de classe puis en sélectionnant les pixels les plus éloignés des précédents permet d'individualiser, au niveau du transect TG 18, 15 classes qui ont été labellisées à l'aide des observations de terrain (*Illustration 22*).

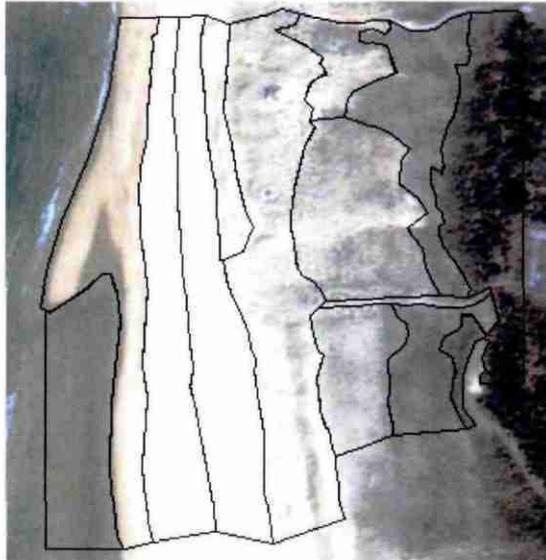


Illustration 21 – Superposition des contours de faciès obtenus à l'aide des levés DGPS (domaines colorisés à gauche) sur l'imagerie FORMOSAT-2 (contours noirs à droite)

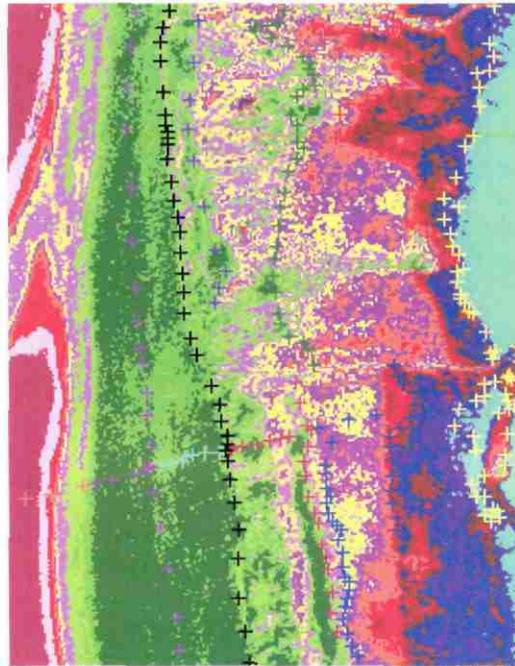


Illustration 22 – Classification des pixels au niveau du transect TG18 à l'aide de la méthode du KMEANS (les contours DGPS sont superposés à l'image classée)

La forêt (représentée en cyan et délimitée par des croix jaunes), ainsi que la partie orientale de la dune grise (bleu foncé et violet) sont bien discriminées. A l'interface entre dune grise et dune blanche se trouve une classe de couleur rouge représentée aussi dans la zone de bas de plage (croix orange). La majeure partie de la dune blanche est bien discriminée (magenta). En jaune et rose pâle, des pixels sont classés dans la dune blanche, l'avant-dune et le bas de plage. La laisse de haute mer et le haut de plage sont confondus spectralement. L'avant-dune, la banquette et le haut de plage présentent d'importantes similitudes (pixels de couleur vert clair), ce qui implique une identification difficile du trait de côte (croix noires). La labellisation des classes KMEANS nous a amené à définir 2 classes de forêt (correspondant aux coloris bleu clair), 3 classes de dune grise (bleu, violet, brun), deux classes de dune blanche (magenta, jaune), qui recourent l'avant-dune et la banquette, 3 classes de haute plage (coloris verts), 4 classes de bas de plage (dont une zone de sable sous l'eau, rose clair, et une zone de sable très humide, rouge), et finalement une classe eau. Le test de séparabilité de ces classes offre des résultats simples : les zones de dunes grises sont indissociables entre elles, ainsi que celles de forêt, de dune blanche, de haute plage et de basse plage. On note que l'une des classes de dune blanche est proche spectralement d'une des classes de basse plage. Les zones semblables ont été compilées ; nous obtenons donc une classe « forêt », une « dune grise », une « dune blanche », un « haut de plage », un « bas de plage », une classe « sable très humide », une classe « sable sous l'eau » et une classe « eau ». Cet agencement logique et spectralement fiable montre une faiblesse : il ne permet pas la discrimination du trait de côte (Illustration 23) car la zone de haut de plage intègre l'avant-dune et la banquette.

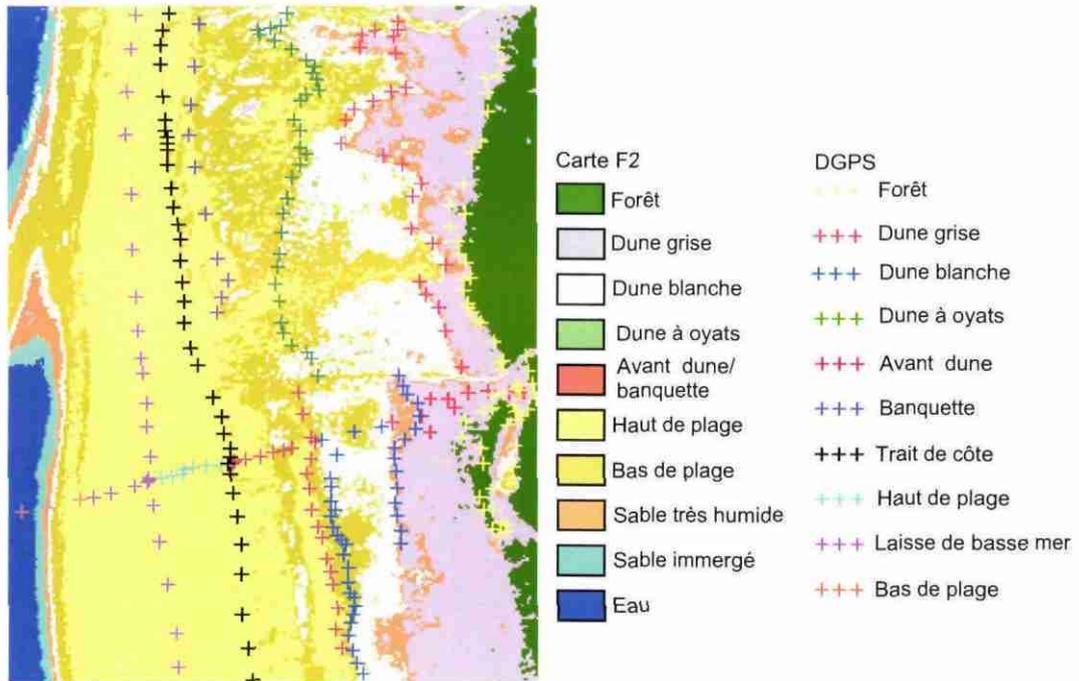


Illustration 23 – Classes obtenues par la méthode du KMEANS et compilées après le test de séparabilité

En outre, la dune blanche et le bas de plage sont en partie confondus, même si la dune blanche paraît en partie correctement cartographiée (bordée de croix bleues au sud, de croix vertes à l'ouest et rouges à l'est dans sa partie nord). La forêt et la dune grise sont, elles, bien discriminées et cartographiées.

4.1.3. Méthode du recuit simulé

La méthode du recuit simulé ne permet pas de calculer des classes sur la totalité de la zone exploitée avec la méthode du KMEANS, les temps de calcul sont trop importants. Nous avons donc sélectionné quatre zones de petite taille qui recourent les différents faciès littoraux (Illustration 24).

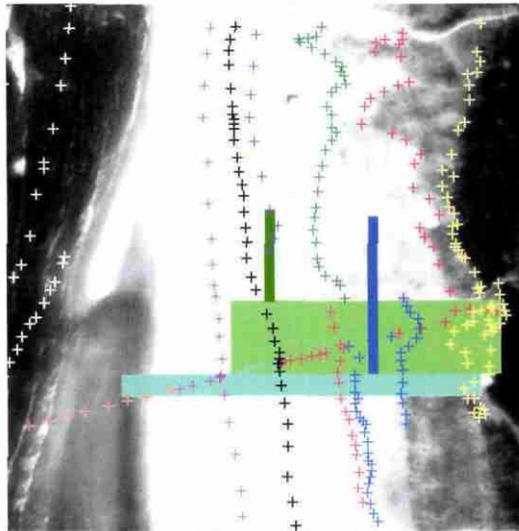


Illustration 24— Imagettes utilisées pour identifier les faciès littoraux par la méthode du recuit simulé

Pour chacune de ces zones, nous avons imposé à l'algorithme un nombre de classes variant de 8 à 15, puis nous avons comparé les classes obtenues avec la méthode « Transverse Divergence ». Ces deux étapes ont permis d'identifier plusieurs classes de « forêt », « dune grise », « dune blanche », « dune à oyats », « haut de plage » et « bas de plage ». Nous avons également identifié une classe « sable très humide », « sable sous l'eau » et « eau ». La banquette et l'avant-dune sont confondues radiométriquement avec la dune blanche. Enfin, une classe de « dune blanche » recoupe des zones caractérisées sur le terrain comme « bas de plage » et « dune blanche ». Nous avons donc scindé cette classe en deux, en fonction des observations de terrain. Le test de séparabilité effectué sur ces deux entités montre qu'elles peuvent être utilisées de façon indépendante. Nous avons donc utilisé ces deux ROIs redessinées, au lieu de la région originale définie par recuit simulé. Finalement nous avons obtenu 15 ROIs caractéristiques de : la forêt (2 ROIs), la dune grise (3 ROIs), la dune blanche (3 ROIs), la dune à oyats (1 ROI), le haut de plage (2 ROIs), le bas de plage (1 ROI), du sable très humide (1 ROI), du sable sous l'eau (1 ROI) et de l'eau (1 ROI). Cet agencement est proche des observations de terrain et met en évidence, au moins partiellement, le trait de côte (Illustration 25).

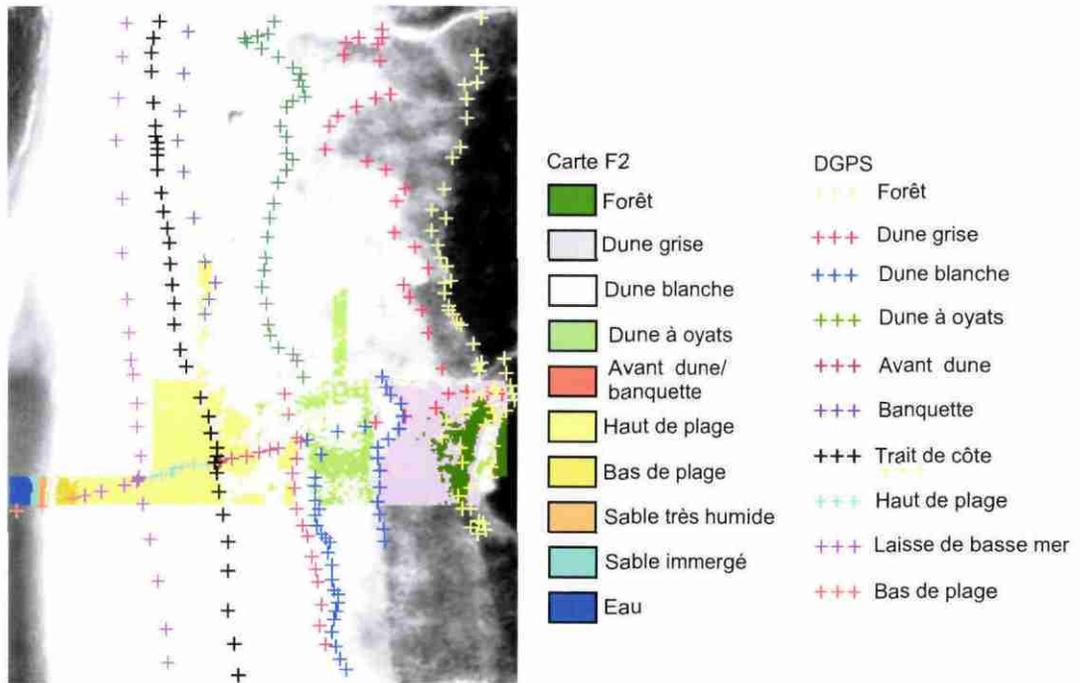


Illustration 25 – ROIs obtenus à partir des classes issues du recuit simulé

4.2. TEST DES DIFFERENTS JEUX DE ROIS POUR LA CLASSIFICATION SUPERVISEE DE LA SCENE 6

La scène 6 présente 2 transects 2D (i.e. développés à la fois parallèlement et transversalement par rapport à l'étagement des faciès), les transects TG 15 et TG 18, et 3 transects 1D (15.1, 16 et 17), qui traversent l'ensemble des faciès littoraux. Les deux illustrations suivantes (24 et 25) montrent le résultat de la classification supervisée (par la méthode de Mahalanobis) de la scène 6 au niveau des transects TG 18 et TG 15. Chacune de ces illustrations montre le résultat de la classification pour chacun de trois jeux de ROIs d'entraînement : les ROIs « Visuel », les ROIs « KMEANS » et les ROIs « Recuit ». Les pointages DGPS sont superposés à ces cartes.

En ce qui concerne le transect TG 18 (Illustration 26), toutes les méthodes permettent de discriminer relativement précisément la forêt, la dune grise, la dune blanche et le bas de plage. En revanche, seuls les ROIs « Visuel » et « Recuit » parviennent à mettre en évidence le trait de côte. En effet, le haut de la plage et l'avant-dune ne sont pas suffisamment discriminés avec les ROIs « KMEANS » pour identifier la limite entre ces deux faciès. Dans le cas des ROIs « Recuit », on note que la dune à oyats et la dune blanche, qui semblent bien distinctes sur le terrain, sont plus complexes à

décorrélés spectralement. Pourtant la végétation influence largement les radiométries, en particulier dans le rouge et le proche infrarouge. Il est probable qu'à certains endroits la dune blanche soit partiellement couverte de végétaux (oyats ou autres espèces) ce qui expliquerait que des pixels « dune à oyats » se retrouvent dans la dune blanche.

Le transect TG 15 (*Illustration 27*), classé à partir des ROIs définis au niveau du transect TG 18, donne, dans l'ensemble, une cartographie des faciès un peu moins correcte que dans le cas précédent. Si la carte basée sur les ROIs « KMEANS » présente les mêmes défauts pour les transect TG 15, on remarque, en outre, que la dune grise est moins bien discriminée. Ce défaut se retrouve sur les deux autres cartes.

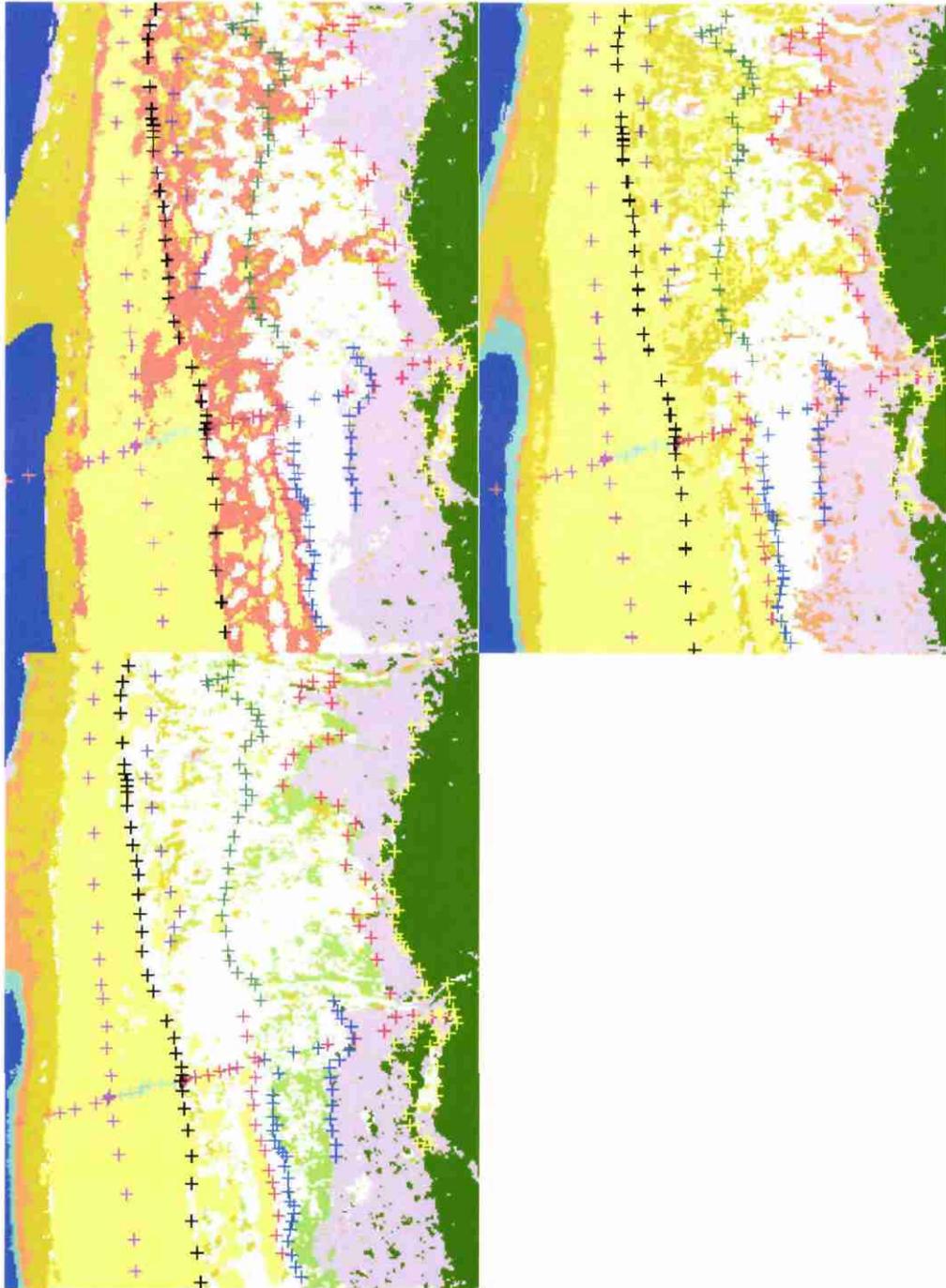


Illustration 26 – Classification supervisée au niveau du transect TG 18 pour les parcelles d'entraînement « Visuel » (en haut à gauche), et non supervisée « KMEANS » (en haut à droite) et « Recuit » (en bas).

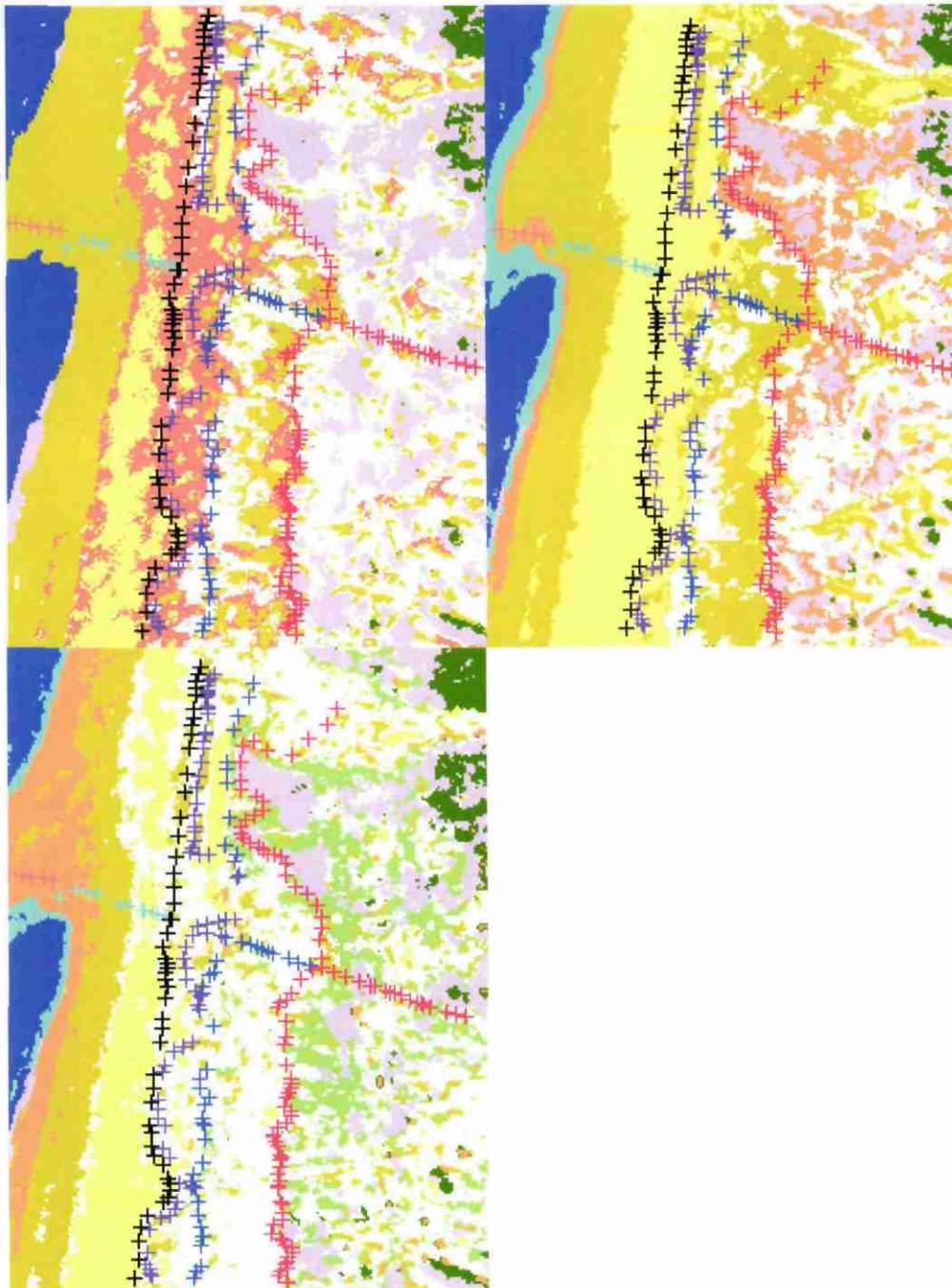


Illustration 27 – Classification supervisée au niveau du transect TG 15 pour les parcelles d’entraînement « Visuel » (en haut à gauche), et non supervisée « KMEANS » (en haut à droite) et « Recuit » (en bas).

Dans le cas de la carte générée à partir des ROIs « Visuel », de nombreux pixels classés « dune blanche » se retrouvent dans la dune grise. Dans le cas de la carte obtenue à l’aide des ROIs « Recuit », ce sont en très grande majorité des pixels classés « dune à oyats » qui sont intégrés à la dune grise, ce qui tend à montrer que la

dune grise est peut-être en partie végétalisée au niveau de ce transect et que les pixels présentant un mélange dune-végétation sont classés comme les pixels « dune à oyats ». Nous ne disposons pas d'observations de terrain permettant de confirmer cette hypothèse. Nous remarquons également sur cette *Illustration 27* que la dune blanche intègre de très nombreux pixels classés « bas de plage » dans le cas de l'entraînement par les ROIs « Visuel ». Les parcelles obtenues par le recuit simulé permettent une meilleure discrimination de la dune blanche. Enfin, le trait de côte reste correctement positionné dans la partie sud à partir des ROIs « Recuit » et « Visuel ». Il apparaît trop à l'ouest dans la partie nord.

Les tableaux des *Illustration 28*, *Illustration 29* et *Illustration 30* synthétisent l'analyse de validation exécutée pour la scène 6 à l'aide des transects TG 15 à TG 18 pour les trois méthodes « Visuel », « KMEANS » et « Recuit ». Les pixels « Eau » ne sont pas comptabilisés dans l'analyse. Pour la méthode « Visuel » (*Illustration 28*), les classes « avant-dune » et « banquette » ont été concaténées. Pour la méthode « Visuel », les classes « avant-dune », « banquette » et « haut de plage » ont été fusionnées. Enfin, pour la méthode « Recuit », les classes « avant-dune », « banquette » et « dune blanche » ont été rassemblées. Les pixels classés « eau » ne sont pas pris en compte dans le calcul de la précision.

A titre d'exemple, sur les 24 points de « Dune Blanche observés sur le terrain, 21 sont bien cartographiées, et 3 sont cartés en « Avant-dune »

Observations de terrain										
Classes	F	DG	Dbl	Av_D	Banq	Ht_PI	B_PI	Total	Précision utilisateur (%)	
F	0	1						1		
DG		23				2		25	92,00	
Dbl		12	21		4	12		49	42,86	
Pixels cartographiés			3	8	4	11		26	46,15	
Ht_PI						16		16	100,00	
B_PI				1		17	10	28	35,71	
Eau						1	7			
Total	0	37	24	8	8	58	10	145		
Précision procédure (%)	NA	62,16	87,50	75,00		27,59	100			
				Bien classés	Total	Précision (%)				
Limite de la forêt				47	62	75,81				
Limite dune grise / dune blanche				18	39	46,15				
Limite dune blanche / avant-dune				36	60	60,00				
Trait de Côte				39	88	44,32				
Bilan										

Nb. total de pixels bien classés	222
Nb. total d'observations	394
Précision globale (%)	56,35

Illustration 28 – Précision de la classification de la scène 6, à partir des ROIs définies visuellement

(les cellules en grisé représentent les pixels d'une classe X correctement classés). La classe F représente la forêt, DG la dune grise, Dbl, la dune blanche, Av_D, l'avant-dune, Banq., la banquette, Ht_PI, la haute plage et B_PI, le bas de plage

Observations de terrain											
	Classe	F	DG	Dbl	Av_D	Banq	Ht_PI	B_PI	Total	Précision utilisateur (%)	
Pixels cartographiés	F	0							0	NA	
	DG		16	1					17	94,12	
	Dbl		16	16	1	3			36	44,44	
	Ht_PI		1	1	7	4	45	1	59	94,92	
	B_PI		4	6			1	14	8	33	24,24
	Eau								8		
Total		0	37	24	8	8	59	9	145		
Précision procédure (%)		NA	43,24	66,67		74,67		88,89			

	Bien classés	Total	Précision (%)
Limite de la forêt	45	62	72,58
Limite dune grise / dune blanche	8	39	20,51
Limite dune blanche / avant-dune	22	60	36,67
Trait de Côte	12	88	13,64

Bilan	
Nb. total de pixels bien classés	183
Nb. total d'observations	394
Précision globale (%)	46,45

Illustration 29 – Précision de la classification de la scène 6, à partir des ROIs définies par la méthode KMEANS

(les cellules en grisé représentent les pixels d'une classe X correctement classés). La classe F représente la forêt, DG la dune grise, Dbl, la dune blanche, Av_D, l'avant-dune, Banq., la banquette, Ht_PI, la haute plage et B_PI, le bas de plage

Ces résultats montrent que la méthode du recuit simulé permet une meilleure discrimination des surfaces en fonction de leur spectroradiométrie, et donc, les ROIs définies à partir de la classification optimisée permettent d'obtenir des cartes faciologiques et un positionnement du trait de côte plus précis (*Illustration 30*). La méthode visuelle obtient un score un peu moins élevé (*Illustration 28*), tant au niveau de la détermination des faciès que pour le positionnement du trait de côte. En revanche, elle permet de cartographier l'avant-dune, qui se trouve confondue avec la dune blanche dans le cas du recuit simulé. Les ROIs obtenues par la méthode du KMEANS donnent une carte dont les résultats de la validation sont très faibles (*Illustration 29*).

Si les classes « bas de plage » et « haut de plage » sont regroupées pour former une classe « plage » unique et si les classes « dune grise », « dune blanche » et « avant-dune » sont regroupées dans une classe « dune », les scores obtenus durant la phase de validation passent de 56,35% à 65,48% et de 63,96% à 76,95 % pour la méthode « Visuel » et la méthode « Recuit », respectivement. Ces regroupements augmentent donc de façon significative la fiabilité des cartes.

Observations de terrain										
	Classe	F	DG	Dbl	Av_D	Banq	Ht_PI	B_PI	Total	Précision utilisateur (%)
Pixels cartographiés	F	0	1						1	NA
	DG		17	2					19	89,47
	Dbl		19	21	6	7	5	1	59	57,63
	Ht_PI				1	1	31		33	93,94
	B_PI			1	1		23	8	33	24,24
	Eau							8		
Total		0	37	24	8	8	59	9	145	
Précision procédure (%)		NA	45,95		85,00		52,24	88,89		

	Bien classés	Total	Précision (%)
Limite de la forêt	51	62	82,26
Limite dune grise / dune blanche	15	39	38,46
Trait de Côte	57	88	64,77

Bilan	
Nb. total de pixels bien classés	213
Nb. total d'observations	394
Précision globale (%)	63,96

Illustration 30– Précision de la classification de la scène 6, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé)

(les cellules en grisé représentent les pixels d'une classe X correctement classés). La classe F représente la forêt, DG la dune grise, Dbl, la dune blanche, Av_D, l'avant-dune, Banq., la banquette, Ht_Pl, la haute plage et B_Pl, le bas de plage

4.3. EXTRACTION DU TRAIT DE COTE PAR LE FILTRE DE SOBEL

Le filtre de Sobel appliqué à la bande 2 des scènes FORMOSAT-2 brutes permet une mise évidence encore plus nette du trait de côte. Si le résultat paraît difficile à interpréter étant donné le grand nombre d'informations liées à la variabilité spectrale et texturale des faciès littoraux, le trait de côte est repérable car il sépare la bordure orientale d'une zone large très stable, le haut de plage, de la bordure occidentale d'une zone à la morphologie plus complexe, également composée de faciès variés que constitue la zone dunaire (y compris l'avant-dune et la banquette)

L'*Illustration 31* montre un zoom de la superposition de la bande 2 filtrée avec les observations DGPS (en rouge) au nord (à gauche) et au sud (à droite) de la scène 6.. Le trait de côte que l'on peut ainsi extraire de la bande 2 filtrée est validé par 64,77 % des points DGPS, i.e. le même score qu'à partir de la carte faciologique établie à l'aide des ROIs définies par la méthode du recuit simulé.

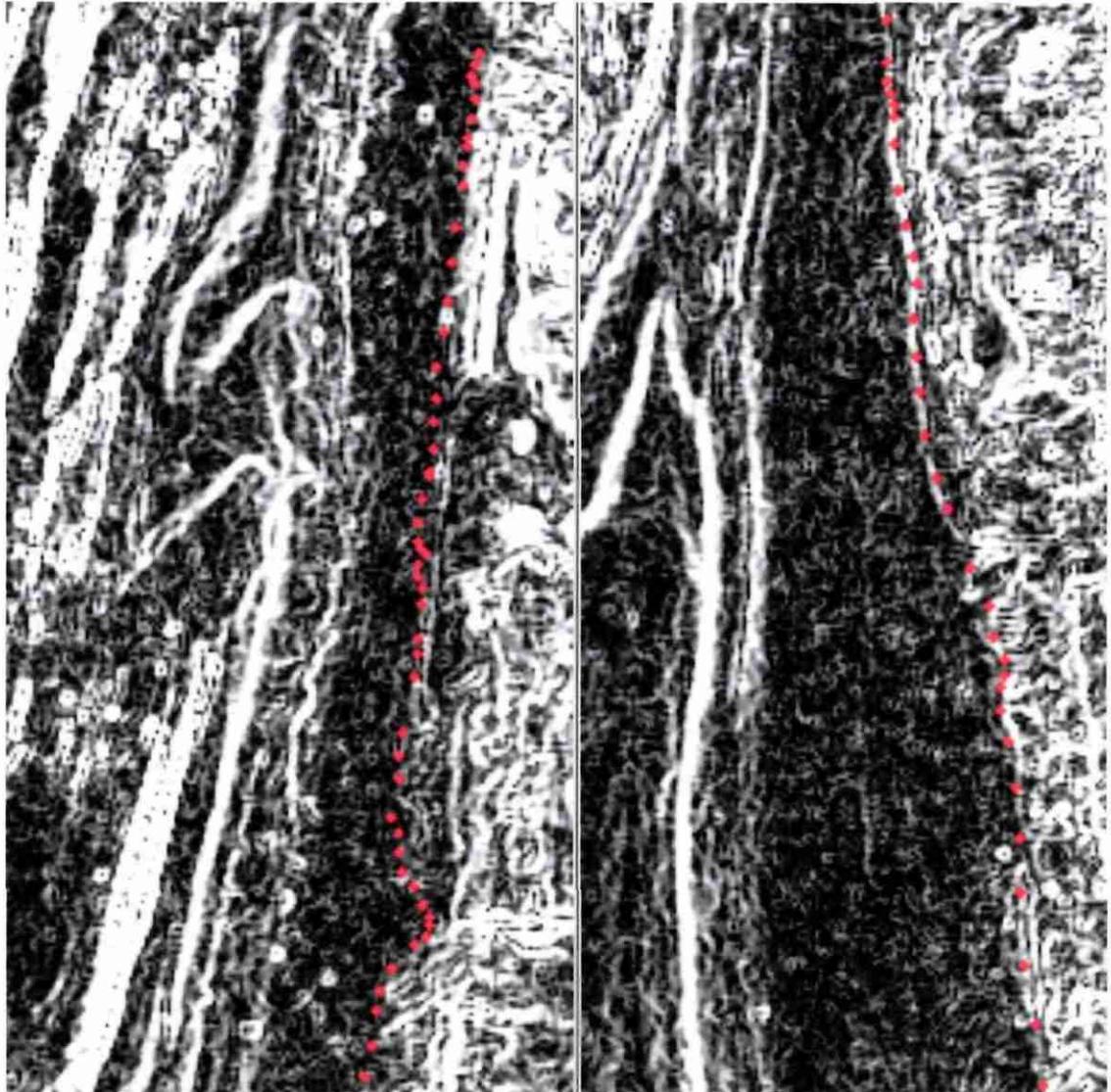


Illustration 31 – Zooms de la bande 2 filtrée à l'aide de l'algorithme de Sobel de la scène 6, au niveau des transects TG 15 (à gauche) et TG 18 (à droite) (superposition du trait de côte observé - DGPS)

Le filtre de Sobel sur le canal Vert de FORMOSAT-2 apparaît donc comme une aide supplémentaire à l'interprétation du trait de côte, sur des secteurs pour lesquels la classification apporte des résultats moins précis. Il sera donc utilisé en complément de la méthodologie globale basée sur la classification.

4.4. CONCLUSION

Plusieurs méthodes ont été testées sur la scène 6 (Cap Ferret) afin de définir des classes d'entraînement : une détermination visuelle comme préalable à une classification supervisée (Mahalanobis), une méthode de classification non supervisée

non optimisée (KMEANS) et une méthode de classification non supervisée optimisée (recuit simulé).

Ce sont les ROIs définies à l'aide du recuit simulé qui permettent d'atteindre les meilleurs scores lorsqu'elles sont utilisées comme parcelles d'entraînement. Ces parcelles, au nombre de 15, définissent l'eau, le sable très humide, le bas de plage, la haute plage, plusieurs classes de dune blanche (qui ne portent pas de labels plus précis, faute d'informations *in situ* plus fines comme par exemple des mesures de densité de végétation), plusieurs classes de dune grise (même commentaire) et la forêt. L'avant-dune et la banquette sont très proches radiométriquement de la dune blanche et ne peuvent être discriminées.

La précision globale de la classification est en moyenne de 63,96% pour 394 observations. Les plus grandes difficultés rencontrées proviennent de la discrimination entre la dune blanche et la dune grise qui ont des radiométries parfois très proches. Cet écueil provient probablement d'une difficulté accrue à discriminer des sables partiellement couverts de végétation, de façon inhomogène.

Si les classes « bas de plage » et « haut de plage » sont regroupées pour former une classe « plage » unique et si les classes « dune grise », « dune blanche » et « avant-dune » sont regroupées dans une classe « dune », les scores obtenus durant la phase de validation passent de 63,96% à 76,95 % pour la méthode « Recuit ». Ces regroupements augmentent donc de façon significative la fiabilité des cartes.

Si le trait de côte est défini comme la limite entre la haute plage et la dune blanche (label qui inclut la banquette et l'avant-dune), près de 65% des mesures du trait de côte réalisées au DGPS coïncident à cette limite de faciès, sur la carte satellite. Comme le trait de côte sépare deux faciès de radiométrie (et peut-être de texture) très différentes nous avons testé le filtre de Sobel, un extracteur de contour performant pour séparer les milieux de texture et de radiométrie distinctes. Le filtre met en évidence plusieurs contours parallèles au littoral depuis la limite du plan d'eau, jusqu'à la limite de la forêt. Parmi ces limites, le trait de côte est très marqué, car il borde à l'est une zone de radiométrie et texture parfaitement stable : le haut de plage. Pour la scène 6, le trait de côte Sobel est validé par le même score que celui défini à partir de la limite de faciès.

L'enchaînement des différentes tâches reproduit sur l'*Illustration 32* va donc être appliqué aux quatre secteurs mosaïqués couvrant le littoral aquitain. La classification des différents faciès recherchés s'appuie sur une classification non supervisée avec définition de ROIs basée sur la méthode du recuit simulé. L'utilisation du filtre de Sobel permettra d'atteindre une meilleure précision pour la cartographie du trait de côte.

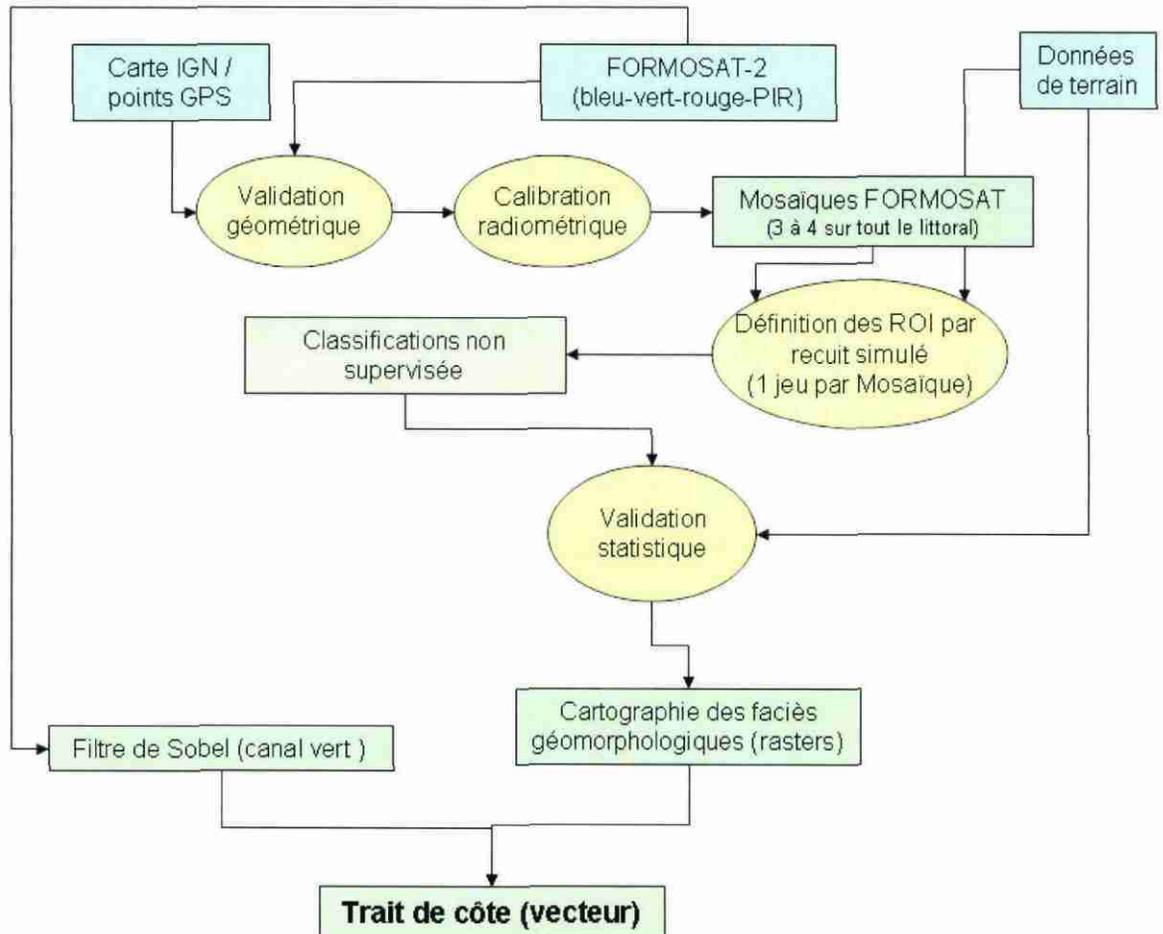


Illustration 32 – Chaîne de traitement proposée



5. Extrapolation de la classification à tout le littoral

Les ROIs définies à l'aide de la classification optimisée ont été appliquées à l'ensemble des scènes acquises les 26/08/2007 et 27/08/2007, agencées sous forme de mosaïques (*Illustration 18*). Ainsi, nous avons appliqué les ROIs générées à partir de la scène 6 à la mosaïque constituée des scènes 5 à 8 (mosaïque centre), puis nous avons généré, par classification optimisée, de nouveaux ROIs adaptés aux scènes 9 à 13 (mosaïque sud), 1 à 3 (mosaïque nord, 26/08/2007), et enfin un dernier pour la scène 0 (zone Soulac).

5.1. RESULTATS DE LA CLASSIFICATION POUR LA MOSAÏQUE CENTRE

La validation de la carte extraite de la mosaïque centre est présentée dans les tableaux de l'*Illustration 33*. Au total, 725 pointages DGPS (521 caractérisant des faciès et 204 des contours) répartis le long de 23 transects ont été utilisés pour valider cette mosaïque. Les pixels classés « eau » ne sont pas pris en compte pour le calcul de la précision de la classification.

La précision de la classification de la mosaïque centre est sensiblement plus élevée que celle de la scène 6, classée individuellement. Un peu moins de 67% des pixels sont bien classés. Les meilleurs scores étant atteints pour la forêt (plus de 82% des points formant la limite de la forêt étant correctement positionnés), l'ensemble formé par la dune blanche, l'avant-dune et la banquette, la haute plage et le bas de plage. La dune grise est cartographiée moins précisément. Nous savons toutefois que la dune grise est un espace composite. En de nombreux secteurs, des pixels situés dans la dune grise ont des caractéristiques radiométriques très proches de la dune blanche à oyats. Nous n'avons pas généré de classe spécifique pour la dune végétalisée par les oyats, car nous ne disposons pas de vérité terrain.

Si nous regroupons les classes de dune, d'une part, et les classes de plage, d'autre part, la précision de la carte extraite de la mosaïque centre passe à 81,4 %. L'utilisation du filtre de Sobel pour caractériser le trait de côte permet d'augmenter légèrement ce résultat. Dans ce cas, lorsque 5 classes de faciès et 3 limites (forêt/dune grise, dune blanche/dune grise, trait de côte) sont considérées, les observations valident les cartes à 69,79%. Lorsque seules la forêt, la dune, la plage et les trois limites sont considérées, 84,11% des pixels sont bien classés.

Sans le filtre de Sobel, un peu plus de 60% des points DGPS du trait de côte sont positionnés à l'interface entre les faciès de haute plage et de dune. Avec le filtre de Sobel, ce sont près de 82% de ces mêmes observations qui sont positionnées à la limite orientale de la zone de haut de plage, clairement identifiable sur l'image filtrée.

Observations de terrain										
	Classe	F	DG	Dbl	Av_D	Banq	Ht_PI	B_PI	Total	Précision utilisateur (%)
Pixels cartographiés	Forêt	2	1						3	66,67
	Dune grise		41	5					46	89,13
	Dune blanche		51	140	6	24	7	1	229	61,14
	Haut plage		5	21	1	11	79	7	124	63,71
	Bas plage		1	10	1	1	42	64	119	53,78
	Eau						2	59		
Total		2	99	176	8	36	128	72	521	
Précision procédure (%)		100	41,4	77,3	61,7	88,9			521	

	Bien classés	Total	Précision (%)
Limite de la forêt	51	62	82,3
Limite dune grise / dune blanche	15	39	38,5
Trait de Côte	62	103	60,2

Bilan	
Nb. total de pixels bien classés	484
Nb. total d'observations	725
Précision globale (%)	66,8

Illustration 33 – Précision de la classification de la mosaïque centre, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé).

(les cellules en grisé représentent les pixels d'une classe X correctement classés). La classe F représente la forêt, DG la dune grise, Dbl, la dune blanche, Av_D, l'avant-dune, Banq., la banquette, Ht_PI, la haute plage et B_PI, le bas de plage

5.2. RESULTATS DE LA CLASSIFICATION POUR LA MOSAIQUE SUD

Les ROIs utilisées pour cette classification ont été générées à partir de zones classées à l'aide de la méthode du recuit simulé. Pour intégrer les variabilités spectrales des faciès de dune grise et dune blanche, 20 classes initiales ont été générées à partir de 3 zones centrées sur les transects TL 9, TL 15 et TL 18. Cette fois, les zones d'avant-dune et de banquette ne sont pas cartographiées : elles n'ont pas été repérées sur le terrain.

La comparaison entre la carte F2 et les observations de terrain pour la mosaïque constituée des scènes 10 à 12 soulignent, une fois encore, la difficulté à cartographier avec précision la zone de dune grise, fréquemment interprétée comme de la dune blanche mais également en plusieurs occasions comme de la forêt (tableaux de

l'illustration 34). Ces dernières confusions sont pourtant surprenantes si l'on considère l'excellente discrimination de la forêt (100 % des DGPS « Forêt » entrent dans la classe « forêt », quand plus de 82% des DGPS formant la limite de la forêt sont positionnés à moins de 2 pixels du bord de la forêt sur la carte F2). Elles proviennent peut-être de points DGPS saisis sur la dune grise et sous le couvert d'arbres. Néanmoins, la qualité de la classification est correcte : sur les 144 points de contrôle intra-faciès, 114 sont bien classés. De plus, 9 des 14 mesures du trait de côte effectuées au DGPS sont correctement positionnés. La précision globale de la carte extraite de l'imagerie F2 est donc, pour la mosaïque sud, de 77,85 %. Le filtre de Sobel est moins performant que pour la mosaïque centre. Il ne permet le positionnement que de 7 observations sur 14. Si l'on utilise ce filtre, la validité de la carte passe à 76,58 %. Cette différence peut être attribuée à une morphologie de plage différente en allant vers la côte basque. Les plages du sud des Landes sont en effet plus étroites et pentues que celles du nord, ceci est en partie dû aux apports de sédiment et à la granularité qui sont tous deux plus importants vers le sud.

Observations de terrain								
	Classe	F	DG	Dbl	Ht_PI	B_PI	Total	Précision utilisateur (%)
Pixels cartographiés	Forêt	1	4	4			9	11,1
	Dune grise		16	4			18	77,8
	Dune blanche		6	66	6		78	84,6
	Haut plage			1	28	5	29	96,5
	Bas plage				5	28	10	100,0
	Eau				4	5		
Total		1	24	75	39	5	144	
Précision procédure (%)		100	58,3	88,0	71,8	100,00		

Bilan	
Nb. total de pixels bien classés	123
Nb. total d'observations	158
Précision globale (%)	77,85

Illustration 34 – Précision de la classification de la mosaïque sud, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé).

(les cellules en grisé représentent les pixels d'une classe X correctement classés). La classe F représente la forêt, DG la dune grise, Dbl, la dune blanche, Av_D, l'avant-dune, Banq., la banquette, Ht_PI, la haute plage et B_PI, le bas de plage

Enfin, si on regroupe la dune grise et la dune blanche, d'une part, et les deux faciès de plage, d'autre part, les observations DGPS valident 87,34 % des pixels si l'on exclut l'utilisation du filtre de Sobel. Si ce dernier est utilisé, 86,08 % des pixels sont bien classés.

5.3. RESULTATS DE LA CLASSIFICATION POUR LA MOSAÏQUE NORD

L'ensemble des trois scènes constituant la mosaïque nord n'a pu être classé d'un seul tenant. Les scènes 1 et 2 ont dû être groupées pour une classification satisfaisante à l'aide de 16 classes déterminées à partir de la classification non supervisée optimisée d'images centrées sur les transects TG6 et TG9. Pour ces deux scènes, la précision globale de la carte extraite est de :

- 75,95 % (tableaux de l'illustration 35) si le trait de côte est défini à l'interface des faciès haut de plage – dune blanche et
- 79,75 % si le trait de côte est défini à l'aide du filtre de Sobel.

Observations de terrain									
	Classe	F	DG	Dbl	Ht_PI	B_PI	Total	Précision utilisateur (%)	
Pixels cartographiés	Forêt	3	3				6	50,0	
	Dune grise		8	2			10	80,0	
	Dune blanche		2	34	1		37	91,9	
	Haut plage		1	4	6		11	54,5	
	Bas plage		1			2	6	9	66,7
	Eau					6	4		
Total		3	15	40	15	6	73		
Précision procédure (%)		100	53,3	85,0	40,0	100,0			

Bilan	
Nb. total de pixels bien classés	60
Nb. total d'observations	79
Précision globale (%)	75,95

Illustration 35– Précision de la classification des scènes 1 et 2, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé).

(les cellules en grisé représentent les pixels d'une classe X correctement classés). La classe F représente la forêt, DG la dune grise, Dbl, la dune blanche, Av_D, l'avant-dune, Banq., la banquette, Ht_PI, la haute plage et B_PI, le bas de plage

Le gain de précision est important : le filtre de Sobel permettant de définir 100 % du trait de côte (6 points DGPS) contre 50 % seulement si seule la carte des faciès est prise en compte. Ces valeurs passent à 83,54 % (sans Sobel) et 90,41 % (avec Sobel) si les faciès de dune, d'une part, et de plage, d'autre part, sont regroupés.

La scène 0 (Soulac) a été classée à part. Plusieurs tentatives ont été effectuées à partir des transects TG1 et TG3, les plus représentatifs de la variabilité des faciès, afin de déterminer des ROIs susceptibles de permettre la classification correcte de cette image. Aucune classification ne s'est montrée satisfaisante. Nous avons choisi de définir les ROIs visuellement à partir des 4 transects DGPS disponibles. 17 ROIs ont été définies, dont 5 extrapolées (i.e. sans aucune référence DGPS). La carte obtenue n'est pas très régulière. L'analyse de validation n'est pas représentative car tous les points de terrain ont été utilisés pour générer les ROIs. Elle ne peut donc pas être finalisée. Cette carte permet simplement de finaliser la carte faciologique entière du littoral aquitain. Dans l'ensemble, la carte faciologique est en bon accord avec le positionnement DGPS du trait de côte. Le filtre de Sobel, montre un espace large de radiométrie et de texture stable, bordé à l'est par une limite très franche, que nous avons interprétée dans les mosaïques traitées précédemment comme le trait de côte. Cette limite n'est concordante que dans un cas sur trois aux observations DGPS.



Illustration 36 – Représentation des argiles du Gulp (à gauche) et des résurgences de nappes superficielles (à droite - extraits de Géoportail 2007)

L'une des hypothèses émises devant cette impossibilité d'appliquer à la scène de Soulac les ROIs définies plus au sud concerne la géologie, et plus particulièrement la présence de substratum argileux sur l'estran, les argiles du Gulp (témoins d'un paléo chenal de la Gironde), qui peuvent apparaître en produits démantelés (blocs épars) ou sous forme d'un platier de plusieurs dizaines de m² (Illustration 36, gauche).

On observe aussi de nombreuses résurgences des nappes superficielles, avec des oxydations de fer de couleur brune ocre, une végétation d'eau douce particulière, etc... (Illustration 36, droite)

Ces variations de couleur intra-faciès constituent une explication plausible aux difficultés rencontrées. Une campagne de mesures radiométriques pourrait permettre d'évaluer les différences de radiométries existant sur des formations similaires situées dans cette zone et plus au sud.

On retrouve sur l'imagerie FORMOSAT-2 (Illustration 37) cette particularité des argiles du Gurp qui explique que cette zone ne puisse être classée en « Haut de plage » tel qu'on le rencontre plus au sud, où il n'y a pas ce type de formations argileuses.

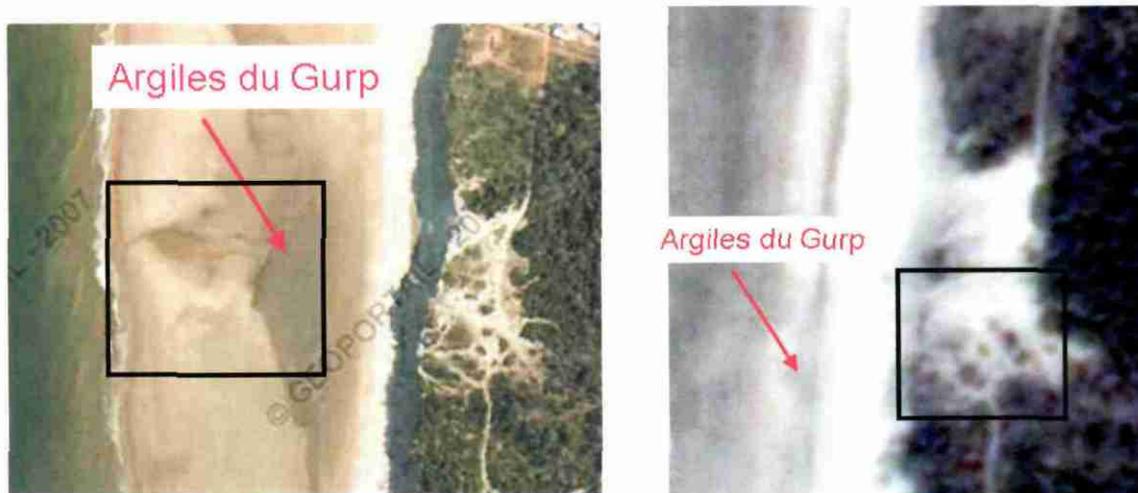


Illustration 37 – Représentation des argiles du Gurp (encadré) à partir du: Geoportail (à gauche) et de FORMOSAT-2 (à droite)

5.4. BILAN DE LA VALIDATION DE LA CLASSIFICATION POUR LES SCENES 1 A 12

Ce bilan est présenté dans les tableaux de l'illustration 38.

Observations de terrain								
	Classe	F	DG	Dbl	Ht_PI	B_PI	Total	Précision utilisateur (%)
Pixels cartographiés	Forêt	6	8	4			18	33,3
	Dune grise		63	11			74	85,1
	Dune blanche		59	270	14	1	344	78,5
	Haut plage		6	38	113	7	164	68,9
	Bas plage		2	12	49	75	138	54,3
	Eau					2	59	
Total		6	138	335	176	83	738	
Précision procédure (%)		100	45,6	80,6	64,2	90,4		

	Bien classés	Total	Précision (%)
Limite de la forêt	51	62	82,26
Limite dune grise / dune blanche	15	39	38,46
Trait de Côte	74	123	60,16

Bilan	Sans le filtre de Sobel	Avec le filtre de Sobel
Nb. total de pixels bien classés	667	690
Nb. total d'observations	962	962
Précision globale (%)	69,33	71,73

Illustration 38 – Précision de la classification supervisée des scènes 1 à 12, à partir des ROIs définies par la classification non supervisée optimisée (recuit simulé).

(les cellules en grisé représentent les pixels d'une classe X correctement classés). La classe F représente la forêt, DG la dune grise, Dbl, la dune blanche, Av_D, l'avant-dune, Banq., la banquette, Ht_PI, la haute plage et B_PI, le bas de plage

Pour cette analyse, nous avons considéré que les faciès de « dune blanche », « avant-dune » et « banquette » forment une seule entité. Les pixels classés « eau » ne sont pas pris en compte pour la validation de la carte extraite de l'imagerie F2. Globalement, la précision de la classification est de 69,33 %, si le filtre de Sobel n'est pas utilisé pour affiner la position du trait de côte. La précision passe à 71,72% si le filtre est utilisé.

Du point de vue du concepteur de la carte (précision procédure), seule la dune grise (et la limite entre la dune grise et la dune blanche) présente quelques difficultés à être

discriminée, notamment de la dune blanche. La position du trait de côte est validée par un peu plus de 60% des mesures effectuées au DGPS. Du point de vue de l'utilisateur (précision utilisateur), les moins bons scores sont obtenus pour la forêt, sauf si l'on tient compte de la détection de la limite de la forêt, qui est excellente, et le bas de plage. Pour l'utilisateur, les faciès de haute plage et de bas de plage ne devraient pas être différenciés.

Ces deux difficultés se trouvent résolues si les classes de dune grise et dune blanche, d'une part, de haute plage et de bas de plage, d'autre part, sont compilées. Dans ce cas, nous obtenons pour la validation un score global de 77,42%, et, individuellement, les faciès « dune » et « plage » sont validés à plus de 80%. En outre, si le filtre de Sobel est utilisé pour extraire le trait de côte, la précision globale passe à 84,55%

5.5. CONCLUSIONS

Quinze ROIs ont été utilisées pour classer une mosaïque constituée des scènes 5 à 9. Ces ROIs ne peuvent être appliquées aux scènes 10 à 13, plus au sud, certains faciès ayant des radiométries mal définies à l'aide des ROIs de la scène 6. En ce qui concerne cette mosaïque, la précision est de près de 67% pour 725 observations. Lorsque le filtre de Sobel est utilisé, on parvient à une précision de près de 70%. Au niveau de la pointe d'Arcachon, le trait de côte mesuré au DGPS ne coïncide ni avec le contour Sobel, ni avec la limite du faciès de dune blanche, comme le laissait présager l'analyse préliminaire de la radiométrie de la dune blanche dans cette zone.

Deux autres mosaïques ont été générées : au sud une mosaïque constituée des scènes 10 à 12, et au nord une mosaïque constituée des scènes 1 et 2. La scène 0 n'a pu être classée : elle présente des radiométries très variées pour des faciès de dénomination identique. L'atmosphère ne montre pas de grandes perturbations (qui seraient visibles dans le canal bleu). Une scène SPOT, acquise par l'UMR EPOC dans le cadre d'un programme d'étude sur le panache de la Gironde soutenu par le programme ISIS du CNES, montre elle aussi des zones de plage et de dune de radiométrie plus faible que dans un environnement proche, notamment au niveau des villes. Un examen de ces radiométries sur le terrain permettrait de mieux comprendre les faciès de cette partie du littoral. La précision de la mosaïque nord, estimée à l'aide de 79 observations, est de près de 76% si le trait de côte est délimité sur la carte des faciès. Elle passe à 83,54% si le filtre de Sobel est utilisé pour extraire cet indicateur. La précision de la mosaïque sud, estimée à l'aide de 158 observations est de près de 78 % (76,56 % avec l'appui du filtre de Sobel pour la délinéation du trait de côte).

Globalement, la précision de la carte du littoral obtenue (comprenant 11 scènes) estimée à l'aide de 962 observations au total est de 69,33 %. La caractérisation du trait de côte est améliorée en utilisant l'image filtrée (filtre de Sobel) de la bande 2 des mosaïques F2. En complétant la carte des faciès par un trait de côte extrait de cette image filtrée, la précision globale de la carte passe à 71,73 %.

Enfin, nous avons calculé la précision d'une carte thématique très simplifiée ne comprenant plus que trois classes (la forêt, la dune et la plage) qui, pour les gestionnaires, est parfois suffisante (*Illustration 39, gauche*). Pour cela, nous avons

regroupé dans la classe « dune » la dune blanche et la dune grise, et dans la classe « plage » la haute plage et le bas de plage. Dans cette configuration, la précision globale de la carte des faciès littoraux est de 77,42%. Cette carte, quoique simplifiée permet de délimiter le trait de côte, puisque la plage reste discriminée de la dune. Si on utilise l'image obtenue à l'aide du filtre de Sobel (calculé sur la bande 2), la meilleure délimitation de trait de côte permet d'améliorer la précision de la carte dont la valeur passe à 84,55%.



6. Extraction du trait de côte

L'extraction du trait de côte à partir de la télédétection constitue un des objectifs majeurs du projet, afin d'envisager une mise à jour régulière sur le linéaire côtier sableux aquitain (240 km).

Les données finales issues de la classification d'une part, du filtre Sobel d'autre part montre un niveau de performance élevé (71,72% à 84,55%).

Le passage direct d'une classification (image Raster) en un fichier vecteur est certes possible, mais la pixellisation importante accentuée par le caractère naturel du milieu génère un nombre important de vecteurs parasites.

Aussi une interprétation a été faite (*Illustration 39*), avec comme cartes de fond la classification finale d'une part, et le filtre Sobel d'autre part. Le résultat est produit sur la quasi-totalité de la zone d'étude, l'image de Soulac ne pouvant être retenue du fait des incertitudes précisées précédemment.

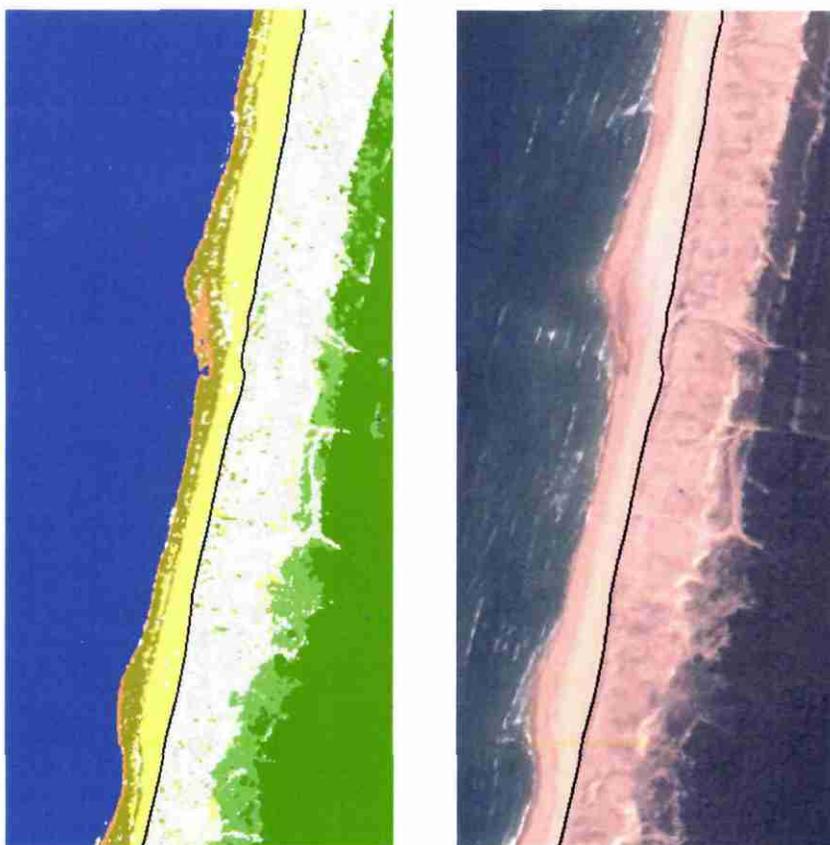


Illustration 39 – Trait de côte 2007 superposé à la classification (à gauche) et à l'image FORMOSAT-2 non traitée (à droite)



7. Recommandations et perspectives

L'expérience tirée de cette étude montre à la fois des possibilités d'amélioration, tant concernant le protocole de terrain, que la méthode d'analyse des scènes spatiales, et des perspectives à l'utilisation des cartes du littoral extraites de l'imagerie satellite.

En ce qui concerne le protocole de terrain, et pour optimiser l'utilisation des observations DGPS, il semblerait judicieux de n'utiliser qu'une seule dénomination par type de faciès. Il faudrait également, lorsqu'elle est observée, noter dans le nom du faciès la présence de végétation. Enfin, pour les grandes zones de traitement du nord, du centre et du sud, il est recommandé de disposer de contours de faciès long d'une centaine de mètres centrés sur l'un des transects de mesures (comme dans le cas de TG18 par exemple). Ces données permettent de générer très efficacement les ROIs.

Le tracé du trait de côte peut se faire à l'aide de la bande 2 filtrée à l'aide de l'algorithme de Sobel, ou à partir de la limite des faciès sur la carte satellite. L'utilisation du contour de Sobel semble dans certains cas plus précise que les contours de faciès. Nous avons constaté que certains points DGPS concordaient à l'un des deux tracés indifféremment, aux deux tracés simultanément ou à aucun des deux. Pour obtenir le meilleur trait de côte possible, il faudrait tenter de réduire le bruit de fond visible sur l'image filtrée afin d'exploiter plus efficacement ce support et définir une stratégie qui permettrait d'exploiter les deux supports satellite simultanément.

Nous avons vu qu'il était possible de discriminer différents faciès de dune et de plage. Toutefois en dégradant l'information cartographique, nous améliorons considérablement la validité de la carte FORMOSAT-2. Cette perte d'information démontre le manque de connaissance sur certains faciès et notamment les faciès végétalisés. Leur discrimination sur l'image sera améliorée par leur observation directe sur le terrain. Toutefois, il faudrait acquérir des spectres de terrain sur les différents types de sable de la dune grise et de la dune blanche et des espèces végétales qu'elles accueillent afin de définir les faciès que l'on peut réellement discriminer à partir de la résolution radiométrique réduite que permettent les capteurs spatiaux. Cette approche permettrait de définir la limite, faciès par faciès, de la méthode de cartographie décrite dans cette étude. D'autre part, une étude radiométrique doit être entreprise sur le terrain pour comprendre la scène 0, l'exploiter et exploiter d'autres scènes centrées sur cette zone.

La scène 13 n'a pas été exploitée car elle présente des zones rocheuses plus que des plages sableuses. Toutefois, l'érosion de cette partie du littoral, si elle répond à d'autres processus que sur les linéaires sableux, est importante, et se produit de façon très irrégulière. Cette scène doit être exploitée à part, dans un but très prospectif, afin de définir si les falaises, la lithologie et le pendage des couches géologiques qui les constituent, les arrivées d'eau douce responsables de la dégradation des roches et les zones où les roches sont déjà dégradées ont des signatures radiométriques caractéristiques.

Enfin, des études préliminaires montrent la faisabilité de la réalisation d'un MNT de la plage et de la dune embryonnaire à l'aide des radiométries satellite. Cette hypothèse devrait être validée sur le terrain à l'aide de mesures radiométriques d'une part et de levés altimétriques réalisés sur plusieurs zones du littoral. L'établissement d'une courbe d'étalonnage réflectance-« altitude » permettrait la génération opérationnelle de MNT sur l'ensemble (ou partie) du littoral.

8. Conclusion

Cette étude s'appuie en partie sur les résultats concluants d'une cartographie des principaux faciès littoraux et du trait de côte par imagerie SPOT 5 réalisée en 2005 sur la façade océanique du Bassin d'Arcachon (Pedreros *et al.*, 2005). Elle présente plusieurs niveaux d'amélioration et de prospective.

L'imagerie, spatiale FORMOSAT-2 a été testée et utilisée pour cartographier les faciès géomorphologiques du système plage-dune. 14 scènes ont été acquises les 26 et 27 août 2007 du nord au sud de l'Aquitaine, couvrant 270 km de côte. Une première phase préparatoire a consisté à un contrôle de la qualité du géoréférencement des données, suivi d'une analyse radiométrique des 14 scènes acquises en deux jours.

Finalement, le littoral aquitain a fait l'objet d'une classification non supervisée sur 4 secteurs différenciés (Sud : de Biarritz à Giron-Plage, Centre de Giron-Plage à Lacanau, Nord de Lacanau à Montalivet, et enfin Nord-scène 0 de Montalivet à la Pointe de Grave). Ceci a permis de tenir compte des impacts des modifications du contenu de l'atmosphère sur le transfert radiatif dues (i) aux acquisitions sur deux jours, (ii) à la variabilité naturelle de la couleur des substrats (fonction notamment du couvert végétal), (iii) aux contraintes informatiques, et (iv) à la spécificité de l'image de Soulac (hypothèse d'une géologie différente). La définition des jeux de parcelles (ROIs) a fait l'objet d'une analyse comparative mettant en évidence un résultat plus précis en utilisant la méthode du recuit simulé, préalable à la classification non supervisée.

Sur l'ensemble du littoral aquitain (à l'exception de la zone de Soulac), la classification est globalement performante sur les cibles choisies (forêt, dunes grise et blanches, banquette, haut de plage, bas de plage) : 69,33 % de points de validation bien classés. Ce résultat passe à 77,42% si l'on considère les trois grands ensembles : plage, dune et forêt.

La détection du trait de côte est encore optimisée par l'utilisation du filtre Sobel sur le canal vert (canal 2) de l'image FORMOSAT-2 : elle est de 71,72% si l'on prend en compte la totalité des classes, et de 84,55% avec les classes regroupées. Cette précision de la cartographie du trait de côte est de 6,2 m à partir de la classification. Elle passe à 5,3 m avec l'utilisation du filtre Sobel.

Seule la classification de l'image de Soulac a été problématique, l'utilisation des ROIs de l'image nord n'étant pas possible, alors que la géométrie et la radiométrie des données était correcte. L'hypothèse d'une spécificité géologique / pédologique avec des arrivées d'eau douce au niveau des plages entraînant une modification de la radiométrie doit être validée.



9. Bibliographie

Butel R., Dupuis H., Bonneton P. (2002). Spatial variability of wave conditions at French Atlantic coast using in-situ data, *Journal of Coastal Research*, SI 36, 96-108.

Favennec, J. (1997). Gestion conservatoire des dunes littorales non boisées. In : Favennec J, Barrère P, eds. Biodiversité et protection dunaire. Paris : Lavoisier, 1997.

Lafosse, M. (2007). Méthode de cartographie par télédétection des faciès morpho-sédimentaires du littoral aquitain. Rapport de stage Master2, réalisé au BRGM, Université Bordeaux 1, 50 p.

Pedreras R., Dupuis H., Marieu V., Mallet C., Butel R., Oliveros C., Froidefond J.M., Hosford S. (2005). Evaluation du potentiel de l'imagerie SPOT5 dans le secteur du Bassin d'Arcachon. BRGM/RP-54004-FR, 54 p., 18 fig., 3 tabl., 2 ann.

Pouget, F. (1988). Télédétection et végétation du milieu dunaire aquitain. Identification de la végétation de la dune littorale à partir de données du satellite SPOT. Thèse d'université, Université de Bordeaux 3, Institut de Géographie, 271 p.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional "Aquitaine"
Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33600 PESSAC – France
Tel. : 05 57 26 52 70