



















Cartographie des faciès géomorphologiques du littoral de la Côte Basque française à partir des données FORMOSAT 2 (64)

Rapport final

BRGM/RP-56917-FR

Décembre 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2008 08LITA01

V. LAFON, S. AUBIE



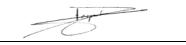






Vérificateur :

Nom: JF Desprats Date: 09/12/2008



Approbateur:

Nom: Ph. Dutartre Date: 20/01/2009

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,

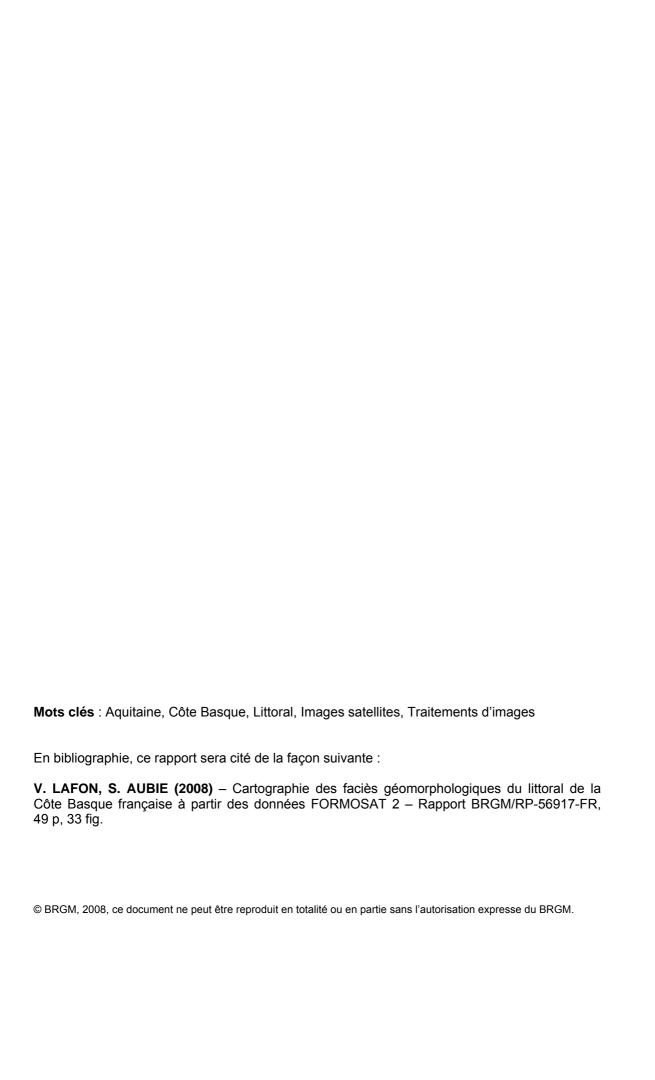
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM. Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.











Synthèse

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la convention de partenariat de l'Observatoire de la Côte Aquitaine s'inscrivant dans le CPER 2007-2013, et des missions qui ont été confiées au BRGM par l'Etat, le Conseil Régional d'Aquitaine et le Conseil Général des Pyrénées Atlantiques.

La cartographie des faciès morphologiques de la côte basque s'appuie sur les travaux et méthodologies menés en 2007 pour la cartographie de ces mêmes faciès sur le littoral sableux de la côte aquitaine entre la pointe de Grave et le début de la côte rocheuse (Mallet et al - rapport BRGM/RP-56101-FR).

Les approches par classification supervisée et classification hiérarchique descendante ont été appliquées. La classification hiérarchique permet d'atteindre une performance de 84% en comparant avec des relevés de terrain d'une part, et des interprétations visuelles de photographies aériennes d'autre part.

Cette performance est à comparer au niveau de performance atteint par la classification supervisée basée sur des parcelles d'entraînement obtenues par recuit simulé (implémenté à EPOC), qui reste est inférieur à 76%, avec des confusions rémanentes comme celle observée entre les rochers et les routes.

Sommaire

| 1. | INTROD | UCTION | 9 |
|----|---|---|--|
| | 1.2. OBJ 1.2.1. 1.2.2. 1.2.3. côte 1.2.4. | ITEXTE DE L'ETUDE ECTIFS ET METHODE Compatibilité radiométrique des scènes FORMOSAT-2 Discrimination des faciès sur l'imagerie FORMOSAT-2 Validation de la reconnaissance des faciès et de la position du trait de Discrimination des venues d'eau sur l'imagerie SPOT 5 | . 10 . 10 . 11 . 13 |
| 2. | DONNE | ES DISPONIBLES | . 15 |
| | 2.1.1. 2.1.2. 2.2. MES 2.3. ATL | Scènes FORMOSAT-2 | . 15 . 17 . 18 . 18 |
| 3. | COMPA | TIBILITE RADIOMETRIQUE DES SCENES FORMOSAT-2 | . 19 |
| 4. | DISCRI | MINATION DES FACIES QUI SERONT CARTOGRAPHIES | . 21 |
| | 4.1.1. 4.1.2. 4.1.3. 4.1.4. 4.1.5. 4.2. DON 4.2.1. 4.2.2. 4.3. CLA 4.3.1. 4.3.2. 4.4. VALI 4.5. CON 4.6. CON | Limite de la classification | . 21 . 23 . 24 . 26 . 29 . 32 . 34 . 34 . 35 . 37 |
| 5. | CLASSI | FICATION SUR LA BASE DU RECUIT SIMULE | . 41 |
| | 5.2. CLAS 5.3. VALI | DIX DES ZONES D'INTERET ET LABELLISATION | . 42 . 43 |
| | | USION | |
| 7. | BIBI IOC | RAPHIF | 49 |

Liste des illustrations

| Illustration 1 – Valeurs de l'éclairement solaire dans les bandes Formosat-2 | 11 |
|---|----|
| Illustration 2 - Comparaison des prises de vues de la Pointe Sainte Anne par photographies aérienne et imagerie FORMOSAT-2 | 12 |
| Illustration 3 – Organigramme de la méthodologie | 12 |
| Illustration 4 –Scènes FORMOSAT-2 acquises pour l'étude | 15 |
| Illustration 5 – Description des données FORMOSAT-2 | 16 |
| Illustration 6 – Scènes FORMOSAT-2 de la côte Basque | 16 |
| Illustration 7 – Emprise de la scène SPOT 5 | 17 |
| Illustration 8 – Comparaison des réflectances au sommet de l'atmosphère (rtoa, nombre sans dimension) de l'eau des scènes FORMOSAT-2 (Les barres verticales représentent l'écart-type autour de la moyenne) | 19 |
| Illustration 9 – Mosaïque des deux scènes FORMOSAT-2 sur la côte basque | 20 |
| Illustration 10 – Localisation des profils utilisés pour déteminer la radiométrie des zones immergées | 21 |
| Illustration 11 – Comptes numériques typiques des zones émergées et immergées sur les scènes FORMOSAT de la côte basque du 27/08/2007 | 22 |
| Illustration 12 - Prises de vue Formosat-2 de l'estran | 23 |
| Illustration 13 – Arbre de décision pour la classification initiale | 25 |
| Illustration 14 – Radiométrie comparée de l'écume et de quelques radiométries typiques du domaine émergé d'une part et immergé, d'autre part | 25 |
| Illustration 15 – Comparaison entre la carte FORMOSAT (domaine immergé) et les photographies aériennes (extrait de l'Atlas de la Côte Basque), zone nord | 28 |
| Illustration 16 – Comparaison entre la carte FORMOSAT (domaine immergé) et les photographies aériennes (extrait de l'Atlas de la Côte Basque), zone nord | 29 |
| Illustration 17 – CN et NDVI de différentes zones d'intérêts définies par photo- interprétation. La végétation est surlignée et vert, les sols nus en gris | 30 |
| Illustration 18 – CN de différentes zones d'intérêts définies par photo-interprétation dans me quatre bades FORMOSAT-2 (1 à 4 sur l'axe des abscisses) | 31 |
| Illustration 19 – Arbre de décision pour la classification de différents types de couvert végétal | 31 |
| Illustration 20 – CN de différents types de sols nus dans les quatre bandes FORMOSAT | 32 |
| Illustration 21 – CN des routes parkings et affleurements rocheux dans les quatre bandes FORMOSAT | 33 |
| Illustration 22 : Arbre de décision générale | 34 |
| Illustration 23 – Faciès discriminés | 35 |
| Illustration 24 – Validation du pied de falaise | 36 |
| Illustration 25 – Validation des principaux faciès | 36 |

| photographie aérienne (à droite)photographie FORMOSA1-2 (a gauche), | 37 |
|---|----|
| Illustration 27 – La côte des Basque : cartographie FORMOSAT-2 (à gauche), photographie aérienne (à droite) | 38 |
| Illustration 28 – Les flyschs : cartographie FORMOSAT-2 (à gauche), photographie aérienne (à droite) | 39 |
| Illustration 29 – Zones (rectangles colorés) sur lesquelles a été testé le recuit simulé | 41 |
| Illustration 30 – Résultat de la classification à partir du recuit simulé sur la Pointe Saint Martin | 42 |
| Illustration 31 – Vue de la Pointe Saint Martin par imagerie FORMOSAT classée à l'aide d'un arbre hiérarchique (à gauche), de la classification de Mahalanobis entraînée par des ROIs « recuit » (à droite), et photographie aérienne (au centre) | 43 |
| Illustration 32 – Validation du pied de falaise à partir de données DGPS | 44 |
| Illustration 33 – Validation des faciès obtenus par classification supervisée à partir d'observations DGPS et photo-interprétées | 45 |

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la convention de partenariat de l'Observatoire de la Côte Aquitaine s'inscrivant dans le CPER 2007-2013, et des missions qui ont été confiées au BRGM par l'Etat, le Conseil Régional d'Aquitaine et le Conseil Général des Pyrénées Atlantiques.

La cartographie des faciès morphologiques de la côte basque s'appuie sur les travaux et méthodologies menés en 2007 pour la cartographie de ces mêmes faciès sur le littoral sableux de la côte aquitaine entre la pointe de Grave et le début de la côte rocheuse (Mallet et al - rapport BRGM/RP-56101-FR).

C'est donc l'approche basée sur l'utilisation combinée d'une image Spot 5 et de l'imagerie satellitale Formosat-2 acquise en août 2007 qui sera suivie sur la partie rocheuse du Pays Basque.

Les scènes acquises en 2007 par le capteur FORMOSAT-2 pour le suivi du littoral aquitain couvrent la côte basque. Techniquement FORMOSAT-2 permet de répondre aux besoins de l'Observatoire de la Côte Aquitaine car il offre des bandes spectrales proches de SPOT5, aptes à discriminer sur la base de leur radiométrie, les différents objets pertinents pour la cartographie du rivage. Disponible par programmation, il offre en outre une excellente résolution spatiale de 2 m (2.5 m pour SPOT 5). 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.

Les faciès que nous avons choisi de cartographier en s'appuyant sur l'imagerie FORMOSAT-2 sont :

- l'eau profonde (profondeur < -6 m, le zéro étant le 0 NGF),
- l'eau peu profonde (comprise en -6 m et 0 m): fonds sableux / fonds rocheux,
- la limite terre-mer,
- l'estran :
 - platier rocheux,
 - ceinture d'algues,
 - ceinture d'algues et sable,
 - sable,
 - éboulis,
 - le pied de falaise (ou pied d'ouvrage le cas échéant). Ce faciès est considéré comme le trait de côte pour l'Observatoire de la Côte Aquitaine, il

correspond à la limite entre le pied de falaise et les différents faciès de l'estran ;

- les ouvrages,
- la falaise, il est ici important de pouvoir déterminer la présence/absence de végétation sur la falaise;
- les venues d'eau ;
- la lithologie;
- le sommet de la falaise ;
- les routes, les habitations et la végétation.

1.2. OBJECTIFS ET METHODE

La précision géographique des scènes FORMOSAT-2 ayant précédemment été démontrée (Mallet et al. 2007), il convient de valider la compatibilité radiométrique des deux scènes FORMOSAT-2 acquises à deux dates différentes afin de les assembler (mosaïquage) pour les analyser conjointement.

1.2.1. Compatibilité radiométrique des scènes FORMOSAT-2

La réflectance au sommet de l'atmosphère (R_{toa}) des deux scènes sera analysée afin de définir si des types de surface identiques présentent 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 en dehors du panache de l'Adour (besoin de zones homogènes), en sélectionnant une zone de référence au large, et trois zones à proximité du littoral au nord, au centre et au sud des deux scènes.

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

- Es représente l'éclairement solaire dans la bande k (valeurs consignées dans le tableau de l'Illustration 1 pour les correspondances),
- θ est l'angle solaire zénithal (90-<SOLAR_ELEVATION> 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 |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| Es | 1953,4 | 1836,2 | 1553,6 | 1079,8 |

Illustration 1 – Valeurs de l'éclairement solaire dans les bandes Formosat-2

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

Il est délicat, pour cette étude de tenter de cartographier le littoral basque par des méthodes de classification basées sur des zones d'entraînement définies ou labellisées sur le terrain, peu de données de référence terrain étant disponibles notamment dans le domaine sous-marin. En revanche, il est indispensable d'initier une reconnaissance des faciès, en simplifiant ceux-ci afin d'être reconnus par exemple sur des photographies aériennes (Orthophotos littorales 2000, CETE de Normandie). Cette caractérisation permettra de définir des indices de discrimination, ou parfois de montrer la confusion radiométrique entre des faciès apparemment distincts (Illustration 2).

Ces indices permettront d'organiser une suite logique (classification hiérarchique) à partir de laquelle les pixels images seront classés pour une restitution cartographique.

Puis, quelques tests seront initiés afin de montrer si des méthodes plus systématiques et reproductibles peuvent être utilisées dans le cas de la cartographie des faciès de la côte basque. Comme pour la côte sableuse l'algorithme du recuit simulé sera utilisé afin de mettre en évidence la possibilité de discrimination des faciès, et une première classification globale à l'aide des classes d'entraînement qui auront été définies après une analyse de séparabilité sera menée sur la base des classes issues du recuit simulé.



Illustration 2 - Comparaison des prises de vues de la Pointe Sainte Anne par photographies aérienne et imagerie FORMOSAT-2

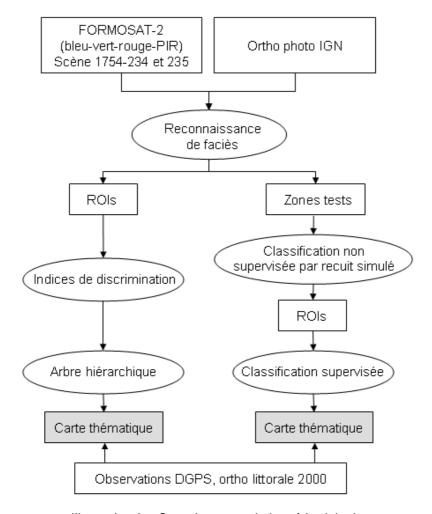


Illustration 3 – Organigramme de la méthodologie

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

Des observations DGPS et des observations géoréférencées qualifiées à partir de l'ortho-photo littorale 2000 seront utilisées pour valider les cartes thématiques issues des deux stratégies de classification.

1.2.4. Discrimination des venues d'eau sur l'imagerie SPOT 5

L'imagerie THR (Très Haute Résolution) SPOT 5 dispose de 4 bandes spectrales : XS1, XS2 et XS3, équivalentes aux bandes 2, 3 et 4 de F2, et XS4 (1,58-1,75µm) ou SWIR (Short-Wave InfraRed). Cette dernière bande, de moindre résolution (20 m), est sensible à l'humidité du sol et à la végétation.

Pour évaluer le contenu d'eau d'une manière normalisée (que ce soit des plans d'eau libres ou de l'eau contenue dans les cellules d'une plante), le NDWI (Normalised Difference Water Index) a été introduit par Gao (1996). Il allie les bandes XS3 (ou PIR, Proche InfraRouge) et SWIR comme suit :

NDWI=(SWIR-PIR)/(SWIR+PIR)

Cet indice sera calculé pour l'ensemble de la scène SPOT 5 afin de tester le potentiel de l'imagerie SPOT pour localiser les venues d'eau sur la côte basque. Les valeurs de l'indice seront confrontées aux observations in situ.

Le traitement de cette image SPOT n'est pas présenté dans ce rapport, il sera réalisé en 2009.

2. Données disponibles

2.1. DONNEES SATELLITE

2.1.1. Scènes FORMOSAT-2

Deux scènes FORMOSAT-2 acquises le 27 août 2007 pour la cartographie du littoral aquitain ont été utilisées dans le cadre des présents travaux. Les caractéristiques techniques de ces données très haute résolution Formosat-2 (Illustration 4) sont décrites dans l'Illustration 5. Ces scènes ont été obtenues par fusion des modes panchromatique (2 m) et multispectral (8 m) et ont été acquises du nord au sud à 10:37 TU. Des informations complémentaires sont consignées dans le rapport de Mallet et al. (2007), concernant l'extraction du trait de côte sur la côte sableuse (Pointe de Grave au Sud des Landes).

| Scène | K-J | Date acquisition | Heure acquisition |
|-------|-----------|------------------|-------------------|
| 1 | 1754-0234 | 2007-08-27 | 10:37:07.364516 |
| 2 | 1754-0235 | 2007-08-27 | 10:37:10.988729 |

Illustration 4 – Scènes FORMOSAT-2 acquises pour l'étude

Les scènes englobent l'ensemble de la zone d'étude depuis l'embouchure de l'Adour jusqu'à la frontière espagnole (Illustration 6). Elles 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.

| 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

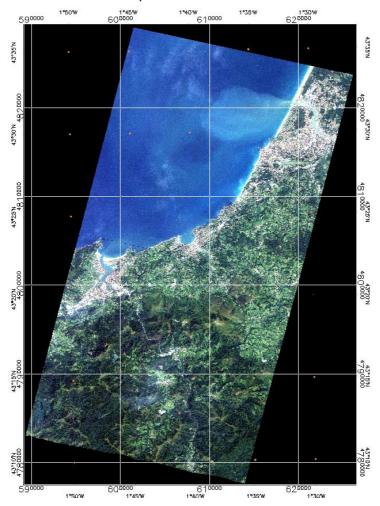


Illustration 6 – Scènes FORMOSAT-2 de la côte Basque

2.1.2. Scènes SPOT 5

Une scène SPOT 5 a été acquise dans le cadre du programme ISIS (Incitation à l'utilisation Scientifique des Images Spot) du CNES (dossier n°94). Cette scène acquise en janvier 2004 est localisée au sud de l'embouchure et l'Adour et couvre une large proportion de la zone étudiée (Illustration 7).



Illustration 7 – Emprise de la scène SPOT 5

Cette scène, de niveau 2A, doit être géoréférencée afin d'être superposable aux scènes FORMOSAT et d'être analysée.

2.2. MESURES IN SITU

Une campagne de terrain a été réalisée en juin 2008 sur le littoral de la Côte Basque. Cette mission a consisté à prendre des mesures au DGPS Trimble R6 de différents indicateurs géomorphologiques. L'objectif étant, d'une part, de suivre l'évolution géomorphologique du littoral, et d'autre part, d'avoir des points de validation terrain pour le traitement des images satellites.

Les indicateurs suivant ont été levés en fonction de leur accessibilité :

- le pied de falaise ;
- le sommet de falaise ;
- différents faciès géomorphologiques : sable, rochers, éboulis, ouvrages, végétation, forêt, venues d'eau, infrastructures, bâtiments,....

2.3. ATLAS DE LA COTE BASQUE

En 2007, dans le cadre des études menées au sein de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, le BRGM a réalisé un atlas cartographique des phénomènes naturels et des caractéristiques physiques du littoral de la Côte Basque.

Cet atlas a été réalisé à partir des données collectées sur le terrain depuis 2002 et disponibles dans le SIG de l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Ces données ont été reportées sur les orthophotos littorales, prises en 2000, agrandies à l'échelle de 1/5 000.

Les éléments cartographiés concernent les caractéristiques géologiques (lithologie, fracturation, pendage, modelés karstiques.....) et les différents phénomènes naturels tels que les mouvements de terrain et les venues d'eau.

3. Compatibilité radiométrique des scènes FORMOSAT-2

Les réflectances au sommet de l'atmosphère de l'eau profonde (eau du large) et de trois zones de l'océan littoral au nord, au centre et au sud des deux scènes mosaïquées sont comparées dans une analyse préliminaire. Les résultats montrent (Illustration 8) que la réflectance de l'eau au sommet de l'atmosphère varie légèrement d'une zone à l'autre en particulier dans les trois premiers canaux. En revanche, dans la bande 4, la réflectance est beaucoup plus homogène quelque soit la zone de l'image considérée. Cette dernière information confirme l'homogénéité globale de l'atmosphère pour l'ensemble des deux scènes, la variabilité de la réflectance dans les trois premiers canaux étant liée à la variabilité naturelle de la teneur en matières en suspension minérales ou organique (et vraisemblablement en dessous pour la bande 1) dans l'eau. Ces deux scènes peuvent donc être mosaïquées et analysées d'un seul tenant. Afin de réduire les temps de calcul, un masque a été défini pour ne retenir que les pixels situés à environ 1 km de part et d'autre du trait de côte (Illustration 9).

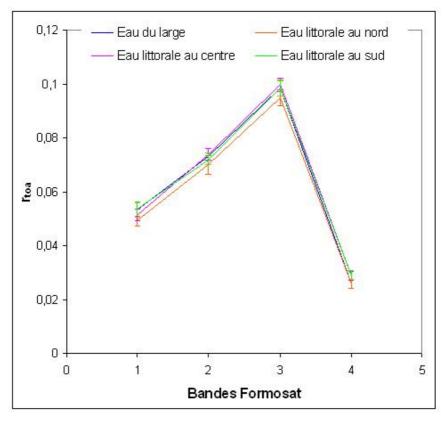


Illustration 8 – Comparaison des réflectances au sommet de l'atmosphère (rtoa, nombre sans dimension) de l'eau des scènes FORMOSAT-2 (Les barres verticales représentent l'écart-type autour de la moyenne).

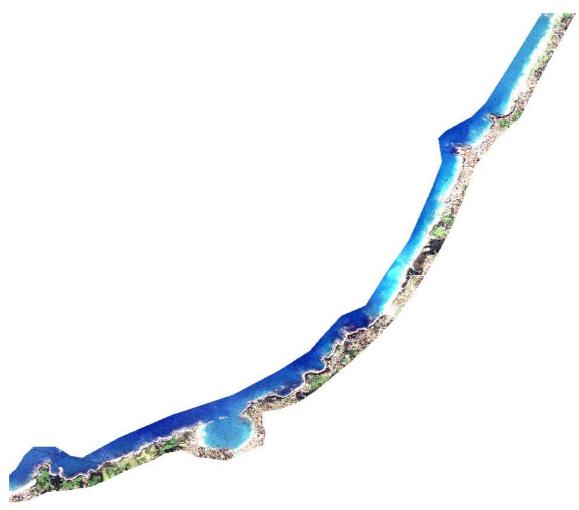


Illustration 9 – Mosaïque des deux scènes FORMOSAT-2 sur la côte basque

4. Discrimination des faciès qui seront cartographiés

4.1. DOMAINE IMMERGE

4.1.1. Caractéristiques radiométriques de l'eau

Les radiométries dans la bande B4 de six profils radiométriques sélectionnés le long de la côte basque (Illustration 10) ont été extraites. Les valeurs typiques de la bande 3 pour ces 6 profils sont reportées sur l'Illustration 11.

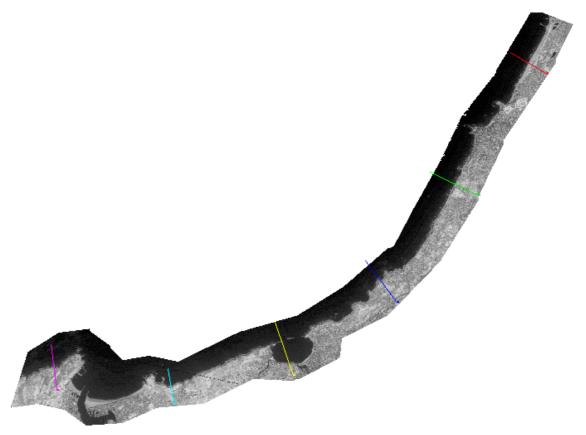


Illustration 10 – Localisation des profils utilisés pour déteminer la radiométrie des zones immergées

(rouge: profil 1 / vert: profil 2 / bleu: profil 3 / jaune: profil 4 / cyan: profil 5 / magenta: profil 6)

Sur l'Illustration 11, la partie de droite des profils correspond à la partie marine de l'image. Les plus faibles valeurs radiométriques dans la bande B4 correspondent à l'eau. Sur l'ensemble des profils, l'eau profonde (i.e. les zones où le fond n'est pas visible) correspond à des comptes numériques (CN) compris entre 17 et 26. Au-delà

de 26, et jusqu'à la valeur limite de 43, les pixels représentent l'eau peu profonde et/ou turbide. La valeur 43 représente l'interface entre le domaine émergé et le domaine immergé.

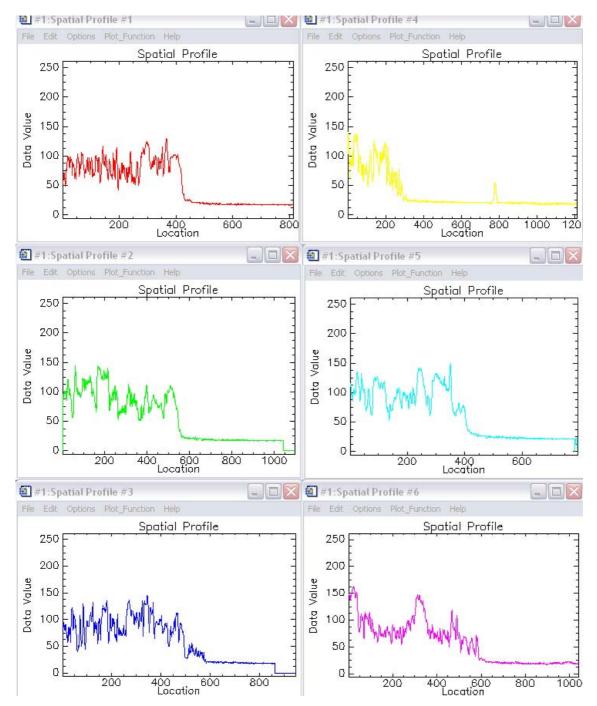


Illustration 11 – Comptes numériques typiques des zones émergées et immergées sur les scènes FORMOSAT de la côte basque du 27/08/2007

4.1.2. L'estran

A l'aide de l'Atlas de la côte basque, des zones sableuses et rocheuses près des côtes ont été sélectionnées au hasard. Elles ont permis la définition à partir de l'image satellite de la radiométrie et du potentiel de discrimination de ces deux types de faciès, dans les petits fonds (i.e. là où l'estran est visible).

Cette étude préliminaire montre les points suivants :

- A partir d'une certaine profondeur (encore indéterminée), les sables et rochers ne sont plus discriminés par leur radiométrie (Illustration 12, à gauche);
- A proximité du trait de côte, des radiométries très élevées apparaissent qui représentent le déferlement (Illustration 12, à gauche et à droite);
- Dans les petits à très petits fonds, le sable et les massifs rocheux présentent des radiométries bien distinctes dans les bandes 1 et 2, le sable ayant des radiométries plus élevées que les fonds rocheux (Illustration 12, à droite);
- Les ceintures d'algues ne peuvent être étudiées sans vérité terrain précise sans laquelle une analyse radiométrique est délicate à entreprendre : la cartographie DCE de 2007 (AEGE/IFREMER) sera utilisée dès qu'elle sera rendue disponible.





Illustration 12 - Prises de vue Formosat-2 de l'estran

4.1.3. Ecume

L'écume est présente à la fois à proximité du trait de côte et en domaine plus profond. A proximité du trait de côte, l'écume se présente sous forme d'un bourrelet radiométrique assez peu distinct, dont la valeur moyenne dans la bande 4 est inférieure au compte numérique (CN) 43. On trouve également des zones où le déferlement est plus marqué radiométriquement et plus étendu dans l'espace. Dans ce dernier cas, les radiométries dans le proche infrarouge excèdent la valeur de 43, qui caractérise l'interface entre le domaine émergé et le domaine immergé. Ces deux types d'écume devront être traités séparément au moment de la classification.

4.1.4. Synthèse et classification

Différents indices ont été créés afin de classer les pixels FORMOSAT et de présenter une carte des faciès des petits fonds de la côte basque. Ces indices sont réunis dans un arbre de décision qui permettra une classification hiérarchique de la scène par association de canaux à des seuils déduits de façon empirique. Cet arbre de décision est développé dans l'Illustration 13.

La lecture de l'arbre de décision se fait de haut en bas. La première étape consiste à reprendre la zone de l'image masquée (B4 > 0). Puis, à partir de la bande B4 (proche infrarouge), l'eau profonde (B4 < 26), puis les domaines émergés (B4 > 43) et immergés (B4 < 43) sont successivement distingués. La branche qui regroupe les actions de classification qui seront entreprises pour le domaine émergé sera développée ultérieurement. Un seuil a été généré pour permettre de distinguer l'écume de la terre ferme. Cet indice est basé sur l'observation du spectre de l'écume par rapport à l'environnement radiométrique direct. En effet, comme le montre l'Illustration 14, la pente formée par les bandes 2 (ou 3) et 4 est plus importante dans le cas du déferlement que dans celui des principaux types de couvert du domaine émergé (toitures, routes, végétation, sable ou falaise littorale). Afin d'amplifier l'effet de cette pente deux indices formés par le rapport du carré de la bande 2 dans un cas (3 dans l'autre) à la bande 4 ont été générés. Une série d'indices a été testée afin d'isoler le déferlement. Compte tenu de l'évolution radiométrique constatée entre les bandes 2, 3 puis 4, c'est le rapport B2²/B4 qui est le plus adapté pour mettre en évidence le déferlement. Ce dernier indice a donc été retenu. Un seuil de 400, défini empiriquement, permet une distinction claire de l'écume à la surface de l'eau.

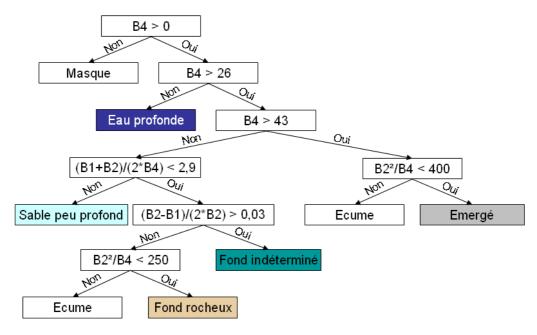


Illustration 13 – Arbre de décision pour la classification initiale

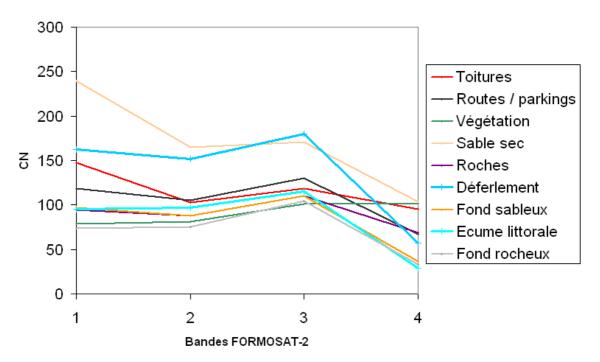


Illustration 14 – Radiométrie comparée de l'écume et de quelques radiométries typiques du domaine émergé d'une part et immergé, d'autre part

D'autres indices ont été créés pour distinguer les faciès sédimentaires dans les très petits fonds : les fonds sableux peu profonds, les fonds rocheux, l'écume et enfin les fonds indéterminés :

- Indice n°1: distinction du sable peu profond (B1+B2)/(2*B4). Ce premier indice permet de distinguer les petits fonds sableux du reste du domaine littoral. En effet, ceux-ci sont représentés toujours par des radiométries élevées dans les 2 bandes B1 et B2. Comme tous les spectres radiométriques ont des valeurs très proches dans la bande B4, est retenu un indice formé par la somme des valeurs dans les bandes B1 et B2 sur le double de la valeur dans la bande B4, qui a un effet de normalisation sur l'indice. Le sable peu profond est représenté par des valeurs d'indice supérieures à 2,9 (seuil défini de façon empirique).
- Indice n°2: distinction des fonds rocheux de l'écume (B2-B1)/(2*B2). Les petits fonds rocheux et l'écume ont été discriminés des fonds dont on ne peut prédire la nature à l'aide d'un indice, lui aussi basé sur les bandes B1 et B2. Cet indice est construit comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) exception faite du choix des bandes et du diviseur qui est égal au double de la bande B2), les plus fortes valeurs d'indice représentant les fonds de nature indéterminée (il s'agit apparemment parfois d'algues, mais aussi de sable ou fonds rocheux nus). La pente de cet indice augmente car, si les valeurs dans la bande B2 varient peu, les radiométries dans la bande B1 sont plus faibles pour ces fonds que pour les fonds rocheux clairement identifiables à partir des survols photographiques.
- Indice n°3: distinction des fonds indéterminés en isolant l'écume et les fonds rocheux (B2² / B4). L'indice mis au point pour la discrimination entre l'écume et les masses continentales est utilisé pour mettre en évidence la frange d'écume liée à un petit effet de déferlement au bord de certaines plages ou estrans rocheux. Le seuil de cet indice a été adapté aux plus faibles valeurs de B4 constatées.

4.1.5. Pertinence des domaines de discrimination

La précision de la carte obtenue à l'aide de l'arbre de décision a été évaluée en comparant la carte FORMOSAT aux photographies aériennes. L'ensemble de la côte est très correctement reproduit comme le montrent quelques exemples présentés sur l'Illustration 15 et l'Illustration 16. Nous remarquons que les affleurements rocheux de petite dimension qui apparaissent notamment au niveau de la côte des Basques (Marbella, Plage du Pavillon Royal, Plage du Centre, Illustration 15) sont bien reproduits. De même des colmatages de sable au fond des petites anses sont également visibles (Ex. Anse de Lafitenia, Illustration 16).

En revanche, le domaine émergé montre de nombreux pixels interprétés comme des petits fonds rocheux (en particulier au niveau du plateau de l'Atalaye, Illustration 15), sableux ou indéterminés. Ce sont en grande partie des zones d'ombre qui sont mal interprétées, car elles ont des CN inférieurs, en moyenne, à la valeur de 43. D'autre part, la plupart des zones « Fond indéterminé » et « Eau profonde » correspondent à des étendues d'eau de nature très variée.

En ce qui concerne les ombres, il apparaît compliqué de les séparer des petits fonds, en particulier des petits fonds rocheux, leurs radiométries étant proche dans les 4 canaux FORMOSAT. En revanche, il est très simple de les masquer en utilisant la première classification réalisée à l'aide de l'arbre de décision. En effet, à l'est de l'interface terre-mer, nous pouvons considérer que les petits fonds n'existent pas, et générer un masque pour l'ensemble des pixels mal classés. Cette technique risque également de masquer certaines zones d'eau (piscine, rivières, bassins peu profonds). L'enjeu de ces discriminations étant moindre, nous avons masqué toutes les zones émergées confondues avec des petits fonds.

La partie suivante traitera du domaine émergé, en ce basant sur des canaux et néocanaux masqués.

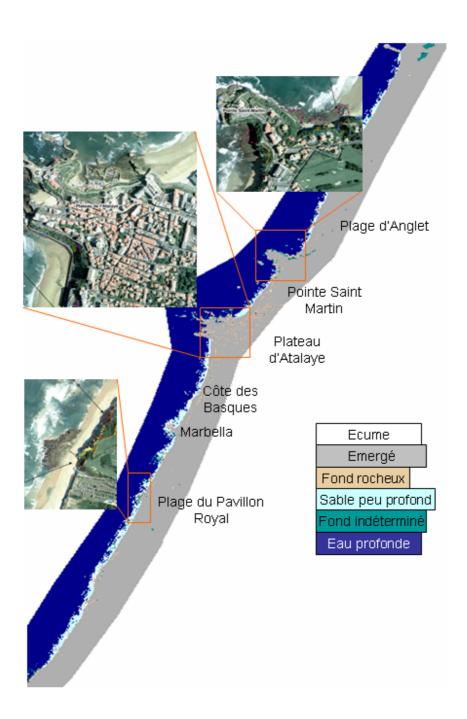


Illustration 15 – Comparaison entre la carte FORMOSAT (domaine immergé) et les photographies aériennes (extrait de l'Atlas de la Côte Basque), zone nord

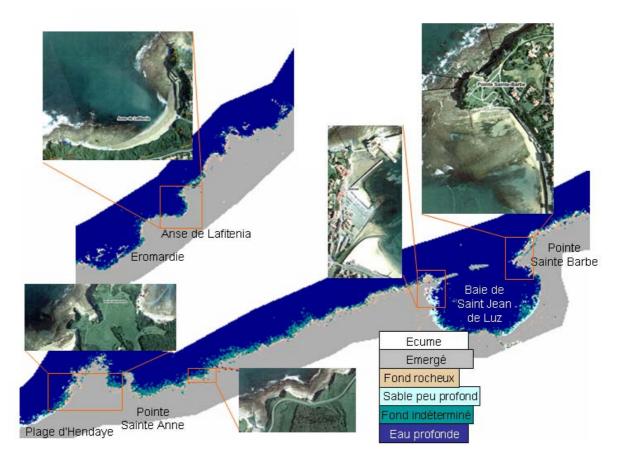


Illustration 16 – Comparaison entre la carte FORMOSAT (domaine immergé) et les photographies aériennes (extrait de l'Atlas de la Côte Basque), zone nord

4.2. DOMAINE EMERGE

4.2.1. Discrimination de la végétation

La végétation est traditionnellement visualisée et différenciée des sols nus à l'aide de l'indice NDVI ((PIR B4- Rouge B3) / (PIR B4+ Rouge B3)). A l'aide des scènes FORMOSAT, des zones tests sont extraites afin d'évaluer la radiométrie du sable de plage, des affleurements rocheux, de la végétation (arbres et champs ou prairies). Sont également utilisées des zones de végétation sur les pentes des falaises ainsi que des zones très sombres qui apparaissent fréquemment dans les forêts, et sont vraisemblablement des effets d'ombres portées.

Dans le cas présent où peu de données de terrain sont disponibles pour décrire la variété radiométrique des environnements, dans un premier temps sont générées des zone d'intérêt (ROIs) représentatives d'environnements reconnaissables sur les photographies aériennes, afin d'en comparer les radiométries et tenter de définir une

valeur seuil de l'indice NDVI pour séparer les sols nus (sables, affleurements rocheux, parkings, bâtiments ...) des zones couvertes par la végétation.

L'analyse de la radiométrie montre que l'indice NDVI, sur la base des informations disponibles, n'est pas très pratique pour séparer la végétation des sols nus. En effet, la végétation sur les platiers ou encore les zones où la végétation se situe dans l'ombre ont des NDVI très faibles proches de ceux des sols nus (Illustration 17). Un seuil de discrimination satisfaisant ne peut donc être défini. En revanche, les valeurs dans les trois premières bandes FORMOSAT offrent une autre possibilité de discrimination (Illustration 18). En effet, la végétation présente systématiquement des valeurs dans les bandes 1 à 3 plus faibles que les sols nus.

Un indice a été défini comme la moyenne des CN dans les trois premiers canaux FORMOSAT (MOY1-3) et une valeur seuil de 88 a été définie empiriquement. Il doit être souligné que ce seuil est peut être insuffisant pour discriminer les couverts de végétation épars ou très sec des sols nus.

| | B1 | B2 | В3 | B4 | NDVI |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| calcaire oligocène | 107,35 | 96,59 | 120,22 | 59,26 | -0,34 |
| flysch Socoa | 143,02 | 122,93 | 144,82 | 74,5 | -0,32 |
| affleurements rocheux | 112,99 | 102,44 | 126,57 | 68,87 | -0,30 |
| végétation sur les platiers | 81,01 | 78,89 | 104,78 | 59,75 | -0,27 |
| végétation | 79,61 | 76,15 | 101,57 | 59,16 | -0,26 |
| ombre végétation | 60,45 | 63,48 | 91,23 | 53,99 | -0,26 |
| parking | 118,53 | 107,78 | 127,47 | 89,04 | -0,18 |
| arbres | 57,39 | 64,37 | 91,67 | 85,38 | -0,04 |
| végétation | 80,96 | 81,15 | 102,67 | 96,65 | -0,03 |
| végétation pente | 65,02 | 69,27 | 94,5 | 95,35 | 0,00 |
| arbres | 55,63 | 62,56 | 90,69 | 98,03 | 0,04 |
| végétation rase | 74,189 | 79,41 | 98,29 | 115,45 | 0,08 |

Illustration 17 – CN et NDVI de différentes zones d'intérêts définies par photo-interprétation. La végétation est surlignée et vert, les sols nus en gris

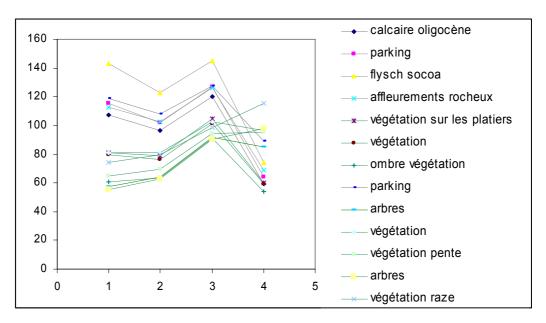


Illustration 18 – CN de différentes zones d'intérêts définies par photo-interprétation dans me quatre bades FORMOSAT-2 (1 à 4 sur l'axe des abscisses).

Afin de décliner différentes formes de végétation, les indices moyens MOY(1-3) et NDVI ont été utilisés en adaptant des seuils afin de reproduire au mieux par classification les observations issues de l'ortho-photo. Ces indices, assemblés sous forme d'un arbre hiérarchique (Illustration 19), ne donnent ni la possibilité de cartographier des zones où le pourcentage de couvert végétal est faible, ni les zones où les platiers sont couverts d'algues ; ceux-ci apparaissent sur la carte comme des ombres, et le moyen de les différencier sur la base de combinaisons de bandes n'a pu être identifié. Les zones de faible couvert devront être ciblées ultérieurement, sur une autre branche de l'arbre hiérarchique.

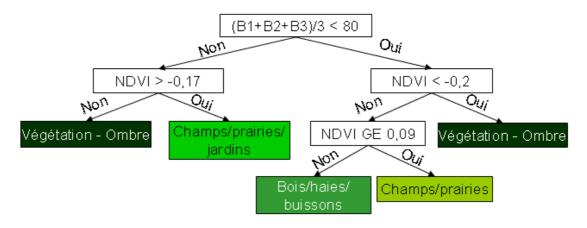


Illustration 19 – Arbre de décision pour la classification de différents types de couvert végétal

4.2.2. Les sols nus

La radiométrie de quelques exemples de sols nus est reportée dans l'Illustration 20. Les spectres se ressemblent à de nombreux égards. Toutefois, ils ne peuvent se classer en deux groupes. L'un d'eux est constitué des toitures rouges et du sable qui présente une pente radiométrique entre les canaux 1 et 3 opposée à celle des autres surfaces. Un seuil de -0,03 permet, à partir de cet indice, de séparer ces deux groupes.

Dans ce groupe, pour différencier le sable des toitures, un indice constitué par le rapport du carré de la bande B2 à la bande B4 est utilisé. Cet indice permet d'isoler les zones sableuses. La classe « toiture rouge » est toutefois imparfaite : elle comporte des pixels sols nus vraisemblablement de type « sol naturel ou revêtement de couleur claire ». Pour isoler ces deux catégories, elles sont isolées sur la classification afin de comparer leurs spectres typiques. Elles se distinguent essentiellement par leur bande proche infrarouge, les toitures présentant de plus faibles valeurs dans ce canal. Un seuil de 108 a été défini de façon empirique.

Le dernier groupe de pixels encore indéterminé contient en particulier le réseau routier, et les affleurements rocheux. Les radiométries des routes et des parkings, d'une part et des affleurements rocheux, d'autre part sont à la fois très proches et très variables. Plusieurs composantes doivent être isolées. La présence de voitures a tout d'abord été traitée.

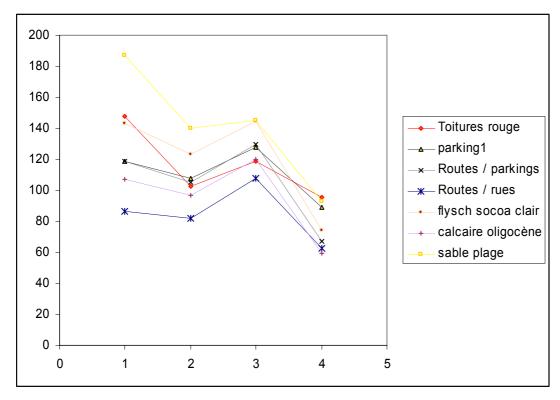


Illustration 20 – CN de différents types de sols nus dans les guatre bandes FORMOSAT

Il est délicat d'isoler la radiométrie des voitures. En revanche la petite taille de ces objets permet de les extraire à l'aide d'une méthode semblable à celle utilisée pour extraire les zones urbanisées à partir de l'imagerie SPOT1 à 4. Il est dans ce but conseillé d'utiliser l'image de variance de la matrice d'occurrence du canal 1. Une fois l'image crée, différents seuils ont été testés afin d'isoler les voitures. Un seuil d'une valeur de 95 a été choisi empiriquement. Cette méthode permet de mettre en évidence les voitures, mais également les caravanes et plus généralement l'ensemble des limites entre des surfaces de texture très différentes.

La limite entre le sable et toute autre surface voisine est toujours parfaitement définie.

La classification surligne la présence de zones « route » ou « roches » au sein de prairies par exemple. Ces zones représentent à priori des sites où la végétation est peut être très desséchée ou encore éparse, ce qui expliquerait la grande ressemblance avec des spectres de matériaux nus. L'indice NDVI est utilisé afin de corriger ce défaut. Les spectres dotés d'un NDVI -0.17 seront considérés comme des zones végétales.

Finalement, il n'a pas été possible de définir un indice permettant de différencier les affleurements rocheux entre eux, ni les affleurements rocheux des routes. Les spectres sont en effet trop proches (Illustration 21).

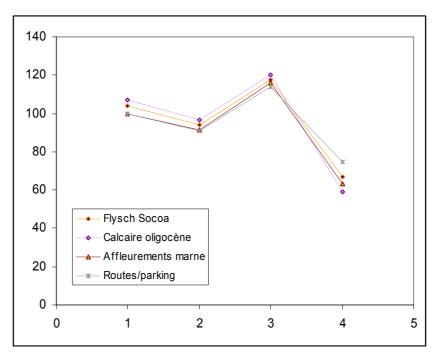


Illustration 21 – CN des routes parkings et affleurements rocheux dans les quatre bandes FORMOSAT

4.3. CLASSIFICATION BILAN

4.3.1. Classification hiérarchique descendante

L'arbre de décision général (domaines émergé et immergé) est reporté dans l'illustration 22.

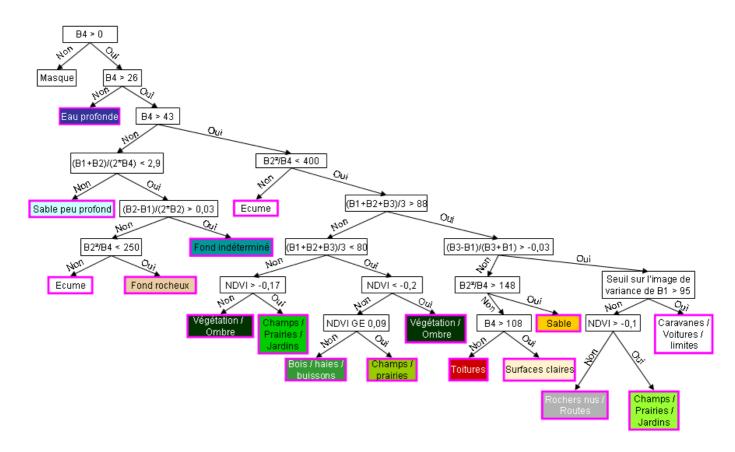


Illustration 22 : Arbre de décision générale

4.3.2. Limite de la classification

En superposant la carte aux observations photo-interprétées (au nombre de 359) et 3201 points DGPS, les faciès qu'il était possible ou non de discriminer à partir de la carte thématique obtenue à l'aide de l'arbre hiérarchique ont pu être déterminés. Un bilan est présenté sur l'illustration 23.

| Faciès | Discriminé / Non Discriminé |
|-------------------------------------|--|
| eau profonde | Discriminé |
| petits fonds sableux eau profonde | Discriminé |
| petits fonds rocheux | Discriminé |
| interface terre-mer | Discriminé |
| platier rocheux | Discriminé |
| ceinture d'algues | Non discriminé |
| ceinture d'algues et sable | Non discriminé |
| sable | Discriminé |
| éboulis | Non discriminé |
| pied de falaise (ou pied d'ouvrage) | Discriminé |
| ouvrages | Confondus avec affleurements |
| falaise | rocheux/routes |
| végétation sur la falaise | Confondus avec affleurements |
| venues d'eau | rocheux/routes |
| lithologie | Discriminé, sauf en cas d'ombres |
| sommet de la falaise | Non discriminé |
| routes | Non discriminé |
| habitations | Non discriminé ou Discriminé partiellement |
| végétation | Confondus avec affleurements rocheux |
| | Discriminé |
| | Discriminé |

Illustration 23 – Faciès discriminés

4.4. VALIDATION

L'analyse de validation de cette carte thématique montre plusieurs points (illustration 24 et 25).

Tout d'abord, l'ensemble des limites et faciès sont globalement bien définis. L'illustration 24 permet de définir la précision globale avec laquelle le principal faciès visé par cette étude doit être déterminé. Ce calcul se fait simplement en cumulant les scores pour lesquels une limite correspondant au pied de falaise (ou pied d'ouvrage) est déterminé, et en divisant le résultat par le nombre total d'observations DGPS correspondant au pied de falaise ou pied d'ouvrage. Le résultat de ce calcul montre que près de 81% des points de vérité terrain du pied de falaise ou pied d'ouvrage, correspondent à la limite définie comme le trait de côte sur la carte thématique. Les pixels classés « ombre » et « eau » n'ont pas été retenus dans le calcul.

Du point de vue de l'utilisateur, la carte faciologique ainsi que la définition du trait de côte est globalement de très bonne qualité. Certaines erreurs apparaissent

essentiellement au moment de la procédure qui met notamment en évidence des confusions entre des faciès de sable et de roche (Illustration 24). De même le platier rocheux est parfois confondu avec le faciès affleurement rocheux (Illustration 25). **Toutefois, en moyenne, les faciès sont reconnus dans près de 84% des cas.**

| | | DGPS et photo-interprétation | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-------|-------------------------------|--|--|
| | | Ouvrage/Sable Falaise/Sable | Ouvrage/Roche Falaise/Roche | Sable/ route | Sable/ végétation | Sable/ roche | Total | % précision utilisateur | | |
| | Ouvrage/Sable Falaise/Sable | 1574 | 7 | | | | 1581 | 100 | | |
| | Ouvrage/Roche Falaise/Roche | 194 | 591 | | | | 777 | 76 | | |
| | Sable/route | | | 13 | | | 13 | 100 | | |
| ique | Végétation/ Sable | | | | 12 | | 12 | 100 | | |
| nat | Sable/Roche | | | | 2 | 17 | 19 | 89 | | |
| Carte thématique | Végétation/ Roche | 3 | | | 4 | | 7 | | | |
| arte | Sable | 147 | | 6 | | 5 | 158 | | | |
| Ö | Affleurements Rocheux | 33 | 26 | | | 55 | 114 | | | |
| | Bois/bosquets/ Buissons | 4 | 4 | | | | 4 | | | |
| | Ombre | 37 | | | | | 41 | | | |
| | Eau | 3 | | | | | 3 | | | |
| | Total | 1992 | 628 | 19 | 18 | 77 | 2728 | | | |
| | % précision procédure | 79 | 94 | 68 | 67 | 22 | | | | |

Illustration 24 – Validation du pied de falaise

| | iliustration 24 – Validation du pied de Talaise | | | | | | | | | |
|------------|---|-------|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------|-------|-------------------------------|
| | | | DGPS et photo-interprétation | | | | | | | |
| | | Sable | Platier roch. | Affleur. rocheux | Bois, bosquet, buisson | Champs/ Jardins/ prairies | Routes /parkings | Toitures | Total | % précision utilisateur |
| | Sable | 31 | 2 | 2 | | | 1 | | 36 | 86 |
| | Platier rocheux | | 16 | | | | | | 16 | 100 |
| | Affleur. rocheux | 2 | 9 | 23 | | | | | 34 | 94 |
| lne | Bois/bosquet Buisson | | | | 75 | 2 | 23 | | 100 | 75 |
| thématique | Champs/Jardins prairies | | | | 4 | 65 | 8 | 1 | 78 | 83 |
| thé | Route/parkings | | | | 1 | 3 | 74 | 2 | 80 | 93 |
| rte | Toitures | | | | 1 | | 1 | 30 | 32 | 94 |
| Carte | Ombre | | | 1 | 1 | | | | 2 | |
| | Eau | 7 | 7 | | | | | | 14 | |
| | Total | 33 | 27 | 25 | 81 | 70 | 107 | 33 | 392 | |
| | % précision procédure | 94 | 59 | 92 | 73 | 93 | 69 | 91 | | |

Illustration 25 – Validation des principaux faciès

4.5. COMPARAISON ENTRE LA CARTE ET LES ORTHO-PHOTOS

Cette comparaison directe permet de mettre en évidence les points forts et les points faibles de la cartographie des faciès de la côte basque par imagerie spatiale. Le premier couple de photos montre la Pointe Saint-Martin (Illustration 26). Ce premier extrait permet de visualiser des zones urbaines. Les espaces naturels (en vert) montrent les mêmes aménagements sur l'image satellite classée et sur l'orthophoto. Globalement, la structure des espaces urbains (lotissements, maisons isolées, jardins, rues) est bien respectée. Seules les toitures ou terrasses claires (ciment ...) sont classées comme du sable, défaut non corrigeable pour le moment. Le golf (au centre), qui présente de la végétation rase (vert clair), des bosquets (vert plus intense) et sols nus (jaune pâle) est très bien reproduit. Les plages et zones rocheuses (falaises en gris, platier en ocre) semblent bien respectées. Le trait de côte (extrait de la cartographie Formosat et surligné en rouge) présente ici un défaut : il traverse parfois une zone d'ombre et est alors décalé dans l'espace.



Illustration 26 – La pointe Saint-Martin : cartographie FORMOSAT-2 (à gauche), photographie aérienne (à droite)

Un second extrait de la carte, choisi plus au sud (Côte des Basques) est présenté sur l'illustration 27. Cet extrait montre à nouveau la précision avec laquelle les zones urbaines et le réseau routier sont reproduits. Sur ce dernier, sont figurés de nombreux polygones pleins de couleur blanche figurant des véhicules repérés par le seuil de détection imposé sur l'image de variance de la bande 1 de la scène Formosat. Le littoral (sableux/rocheux) est également cartographié avec précision. Le trait de côte Formosat (en rouge) est superposé aux observations DGPS, qui dans cette zone, sont en parfaite adéquation spatiale.



Illustration 27 – La côte des Basque : cartographie FORMOSAT-2 (à gauche), photographie aérienne (à droite)

Un troisième extrait complète cette analyse, situé au niveau des falaises de flysch de la Corniche Basque (illustration 28). Ici, le trait de côte a été redessiné en utilisant à la fois l'image de variance qui indique un changement de texture entre le platier et la zone des falaises, laquelle est également mise en valeur par des effets d'ombre, si aucun point DGPS ne permet de confirmer le tracé du pied de falaise. Le sommet de falaise apparaît aussi par endroit : là où la végétation s'arrête franchement. Un tracé DGPS (croix rouges) superposé à la carte Formosat montre toutefois que cette règle n'est pas suffisamment générale pour être adoptée et utilisée pour définir le sommet de la falaise.

Ce dernier extrait permet également de visualiser des zones naturelles ou agricoles qui sont bien reproduites, à l'instar des routes et constructions isolées.

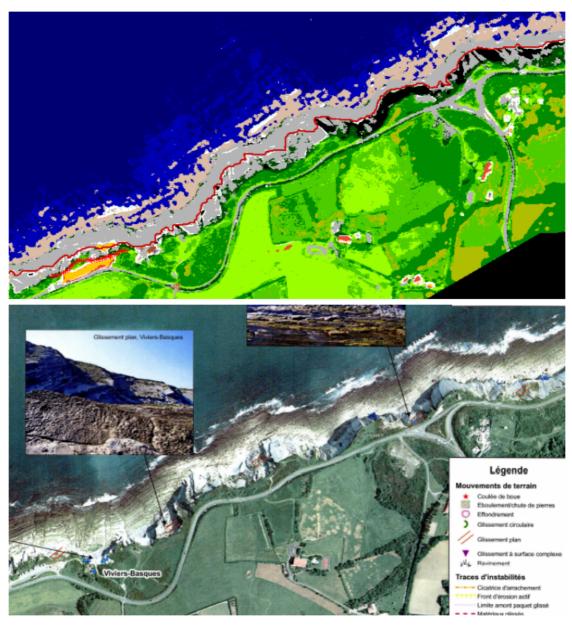


Illustration 28 – Les flyschs : cartographie FORMOSAT-2 (à gauche), photographie aérienne (à droite)

4.6. CONCLUSIONS

Cette méthode présente l'avantage d'offrir une approche simple et relativement précise de cartographie de l'ensemble des faciès et du trait de cote sur la côte Basque, sans connaissance a priori de la radiométrie des faciès que nous souhaitons cartographier.

Le trait de côte, par exemple est très bien reproduit, à l'exception des zones où il traverse une zone d'ombre. Le pied de falaise apparaît notamment tout à fait

accessible grâce à cette approche cartographique. Le pied d'ouvrage et le trait de côte en zone sableuse sont par ailleurs bien caractérisés.

Les résultats sont toutefois incomplets, car certains faciès ne sont pas discriminés, ou encore, restent confondus. De plus cette méthode n'est pas parfaitement reproductible : les seuils sur les indices définis ici dépendent des CN (comptes numériques) qui ne sont que partiellement liés à la radiométrie réelle in situ, une importante proportion de ces CN sont liés aux effets atmosphériques. Il convient donc sur une autre zone ou une autre date de reproduire l'analyse statistique afin d'établir des seuils adéquats.

5. Classification sur la base du recuit simulé

5.1. CHOIX DES ZONES D'INTERET ET LABELLISATION

Quatre zones (Illustration 29) représentatives des côtes sableuses (en vert), rocheuses (jaune et cyan) et des zones urbaines (rouge), ont été choisies pour tester le recuit simulé. Ces quatre zones ont respectivement des superficies totales de 21 289, 23 246, 25 848 et 9 798 pixels. Pour chacune d'entre elles sont calculés 15 ROIs. Ces ROIs ont été labellisés à l'aide des ortho photos.

Pour ces calculs, l'image sur laquelle les zones d'ombre ont été masquées est utilisée afin d'éviter des temps de calcul sur des zones filtrées par ailleurs.

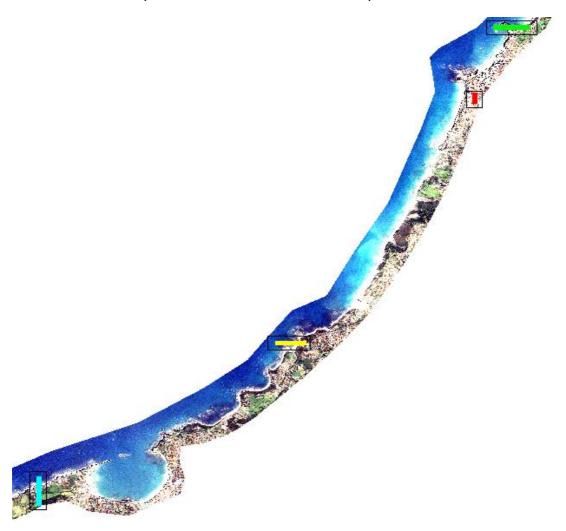


Illustration 29 – Zones (rectangles colorés) sur lesquelles a été testé le recuit simulé.

La séparabilité radiométrique entre les 60 ROIs obtenus a été testée à l'aide des méthodes de Jeffries-Matusita et Transformed Divergence (sous ENVI). Les ROIs les moins distincts sur le plan spectral ont été fusionnés, ne laissant au bout du compte que 40 ROIs pour entraîner une classification supervisée.

Lors de ces tests, il est apparu que les affleurements rocheux et les routes étaient très proches sur le plan spectral. Au demeurant, au niveau de la pointe Saint-Martin le recuit simulé s'est montré inefficace pour différencier ces deux types de couvert (illustration 30). Les affleurements rocheux émergés (en dehors de l'estran) sont représentés par deux classes de couleur rose et corail, le rose étant réservé aux parties un peu plus sombres de la roche. Les routes et parkings sont également représentés par ces deux classes, la répartition des teintes étant la même.

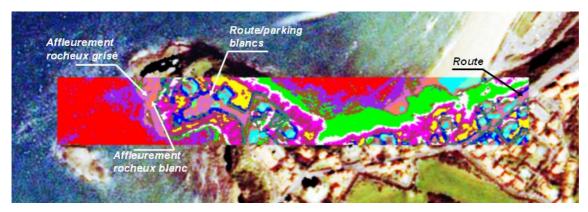


Illustration 30 – Résultat de la classification à partir du recuit simulé sur la Pointe Saint Martin

Après labellisation et comparaison des classes, 40 classes sont reconnues et testées, à partir de ces zones d'entraînement, plusieurs méthodes de classification supervisée :

- Le minimum de distance ;
- Le maximum de vraisemblance ;
- La méthode de Mahalanobis.

5.2. CLASSIFICATION SUPERVISEE

D'un point de vue visuel, les trois méthodes de classification supervisée n'offrent pas une apparence cohérente de la zone marine : une forte variabilité de la réflectance (liée en partie à la turbidité naturelle et au scintillement de la surface de l'eau) impose une classification erronée de nombreux pixels classés « eau peu profonde ».

Mais de façon générale, c'est la méthode de Mahalanobis qui offre le meilleur aspect visuel (à l'exception des zones en eau) à la classification supervisée basée sur les zones d'intérêt définies par la méthode du recuit simulé. Si la carte issue de la méthode de Mahalanobis est la plus « esthétique », elle est toutefois un peu moins détaillée que celle issue de la classification par maximum de vraisemblance dont l'effet

de fractionnement des surfaces, est très peu propice à l'analyse visuelle aisée. C'est donc la carte de Mahalanobis qu'il est choisi de présenter ici. Une comparaison directe de l'ortho-photo avec les classifications hiérarchiques et la classification à l'aide de la méthode de Mahalanobis est présentée sur l'illustration 31. Les coloris utilisés pour la classification ne sont pas tous identiques, mais les ensembles classés sont proches. La classification de Mahalanobis est moins précise pour les zones urbaines (manque d'observations pour contraindre correctement - variété suffisante, labellisation adéquate - les zones d'entraînement). En revanche, les zones sableuses sont plus richement définies (en fonction par exemple de l'humidité du sable). Des écueils apparaissent sur les deux cartographies : confusion des routes et zones rocheuses, confusion des toitures de ciment et zones sableuses. Mais globalement l'identification du trait de côte semble correcte dans tous les cas. Afin de la renforcer, nous avons superposé les limites obtenues précédemment sur l'image de variance calculée à partir de la bande 1 de FORMOSAT.



Illustration 31 – Vue de la Pointe Saint Martin par imagerie FORMOSAT classée à l'aide d'un arbre hiérarchique (à gauche), de la classification de Mahalanobis entraînée par des ROIs « recuit » (à droite), et photographie aérienne (au centre)

5.3. VALIDATION

A l'instar de celle proposée pour la classification hiérarchique descendante, une analyse de la validité de la carte obtenue par classification supervisée a été menée. Les résultats sont reportés dans les illustrations 32 et 33. Les résultats de cette analyse montrent, qu'en moyenne, les limites de faciès (hors pixels classés « ombre et « eau ») sont obtenues avec une précision de près de 76%. Les faciès sont reconnus à un peu plus de 73%. Si ces résultats sont un peu moins bons que ceux obtenus avec l'arbre de décision, ils restent toutefois très corrects et permettent d'envisager une forte amélioration de ces scores si les résultats du recuit simulé peuvent être mieux qualifiés, notamment à l'aide d'une bibliothèque de spectres in situ.

La comparaison des tableaux de validation pour le trait de côte (illustration 24 et 32) montre que ce sont surtout les scores de la procédure qui diffèrent. Certaines limites

sont mieux définies à l'aide de l'arbre de décision. Du point de vue de l'utilisateur, la carte obtenue par classification supervisée basée sur les ROIs définis par recuit simulé est apparemment un peu meilleure, les scores étant en général plus élevés pour toutes les limites. Toutefois, ce sont 2417 observations DGPS qui se superposent à des limites (tous types de faciès confondus) cartographiées par l'arbre de décision, contre 2025 pour la classification supervisée. Ainsi, si on fait abstraction des types de faciès qui déterminent une limite, la carte obtenue par classification hiérarchique descendante offre une vision bien plus complète du pied de falaise dans son ensemble.

| | | DGPS et photo-interprétation | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-------|-------------------------------|--|--|
| | | Ouvrage/Sable Falaise/Sable | Ouvrage/Roche Falaise/Roche | Sable/ route | Sable/ végétation | Sable/ roche | Total | % précision utilisateur | | |
| | Ouvrage/Sable Falaise/Sable | 1508 | | | | | 1508 | 100 | | |
| | Ouvrage/Roche Falaise/Roche | 15 | 462 | | | | 477 | 97 | | |
| | Sable/route | | | 13 | | | 13 | 100 | | |
| idne | Végétation/ Sable | | | | 14 | | 14 | 100 | | |
| nati | Sable/Roche | | | | | 9 | 9 | 100 | | |
| Carte thématique | Végétation/ Roche | | | | 4 | | 4 | | | |
| arte | Sable | 320 | | 6 | | 11 | 337 | | | |
| Ö | Affleurements Rocheux | 68 | 157 | | | 57 | 282 | | | |
| | Bois/bosquets/ Buissons | 4 | | | | | 4 | | | |
| | Ombre | 80 | 9 | | | | 89 | | | |
| | Total | 1995 | 628 | 19 | 18 | 77 | 2737 | | | |
| | % précision procédure | 76 | 74 | 68 | 78 | 12 | | | | |

Illustration 32 – Validation du pied de falaise à partir de données DGPS

| | | | DGPS et photo-interprétation | | | | | | | |
|------------|-------------------------|-------|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------|-------|-------------------------------|
| | | Sable | Platier roch. | Affleur. rocheux | Bois, bosquet, buisson | Champs/ Jardins/ prairies | Routes /parkings | Toitures | Total | % précision utilisateur |
| | Sable | 35 | 1 | | | | | | 36 | 97 |
| | Platier rocheux | | 15 | | | | | | 15 | 100 |
| | Affleur. rocheux | 3 | 16 | 26 | 3 | | | | 48 | 88 |
| lne | Bois/bosquet Buisson | | | | 59 | 8 | 30 | | 97 | 61 |
| thématique | Champs/Jardins prairies | | | | 9 | 51 | 4 | 1 | 65 | 78 |
| thé | Route/parkings | | | | 3 | 10 | 71 | 11 | 95 | 75 |
| <u>e</u> | Toitures | | | | | | 2 | 21 | 23 | 91 |
| Carte | Ombre | | | | 8 | 1 | | | 9 | |
| | Eau | 2 | 2 | | | | | | 4 | |
| | Total | 38 | 32 | 26 | 74 | 69 | 107 | 33 | 392 | |
| | % précision procédure | 92 | 47 | 100 | 80 | 74 | 66 | 64 | | |

Illustration 33 – Validation des faciès obtenus par classification supervisée à partir d'observations DGPS et photo-interprétées

6. Conclusion

L'étude des faciès géomorphologiques de la côte rocheuse du Pays Basque a été réalisée à partir de données du satellite Formosat-2 acquises en août 2007 pour la cartographie de la côte aquitaine sableuse.

Deux approches ont été suivies : la classification hiérarchique descendante et la classification supervisée sur la base de zones d'entraînement définies par recuit simulé.

1. La classification hiérarchique descendante est basée sur une analyse radiométrique des différentes longueurs d'onde de Formosat-2 pour démontrer la possibilité de différenciation de faciès au niveau du domaine immergé et du domaine émergé. Cette analyse fait référence à des valeurs brutes d'une part, mais aussi à des indices combinant différentes longueurs d'onde d'autre part.

L'analyse statistique réalisée sur plusieurs transects a constitué la base des arbres de décisions conduisant à la différenciation progressive des faciès.

Concernant le domaine immergé, les faciès identifiés sont l'eau profonde, les petits fonds sableux, les petits fonds rocheux, l'interface terre-mer et le platier rocheux.

L'analyse du domaine émergé est basée en partie sur l'indice de végétation normalisé. Un arbre de décision permet d'identifier la végétation sur falaise, la végétation « autre », le sable, le pied de falaise et les habitations. Des confusions persistent quant à la discrimination des ouvrages, des falaises et du sommet de la falaise. Certains faciès tels que la ceinture d'algues ou les éboulis restent non discriminés par l'imagerie Formosat-2.

La confrontation des faciès extraits de Formosat-2 avec les relevés terrain DGPS et les interprétations sur photographies aériennes est de 84% en suivant cette approche.

2. Trois méthodes de classifications supervisées (minimum distance, maximum de vraisemblance et Mahalanobis) ont été appliquées, après une sélection de zones d'entraînement définies par la méthode du recuit simulé (EPOC).

La méthode de Mahalanobis offre le meilleur aspect visuel à la classification supervisée basée sur les zones d'intérêt définies par la méthode du recuit simulé.

La confrontation avec les données de terrain ou d'interprétation indique une précision de 76%.

La bande SPOT 5 SWIR n'ayant pas été livrée au moment de la rédaction de ce rapport, nous n'avons pu tester le potentiel de l'imagerie SPOT 5 pour mettre en évidence les venues d'eau le long de la côte rocheuse. Une rapide inspection de la bande PIR, également sensible à l'humidité, ne montre pas une relation très nette

entre les venues d'eau constatées sur le terrain, et une variation particulière de la radiométrie dans le proche infrarouge à proximité des zones à priori impactées. Toutefois, la bande PIR est moins sensible que la bande SWIR. Nous testerons donc cette approche très prochainement.

7. 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.

Gao, B.-C. (1996). NDWI -- A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266.

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 52 p., 36 ill.

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.



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