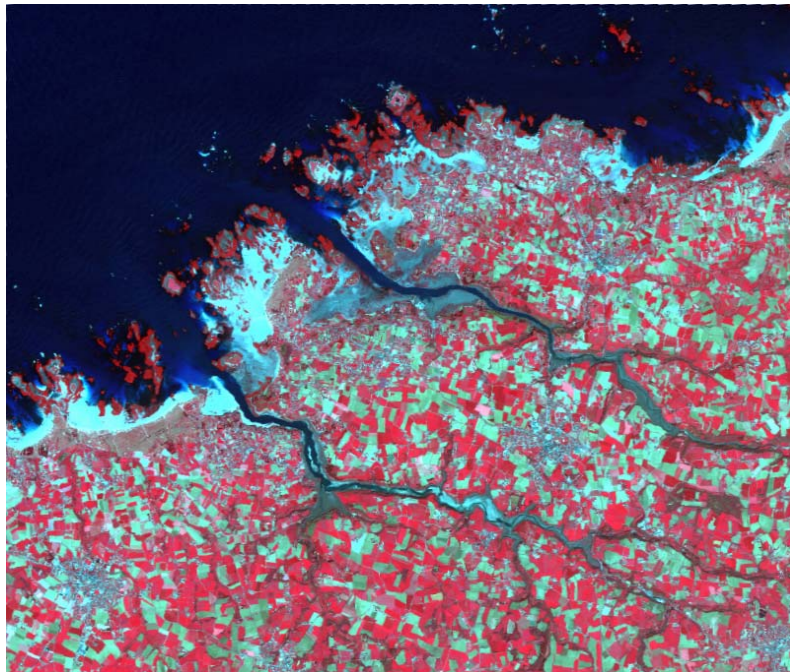


DYNECO/VIGIES

Utilisation de SPOT pour la cartographie bio-sédimentaire des estrans



université
PARIS
PARIS 7
DIDEROT



Amparo Pérez Escobar

lframer

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
APPROCHE CONTEXTUEL/CADRE DE STAGE	2
1) CONTEXTE	2
1.1) Présentation de l'IFREMER.	2
1.2) Présentation de REBENT/MESH	2
2)OBJECTIFS	4
3)ZONE D'ETUDE	5
4)ETAT DES CONNAISSANCES	6
5)MOYENS TECHNIQUES	7
5.1)Description générale des données.	7
5.2)Matériel	11
APPROCHE METHODOLOGIQUE ET ANALYSE DES RESULTATS	12
1) METHODOLOGIE	12
2) PRETRAITEMENTS	14
2.1) Géoreferencement	14
2.2) Calibration radiométrique	15
2.3) Création de la sous-scène des Abers.	
Application des masques.	17
2.4) Préparation des zones d'échantillonnage	18
3) CLASSIFICATION	19
3.1) Classification supervisée.	19
3.2) Differentiation de la classe « sable » en 5 catégories.	22
DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES	27
1) DISCUSSIONS	27
2) PERSPECTIVES	28

INTRODUCTION

Ce document constitue le rapport de stage finalisant ma formation Master Professionnel (TGAE) Télédétection et Géomatique Appliquées à l'Environnement. Le stage s'est déroulé au centre IFREMER de Brest, au sein du Département de Dynamiques de l'Environnement Côtier (DYNECO), dans le service VIGIES (Valorisation de l'Information pour la Gestion Intégrée et la Surveillance)

L'objectif du stage était de mettre en place une filière cartographique basée sur l'imagerie SPOT qui puisse restituer les grandes unités bio-sédimentaires des estrans. L'estran, partie du littoral situé entre les niveaux des plus hautes et des plus basses mers, est en effet encore aujourd'hui largement méconnu, alors qu'il nécessite une action d'urgence car, outre sa richesse, c'est la zone la plus immédiatement atteinte par les pollutions. Parmi les lacunes, on note l'absence d'une description globale de l'ensemble des faciès bio-sédimentaires en présence. Les données issues du satellite SPOT présentent l'avantage, en comparaison par exemple à des orthophotographies, d'être assez rapidement disponibles sur l'ensemble du linéaire côtier par programmation.

Le développement d'une méthodologie robuste de traitement pour extraire d'une image SPOT les principaux faciès intertidaux permettrait par conséquent de réaliser un inventaire complet de ces faciès, et ce à une échelle moyenne du 1/50000 environ.

Le travail mené s'est inscrit dans le cadre du projet Interreg MESH (Marine European Seabed Habitat). MESH est un programme européen de cartographie qui a comme objectifs non seulement la production d'une cartographie homogène d'habitats marins sur la zone du nord-ouest de l'Europe, mais aussi la mise en place de méthodologies originales et reproductibles visant à combler certaines lacunes, typiquement les déficiences évoquées plus haut concernant l'estran. Les résultats de mon travail intéressent aussi fortement le REBENT, réseau de surveillance des biocénoses benthiques coordonné par l'Ifremer, qui s'appuie pour la réalisation de ses synthèses cartographiques sur les méthodes développées dans le cadre de MESH.

Le présent document s'articule autour de deux grandes parties :

- La première partie s'attachera à présenter le cadre du stage, dont l'IFREMER et les projets MESH et REBENT, les objectifs du travail, les études existantes sur le sujet, ainsi que la zone d'étude et les moyens techniques utilisés.
- La seconde partie illustrera quant à elle la méthodologie adoptée, où l'on expliquera chaque étape du traitement utilisé pour aboutir au produit final.

1) CONTEXTE

1.1) Présentation de l'IFREMER.

L'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), établissement public à caractère industriel et commercial, est placé sous la tutelle conjointe du Ministère de l'Education nationale, de la Recherche et de la Technologie, du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et du Ministère de l'Equipement, du Transport et du Logement.

L'IFREMER est implanté sur 24 sites répartis sur le littoral métropolitain et d'outre-mer. Il se compose de 5 centres (Boulogne-sur-mer, Brest, Nantes, Toulon, Tahiti) dirigeant différentes stations. Le siège est basé à Issy-les-Moulineaux (92).

Ainsi, il est devenu l'unique établissement public chargé de conduire des recherches sur le milieu marin, son exploitation et sa protection dans le but de connaître, évaluer et mettre en valeur les ressources des océans et permettre leur exploitation durable, améliorer les méthodes de surveillance, de prévision d'évolution de protection et de mise en valeur du milieu marin et côtier et favoriser le développement économique du monde maritime.

Le département qui m'a accueilli, DYNECO, est chargé de l'observation et de la modélisation des dynamiques de l'environnement littoral et ceci à des fins essentiellement environnementales. Il a pour objectif de développer les connaissances des processus physiques et biologiques de l'environnement côtier et de mettre en place des outils de surveillance et de prévision de l'état du milieu côtier. De nombreux domaines de compétences sont impliqués dans ces activités : océanographie physique et mouvements sédimentaires, hydrologie, biologie benthique et phytoplanctonique (dynamique des populations, écophysiologie,...). Ils sont répartis dans quatre unités, dont le service VIGIES, au sein duquel j'ai effectué mon stage, service en charge des projets REBENT et MESH.

1.2) Présentation de REBENT et MESH

REBENT

Les événements récents (tempêtes, naufrages de l'Erika et du Prestige), le besoin de gestion intégrée de la zone côtière, le manque de données homogènes et centralisées sur l'ensemble du littoral ont conduit en 2000 à la mise en place d'un réseau de suivi des biocénoses benthiques : le REBENT.

Les espèces benthiques littorales constituent en effet des témoins permanents de l'environnement car elles intègrent les caractéristiques écologiques locales, soumises à des fluctuations naturelles ou générées par les activités humaines. Des transformations du milieu marin côtier, et du compartiment benthique en particulier, ne cessent de s'accroître et il importe, pour en mesurer les conséquences et fournir des éléments de gestion, de développer leur surveillance à long terme.

L'objectif principal du REBENT est de suivre à moyen et long terme les évolutions du benthos. Ce suivi concerne à la fois le niveau intertidal (ou estran), zone de balancement des marées, et le niveau subtidal qui s'étend de la façade littorale à 30 m de profondeur environ. Pour y parvenir, le réseau met en œuvre de nombreux moyens techniques : bateaux, engins de prélèvements (bennes, chalut, etc.), acoustique ou imagerie sous-marine pour la partie subtidale ; pour la partie intertidale orthophotographies, données satellite, LIDAR, CASI, et même de l'imagerie acquise par le biais d'un ULM.

La première phase a consisté en la mise en place d'un site pilote en Bretagne, pleinement opérationnel depuis 2003.

Dans le cadre de ce pilote, le REBENT intervient à 3 niveaux correspondant à différentes échelles :

- un niveau "zonal général", chargé des actions de synthèse cartographiques visant à favoriser rapidement le porter à connaissance et la vision cohérente d'ensemble au niveau régional.
- un niveau "sectoriel", dont le but est de renseigner le contexte des stations, de suivre localement les fluctuations des principales biocénoses et d'acquérir des références cartographiques pour les besoins de gestion. Ce niveau permet de cartographier les différents habitats en présence de manière très fine (ordre de 1/10.000), mais ne concerne qu'une très petite partie du littoral. (Environ 10%).
- un niveau "stationnel", pour préciser, en des stations représentatives des biocénoses majeures, les évolutions qualitatives et quantitatives de la biodiversité benthique. Ce niveau permet de mesurer finement l'évolution des habitats.

L'IFREMER intervient en tant que coordinateur et participe largement aux niveaux « zonal général » et « sectoriel ». Le niveau « stationnel » est pour sa part entièrement pris en charge par de très nombreux scientifiques.

Le réseau a aujourd'hui pour vocation à être national, des actions se mettant progressivement en place dans les autres régions. Le REBENT constituera donc à terme un système de veille pour détecter les événements d'origine chronique ou accidentelle comme les marées noires, et l'évolution des biocénoses benthiques (expansion spatiale, composition et abondance spécifique), sur l'ensemble du littoral français.

MESH

Le projet MESH est un programme international de cartographie des habitats benthiques qui a démarré en 2004 pour une durée de 3 ans et qui est financé par le programme européen INTERREG IIIb. Il a pour but de collecter toutes les cartes d'habitats et travaux existants sur les côtes du nord-ouest de l'Europe et de les harmoniser avec les mêmes critères de classification, de développer des protocoles et d'établir des modèles de prédiction pour cette région. Ce projet vise à produire des cartes d'habitats et à mettre en place un moyen de communication et d'échange de données entre les 12 organismes membres du projet, qui proviennent de France, Belgique, Grande-Bretagne, Pays-Bas et Irlande.

Les produits attendus de Mesh sont des cartes interactives sur le web (accompagnées de métadonnées), des guides de bonne pratique pour la conduite de projets de cartographie des habitats (levés, traitement, interprétation), des exemples d'études pilotes dans le domaine de la

gestion intégrée, une base de données d'utilisateurs, et enfin une conférence finale avec publication.

Les objectifs du projet se répartissent en différentes actions, les différentes tâches des actions étant distribuées entre les pays membres du projet. L'IFREMER participe à trois de ces actions, à savoir :

- Action 1 : production des cartes d'habitats marins dans la région du nord-ouest de l'Europe ;
- Action 2 : développement des normes et des protocoles de cartographie des habitats marins. C'est dans cadre de cette action que s'est déroulé mon stage;
- Action 4 : modélisation prédictive.

Le but final du projet est, pour résumer, de fournir des méthodes de cartographie des habitats benthiques et d'établir des modèles de prédiction de ces habitats permettant de réduire les coûts engendrés par les prélèvements et les échantillonnages biologiques.

En conclusion MESH et REBENT sont des projets extrêmement complémentaires. Tandis que MESH a pu profiter de l'inventaire cartographique effectué par le REBENT sur tout le littoral breton, il vient pour sa part en appui méthodologique au REBENT.

2) OBJECTIFS

Le REBENT a la double vocation d'être d'une part un outil de surveillance du benthos mais aussi un outil de connaissance de notre patrimoine naturel. Ces deux besoins se distinguent nettement au plan stratégique : le premier requiert une composante largement plus temporelle que spatiale, à l'inverse du second. Or c'est bien le fort besoin d'inventaire en zone littorale qui a déclenché la mise en place du Rebent en Bretagne, à la suite de la catastrophe de l'Erika qui avait montré une fois encore les larges lacunes existant dans ce domaine.

Parmi ces lacunes, figure en premier lieu, le "ruban blanc" que constitue l'estran. Cette zone ne fait en effet aujourd'hui l'objet d'aucune entreprise d'inventaire homogène, les seules réalisations étant le fait de démarches locales (universités, certains départements, etc.). S'il est vrai que ce besoin est partiellement satisfait par l'action REBENT de suivi de la couverture végétale intertidale (fuciales) par télédétection satellitaire et des herbiers à partir d'orthophotographies, opérations qui devraient être renouvelées tous les 5 ans environ, il manque cependant très clairement une description plus globale de l'ensemble des faciès en présence. Une connaissance même sommaire mais homogène à échelle moyenne sur un large territoire permettrait en effet de faire des évaluations surfaciques et des comparaisons entre secteurs qui font aujourd'hui défaut. Une telle description pourrait aussi être proposée à tous les départements envisageant des plans POLMAR de lutte anti-pollution.

C'est pour tenter de combler cette lacune que mon travail a été effectué. L'objectif de l'étude est d'établir une méthodologie de traitement d'images SPOT5 à 10 mètres de résolution pour restituer les grandes unités bio-sédimentaires des estrans. La mise au point de la méthodologie devait se faire à partir d'une scène prise en 2003 dans les Abers finistériens.

3) ZONE D'ETUDE

On appelle "Les Abers" une zone du Nord Finistère comprenant deux abers (ou rias) : l'Aber Benoît et l'Aber Wrac'h. Ces deux abers sont séparés par la presqu'île de Sainte-Marguerite.

D'un point de vue géomorphologique, les Abers constituent une zone assez hétérogène qui comprend des portions de falaises meubles, de côtes rocheuses, des ensembles dunaires et des grands estrans.

L'estran aux Abers est caractérisé par l'alternance de substrat rocheux formant de nombreux îlots et des amoncellements de roches et sédiments de sable fin à grossier. Certaines baies abritées peuvent également être envasées. Sur le substrat rocheux peuvent se développer les ceintures de macroalgues. Les deux rias sont occupés en aval par des fonds sableux, passant progressivement vers l'amont à des substrats sablo-vaseux à vaseux.

A noter également que c'est l'une des zones les plus suivies par le REBENT, tant au niveau sectoriel que stationnel.

Concrètement, la sous-scène que nous avons traitée s'étend d'ouest en est des communes de Ploudalmézeau à Plouguerneau (Figure 1).

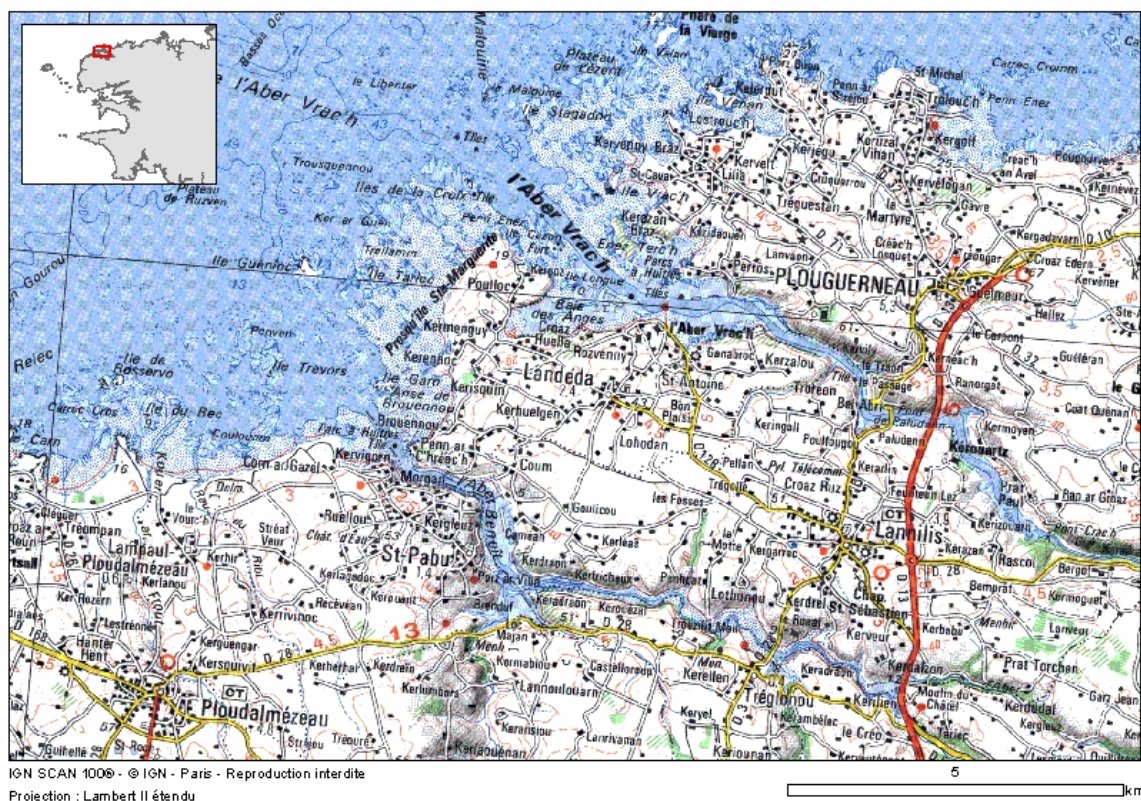


Figure 1 : Carte IGN des Abers

4) ETAT DES CONNAISSANCES

La littérature faisant état de retours d'expériences sur l'interprétation de l'imagerie SPOT pour l'étude de la zone intertidale en Bretagne n'est pas très abondante. Cependant, un certain nombre de documents nous a permis d'obtenir de l'information sur ce sujet. Parmi ceux-ci, citons :

- **Evaluation du potentiel de l'imagerie SPOT 5 dans le secteur du bassin d'Arcachon : Cartographie du milieu lagunaire et du littoral océanique.** Il s'agit d'un projet réalisé en collaboration par des professionnels de METHYS, de l'UMR 5805 EPOC, l'Université de Bordeaux, et le BRGM. Ce travail a pour objet l'utilisation d'images satellites SPOT 5 pour cartographier le milieu lagunaire du bassin d'Arcachon, ainsi que la façade océanique (contours des barres intertidales et des baïnes, haut de plage, dunes embryonnaires, blanches et grises, forêt). Les résultats sont comparés à ceux obtenus par photo-interprétation et par les mesures directes sur le terrain.
- **Atlas POLMAR de sensibilité du Finistère.** Ce travail a été réalisé par le CEDRE (Centre de Documentation de Recherche et d'Expérimentation sur les Pollutions Accidentelles des Eaux) pour présenter une synthèse de la sensibilité des espaces côtiers et permettre d'orienter les choix d'une stratégie de lutte visant à préserver les zones les plus sensibles lors d'une pollution accidentelle des eaux sur le littoral. Cet atlas synthétise et cartographie toutes les données permettant d'établir les différents niveaux de sensibilité du littoral en fournissant les bases d'un inventaire des sites sensibles du littoral.
- **Cartographie synthétique de l'environnement littoral du Finistère : exploitation de SPOT5 pour la cartographie de l'estran, du trait de côte et de l'occupation du littoral.** Il s'agit d'un rapport réalisé par le laboratoire GEOMER de l'Université de Bretagne Occidentale (UBO), associé au Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF). L'objet de ce projet est de tester les possibilités de SPOT 5 pour la cartographie de l'estran, du trait de côte et de l'occupation du littoral. Les résultats exposés dans ce rapport montrent notamment les possibilités de l'imagerie spatiale pour la cartographie morpho-sédimentaire de la zone intertidale à partir d'une image SPOT à 2,5 mètres de résolution et les potentialités de ce support par rapport à celles de la photographie aérienne.
- Enfin diverses études ont été effectuées dans le cadre du REBENT sur la **dynamique spatiale du couvert végétal en zone intertidale**. Il s'agit de cartes réalisées par interprétation d'images SPOT à 20 et 10 mètres de résolution. Des images acquises à des époques différentes ont été utilisées dans le but de mettre en évidence les évolutions de la couverture algale au cours du temps. Les secteurs de Paimpol / Bréhat, Finistère Nord, Quiberon / Croisic et Concarneau / Glénan ont ainsi pu être traités.

Parmi ces documents, c'est « Evaluation du potentiel de l'imagerie SPOT 5 dans le secteur du bassin d'Arcachon » et « Cartographie synthétique de l'environnement littoral du Finistère » qui nous ont le plus apporté, car en exposant tout le potentiel des images SPOT pour la détermination des habitats marins, ils nous ont permis de prendre connaissance à la fois des qualités et des défauts des images SPOT dans le domaine.

5) MOYENS TECHNIQUES

5.1) Description générale des données

Images satellitaires :

Image SPOT5 à 10 mètres : La scène Spot (*voir figure2*) a été acquise le 18 avril 2003 à 11h34m05s TU. Tous les traitements ont été effectués sur cette scène. Les autres données ont simplement servi à vérifier et comparer l'information.

La scène dispose de 4 bandes spectrales. Les deux premières bandes correspondent au domaine spectral du visible et les deux dernières à l'infrarouge :

Bande 1 (XS1) : vert (0.50 – 0.59 μm)

Bande 2 (XS2): rouge (0.61- 0.68 μm)

Bande 3 (XS3): proche infrarouge (0.78 – 0.89 μm)

Bande 4 (XS4): moyen infrarouge (1.58-1.75 μm)

XS1, XS2 et XS3 ont une résolution spatiale de 10 mètres de résolution et XS4 a une résolution spatiale de 20 mètres.

Le coefficient de marée a pu être calculé par le biais d'utilitaires accessibles depuis le site web du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). Il était, lors de la prise de l'image, de 117. Un coefficient aussi élevé est idéal. Il nous a permis de disposer d'une image montrant le quasi totalité de la zone intertidale sur les Abers, d'autant plus que la basse mer était ce jour là à un horaire très proche de la prise de vue (11h53 TU).

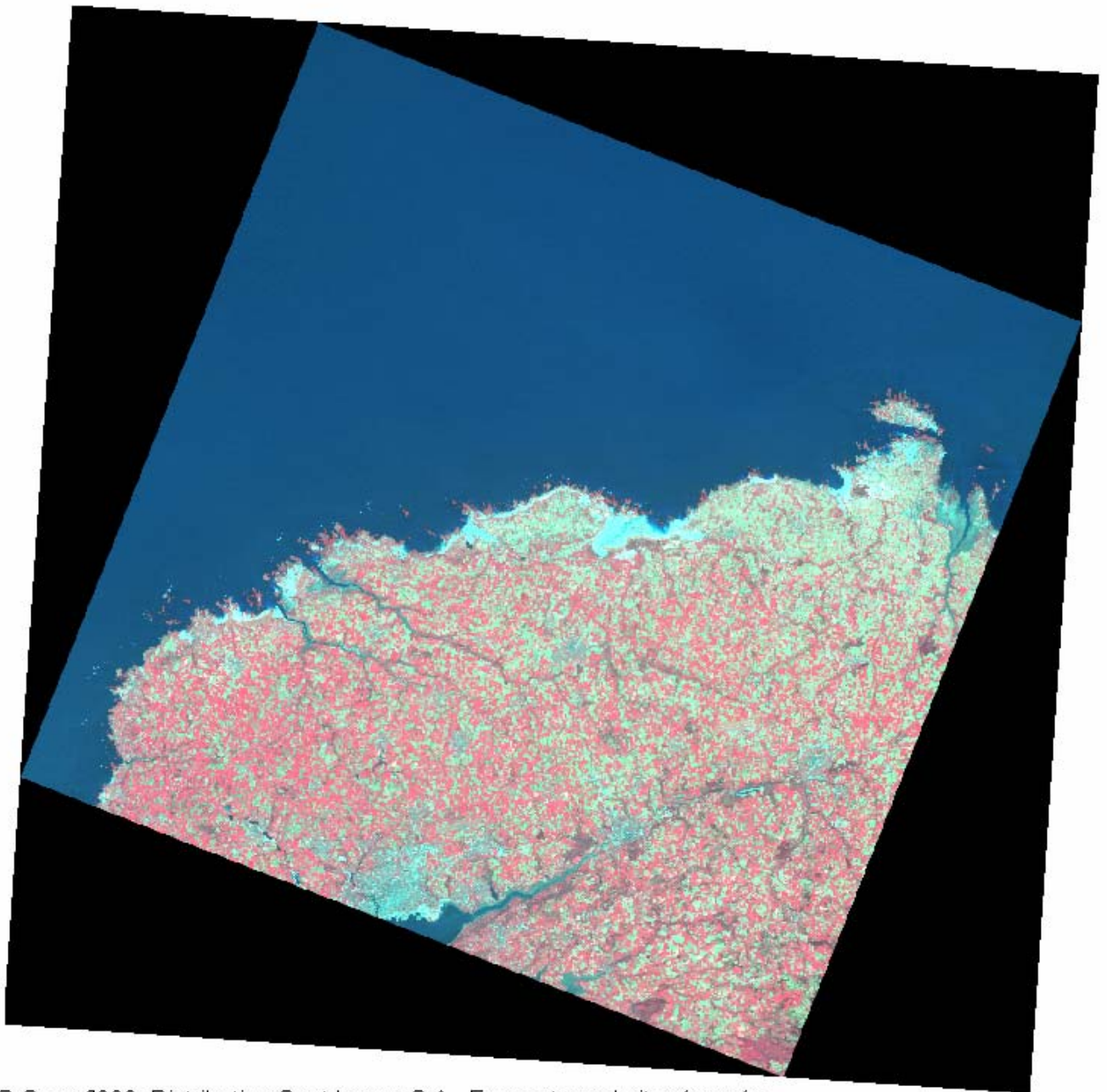
Ajouté à cela, la très faible nébulosité sur la scène et les bonnes conditions météorologiques nous ont permis de disposer d'une image de la meilleure qualité pour notre étude.

Les caractéristiques de la scène utilisée sont décrites ci-dessous :

Satellite	SPOT 5
Instrument	HRG 2
Date de prise de la scène	18/04/03 11h34m05s
Localisation	48°58'19" N 4°38'1"W
Résolution spatiale	10 mètres
Résolution spectrale	4 bandes
Taille de la scène	60km X 60km
Nombre de pixels	3600
Projection cartographique	UTM WGS84

Tableau 1 : Caractéristiques de la scène.

Scène SPOT5 (résolution 10 m) du Nord Finistère



© Cnes 2003, Distribution Spot Image S.A., France tous droits réservés.

0 4 080 8 160 16 320 24 480 32 640
Meters



Figure 2 : Scène SPOT du nord Finistère (10 m)

Image SPOT 5 à 2.50 mètres : Nous avons également pu disposer d'une sous-scène SPOT à 2,50 mètres de résolution centrée sur les Abers, résultant de la fusion de l'image SPOT à 10 mètres avec deux images panchromatiques à 5 mètres. Mais si sa résolution spatiale est meilleure, la résolution spectrale de cette image est moins bonne, ce traitement n'ayant pas été appliqué par SPOT Image au moyen infrarouge. Elle ne contient en effet pas d'information supplémentaire dans le proche infrarouge, mais uniquement dans le visible (rouge, vert). On ne dispose donc au final que de XS1, XS2 et XS3 uniquement. Cette image nous a néanmoins servi à photo-interpréter pour détecter visuellement quelques zones plus difficiles à identifier sur celle de 10 mètres.

Orthophotographie littorale :

A la demande du Comité interministériel d'aménagement et de développement du territoire (CIADT) du 28 février 2000, suite à la marée noire et aux tempêtes de décembre 1999 et dans le but d'améliorer les capacités de prévention des risques et à renforcer les capacités de veille, d'expertise et d'études, une orthophotographie des côtes de la Mer du nord, de la Manche et de l'Atlantique a été réalisée par l'IGN.

Cette orthophotographie, d'une résolution de 50 cm, devait répondre aux exigences suivantes, établies par l'IFREMER et le SHOM :

- les axes de vol devaient être adaptés à l'orientation des côtes,
- pour s'assurer que l'estran soit découvert, au moment de la prise de vue le coefficient de marée ne devait pas être inférieur à 95, et la hauteur d'eau ne devait pas excéder 1 m,
- dans les estuaires, rias, abers ou havres les prises de vues devaient s'effectuer jusqu'à la limite de salure des eaux.

Du fait de sa très bonne résolution l'orthophotographie littorale a constitué un support additionnel à l'image SPOT, surtout pour la vérification des données et l'identification plus aisée de certains habitats pas toujours évidents à reconnaître sur une image satellite. La figure 2 illustre l'orthophotographie littorale de la zone d'étude.



Figure 3 : Ortho-photographie littorale des Abers.

Géodatabase

Dans le cadre du REBENT une base de données géoréférencées a été développée pour le stockage des données acquises sur le terrain lors de missions intertidales sectorielles. Cette base de données est au format Geodatabase®, format natif de stockage du logiciel ArcGIS®. Outre le stockage, elle permet la consultation depuis ArcMap®, après avoir cliqué sur une station, d'un formulaire contenant toutes les informations relevant de la dite station : prélèvements effectués, faune et flore observées, photographies de terrain, etc. (Figure 3). Dans le cadre du stage nous l'avons utilisée pour récupérer des données de validation, ainsi que pour la construction de nos zones d'entraînement pour la classification.

Figure 4 : Formulaire de la géodatabase REBENT.

Données radiométriques

Ce sont des données de terrain mesuré avec un radiomètre, un instrument portable équipé d'une tête optique qui sert à calibrer la luminance ou la réflectance d'un pixel au sol. Des mesures de réflectance sur les Abers ont été acquises par le CEVA (Centre d'Etude et de Valorisation des Algues). Nous nous sommes appuyés sur ces mesures pour la calibration radiométrique de la scène.

Données terrain

Différentes observations granulométriques des faciès sédimentaires ont été réalisées au cours d'une sortie de terrain, qui a eu lieu dans la zone étudiée. Ces observations ont été effectuées sur 54 stations le long de 9 transects.

5.2) Matériel

Le logiciel **ERDAS** Imagine 8.7 a été utilisé pour le traitement des images satellites. C'est un logiciel très puissant doté de nombreuses fonctionnalités : visualisation et amélioration d'images, corrections géométriques, traitement d'images et analyse sur SIG, et, surtout, classifications avancées et modélisation graphique d'analyse spatiale.

Le logiciel **ARCGIS® 9.1** a également été employé pour la manipulation des thèmes vecteurs et pour la consultation de la géodatabase REBENT.

GPS 72 de GARMIN : Il s'agit d'un récepteur GPS portable. Cet appareil nous a permis d'enregistrer les coordonnées géographiques des 54 stations.

1) METHODOLOGIE

L'ensemble des traitements que nous avons appliqués à l'image pour aboutir au résultat final est illustré dans la figure 5 ci-dessous. Pour résumer :

En premier lieu on procède à la réalisation de prétraitements sur la scène SPOT 10 mètres. Pour être en mesure de la comparer avec les autres données et cartes dont on dispose, on procède à un géoréférencement et à une calibration radiométrique. Ensuite, on épure l'image de tout ce qui est superflu : on la découpe sur la zone des Abers (à l'origine elle couvre tout le Nord-Finistère) et, pour ne garder que la partie intertidale, on applique des masques sur la terre et sur la mer. Enfin, on prépare les zones d'échantillonnage pour pouvoir réaliser la classification dirigée.

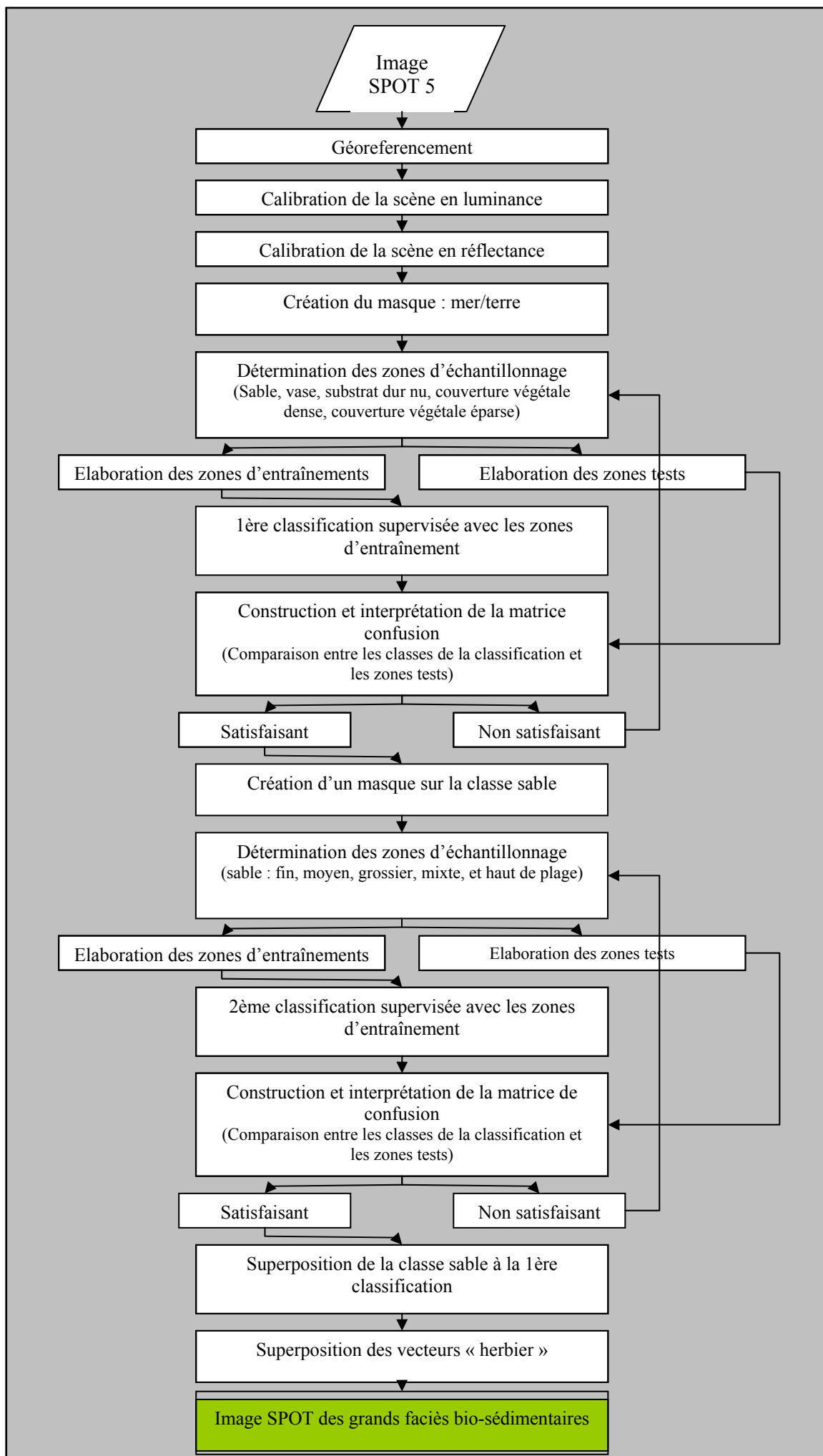
L'image corrigée et les zones d'échantillonnage préparées, on doit par la suite étudier les zones d'échantillonnage pour les diviser en deux groupes. Le premier groupe contient les zones d'entraînement, qui serviront à construire les signatures spectrales, et le deuxième groupe contient les zones de test qui serviront à la validation de la classification.

A partir des zones d'entraînement on réalise ensuite la segmentation, qu'on valide statistiquement avec l'appui des zones de test, à partir desquelles on construit une matrice de confusion. Si le résultat n'est pas satisfaisant, on doit revoir la méthode et les zones d'entraînement. Dans le cas contraire, on réalise un masque sur la classe sable pour l'extraire de l'image dans le but de la différencier en 5 sous-classes. On crée alors à nouveau des zones d'entraînement pour les sédiments sableux et on effectue à partir de celles-ci une classification, que l'on valide avec une matrice de confusion.

Si la classification est jugée acceptable, on la superpose à la première segmentation, puis la couche vectorielle des herbiers, pour finalement aboutir à la création d'une image SPOT des grands faciès bio-sédimentaires, décomposé en 10 classes.

Dans le cas contraire, il faudra dans un premier temps revoir les zones d'échantillonnage où modifier l'algorithme de classification. Si la segmentation n'est toujours pas représentable, nous sommes contraints de regrouper certaines classes.

Les chapitres qui suivent détaillent d'avantage chacun des traitements effectués.



2) PRETRAITEMENTS

2.1 Géoréférencement

Les images satellites possèdent au départ une ou plusieurs formes de distorsion géométrique. Ce problème est inhérent à la télédétection puisque celle-ci tente généralement de représenter des données prises à la surface de la Terre (en trois dimensions) sur une image bidimensionnelle. Les principaux facteurs pouvant influencer la distorsion géométrique sont :

- l'effet de perspective de l'optique du capteur,
- le mouvement du système de balayage,
- le mouvement et la stabilité de la plate-forme,
- l'altitude, la vitesse et le comportement de la plate-forme,
- le relief à la surface,
- la courbure de la Terre et sa rotation.

L'image Spot dont nous disposons au départ était de niveau de prétraitement 2A. Ce niveau inclut entre autres une correction des distorsions. Cette correction géométrique est effectuée dans la projection cartographique standard (projection UTM, système géodésique WGS84) sans prise de points d'appui.

Pour améliorer encore la qualité géométrique de l'image, il est nécessaire d'effectuer un géoréférencement. La plupart des données de référence à notre disposition étant dans le système de projection français Lambert II étendu (projection Lambert conique conforme, système géodésique NTF), nous avons choisi de géoréférencer l'image dans ce système.

Le polynôme que nous avons utilisé pour la transformation est un polynôme de premier ordre. Ce polynôme comporte trois constantes à déterminer par équation. Par conséquent lors du géoréférencement 3 points de contrôle suffisent, même s'il est fortement recommandé d'en créer d'avantage. Pour notre part nous avons réalisé le positionnement géographique de la scène SPOT 10 mètres par pointage de 5 points d'appui reconnaissables sur l'image SPOT à 2,5 mètres, image bien entendu référencée en Lambert II étendu par le CEVA. Le logiciel que nous avons utilisé pour effectuer cette opération est ERDAS Imagine.

2.2) Calibration radiométrique

La calibration radiométrique est un traitement indispensable surtout pour la comparaison des images. Le but de ces transformations est de restituer dans la mesure du possible les propriétés spectrales spécifiques à un type d'habitat de manière à favoriser sa détermination. Autrement dit, ces corrections permettent de déterminer la valeur spectrale des différents habitats au sol et leurs signatures spectrales correspondantes.

La **première partie** de ce traitement, que l'on appelle "calibration en luminance", consiste à calculer la luminance apparente à partir des comptes numériques sur la base de courbes d'étalonnage des différents capteurs. Elle est modélisée par l'équation suivante :

$$L = X/A + B$$

L : luminance incidente ($W/m^2/sr/\mu m$)

X : valeurs numériques

A : gain absolu de calibration pour la bande considérée ($W/m^2/sr/\mu m$)

B : biais absolu de calibration pour la bande considérée

La luminance apparente sur le capteur est mesurée en $W/m^2/sr/\mu m$. Le biais absolu de calibration (B) correspond à la luminance spectrale pour un compte numérique égal à zéro. Le biais et le gain absolu de calibration ont déjà été calculés par SPOT Image, et sont inclus dans l'en-tête de chaque scène SPOT.

La **deuxième partie**, la calibration en réflectance, consiste à corriger les effets atmosphériques, provoqués par l'absorption et la diffusion de la lumière. Le principe est de faire des mesures de réflectance sur le terrain avec un spectroradiomètre sur des points de référence identifiables sur l'image, et de corriger les valeurs de luminance (calculées lors de l'étape précédente) grâce à ces mesures de vérité terrain. A partir des points acquis sur le terrain, on génère une droite de régression mettant en relation la luminance apparente avec la valeur donnée par le spectroradiomètre, selon l'équation :

$$Y = aX+b$$

Y : réflectance

a : pente

X : luminance

b : ordonnée à l'origine

Les valeurs de luminance des pixels de l'image peuvent alors être converties en réflectance en effectuant une extrapolation linéaire. Ce calcul peut s'effectuer sur les bandes XS1, XS2 et XS3, le radiomètre ne prenant en compte que des mesures dans les longueurs d'ondes du visible et du proche infrarouge.

Concernant notre image, pour chacune des trois bandes spectrales nous avons disposé de 21 points de mesures de spectroradiomètre. Ces données terrain nous ont été fournies par le CEVA (Centre d'Etude et de Valorisation des Algues).

Les droites de régression et leur coefficient de détermination, que nous avons calculés pour chacun des trois canaux, sont les suivants :

$$\begin{aligned}
 Y_{xs1} &= 0.255 * L - 12.797 & r^2 &= 0,9854 \\
 Y_{xs2} &= 0.270 * L - 3.912 & r^2 &= 0,9621 \\
 Y_{xs3} &= 0.701 * L - 18.205 & r^2 &= 0,9691
 \end{aligned}$$

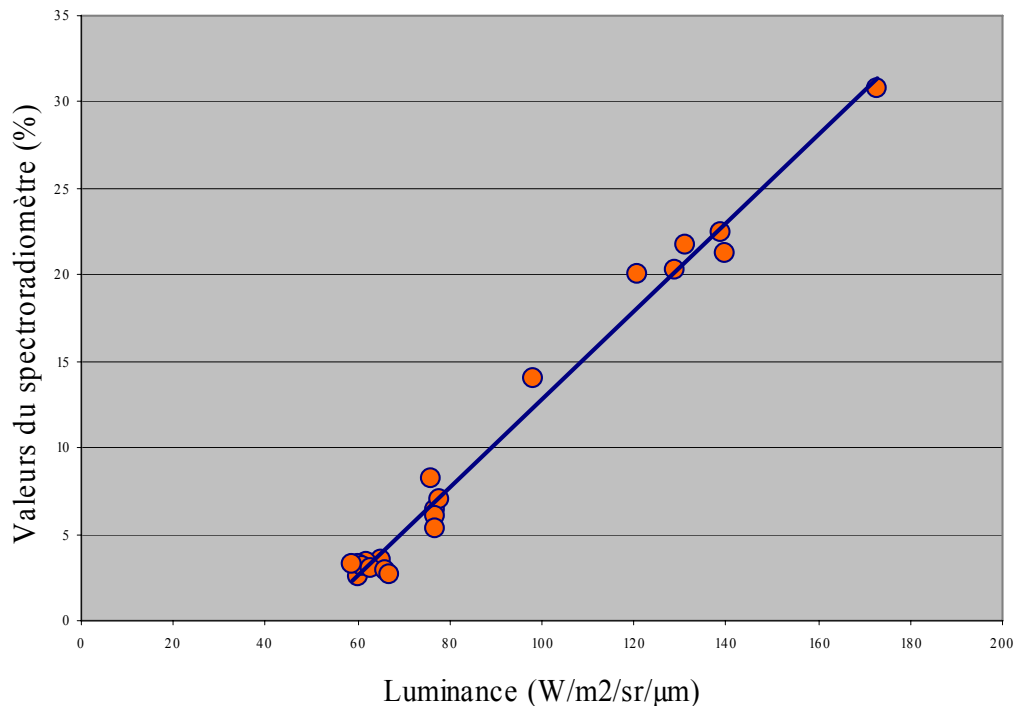


Figure 6 : Droites de régression de XS1

Dans la figure 6 on montre la droite de régression obtenue en mettant en relation les valeurs des pixels de l'image en luminance sur XS1 avec les 21 points mesurés à l'aide d'un spectroradiomètre sur le terrain. Comme on peut l'observer, la corrélation entre les deux variables est forte. En conséquence, les coefficients de détermination (r^2) ont des valeurs très proches de l'unité.

Le radiomètre ne permettant pas de prendre des mesures dans le moyen infrarouge, il faut convertir la valeur de luminance du canal XS4 en réflectance apparente où exo-atmosphérique, qui correspond à la réflectance de la haute atmosphère.

Lorsque la luminance apparente est définie au niveau du satellite, il est nécessaire de déterminer l'éclairement solaire au même endroit. Les luminances équivalentes solaires sont distribuées par Spot Image. Cette valeur est de $236 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$ pour XS4, pour l'instrument HRG 2 de SPOT5.

L'équation utilisée est :

$$\rho = \Pi L / \cos\Theta E$$

ρ : Réflectance dans le satellite (0-1)

Π : 3.141593

Θ : Angle zénithal solaire (degrés)

L : Luminance apparente ($W/m^2/sr/\mu m$)

E : Eclairement solaire au niveau du satellite. ($W/m^2/\mu m$)

Pour résumer, nous avons obtenu une scène Spot où XS1, XS2 et XS3 ont des valeurs de réflectance pixel équivalente à la réflectance au sol. Pour XS4, la réflectance apparente a été mesurée sur le capteur, sans correction atmosphérique.

2.3) Création de la sous-scène des Abers et application de masques.

Notre étude se tenant essentiellement sur les Abers et non sur tout le Finistère Nord, l'image, une fois corrigée radiométriquement et géométriquement, a été découpée afin d'éviter des distorsions sur nos résultats et des temps de traitements trop longs.

Cette opération effectuée, une deuxième étape consiste à extraire de l'image la zone intertidale, autrement dit à éliminer la partie correspondant à la terre et à la mer. Le masque terre que nous avons utilisé est une carte du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). Cette carte a pour limite le trait de côte tel qu'il est défini par l'Organisation Hydrographique Internationale, c'est à dire la limite des plus hautes mers astronomiques. Pour extraire la terre, nous avons construit un modèle graphique ERDAS qui donne la valeur zéro à tous les pixels contenus par le masque terre.

Pour supprimer la mer de l'image, une autre méthode a dû être employée. En effet, le niveau de la basse-mer de l'heure d'acquisition, est situé à 0.43 mètres au-dessus du zéro des cartes. En conséquence, l'utilisation pour élaborer le masque mer, de la carte "zone intertidale" fournie par le SHOM, aurait probablement posé problème pour la future segmentation de l'image. Nous avons donc réalisé un masque par seuillage. L'image corrigée radiométriquement donne dans l'infrarouge une valeur de zéro pour l'eau. En partant de cette caractéristique, nous avons effectué un seuillage sur XS3 entre les bornes 0-51,2, ce qui nous a permis de créer un modèle graphique ERDAS pour donner la valeur zéro à tous les pixels situés en mer.

Grâce à cette chaîne de prétraitements l'image est au final conforme aux spécificités de notre étude : elle a comme caractéristiques d'être à 10 mètres de résolution, d'être corrigée géométriquement et radiométriquement, d'être centrée sur les Abers, et de ne contenir que les pixels correspondant à l'estran.

2.4) Préparation des zones d'échantillonnage

Préalablement à une classification supervisée, il est nécessaire de définir les classes thématiques que l'on souhaite extraire de l'image et d'identifier quelques zones occupées par ces classes, zones à partir desquelles on extraira par la suite les signatures spectrales correspondantes. Ce sont les zones d'échantillonnage, que l'on peut diviser en 2 catégories (Caloz, R. 2001): les zones d'entraînement, pour établir les signatures spectrales, et les zones test, qui servent à vérifier si la procédure produit bien les classes attendues.

Pour être en mesure de définir ces zones, l'analyste se doit d'avoir une connaissance du milieu. Cette connaissance nous a été apportée par les données de sédimentologie stockées dans la géodatabase REBENT, ainsi que par l'orthophotographie littorale et l'image SPOT5 à 2,5 m de résolution.

Au total nous avons généré 15 zones d'entraînement pour la première classification, et 15 pour la classification des sables. D'un autre côté, 31 zones test ont été définies pour la validation de la première classification et 48 pour la deuxième. La figure 7 représente les zones d'entraînement qu'on a utilisé :

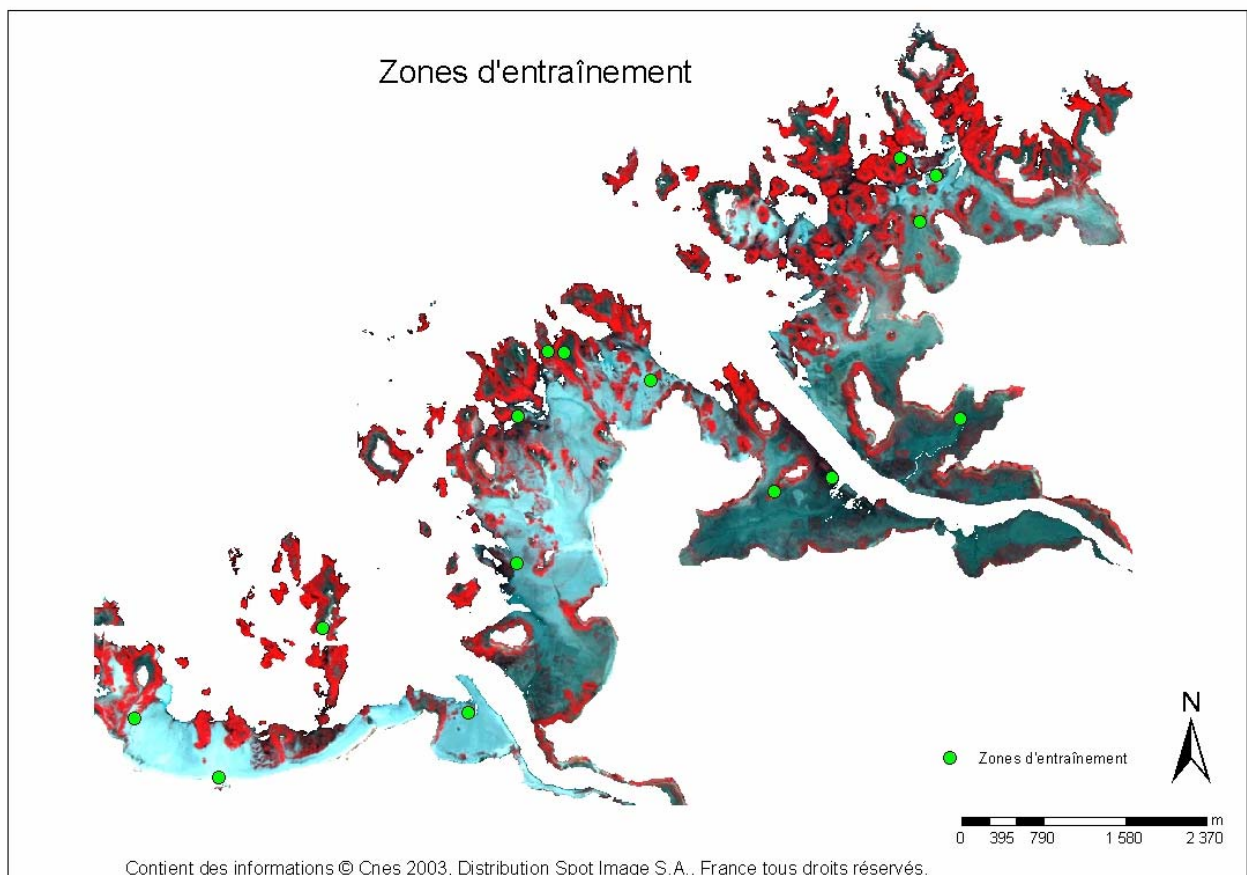


Figure 7 : Zones d'entraînement utilisées pour la réalisation de la première classification.

3) CLASSIFICATION

L'objectif de l'étude étant l'obtention d'une carte d'habitats bio-sédimentaires, il s'agissait, après avoir effectué les prétraitements d'usage, de procéder à une classification, autrement dit au regroupement des pixels de l'image pour former des classes d'habitats bio-sédimentaires. Le fait d'avoir une bonne connaissance préalable des catégories thématiques présentes sur notre zone d'intérêt nous a menés à choisir la classification supervisée comme méthode de segmentation.

3.1) Classification supervisée.

Le premier objectif identifié était de différencier sur l'image les habitats suivants :

- Sable
- Vase
- Couverture végétale dense
- Couverture végétale épars
- Substrat dur nu

Nous avons ainsi généré 15 zones d'entraînement qui ont été choisies parmi des zones d'échantillonnage en fonction de leur représentativité. Pour cela, on a réalisé une analyse visuelle des courbes spectrales obtenues.

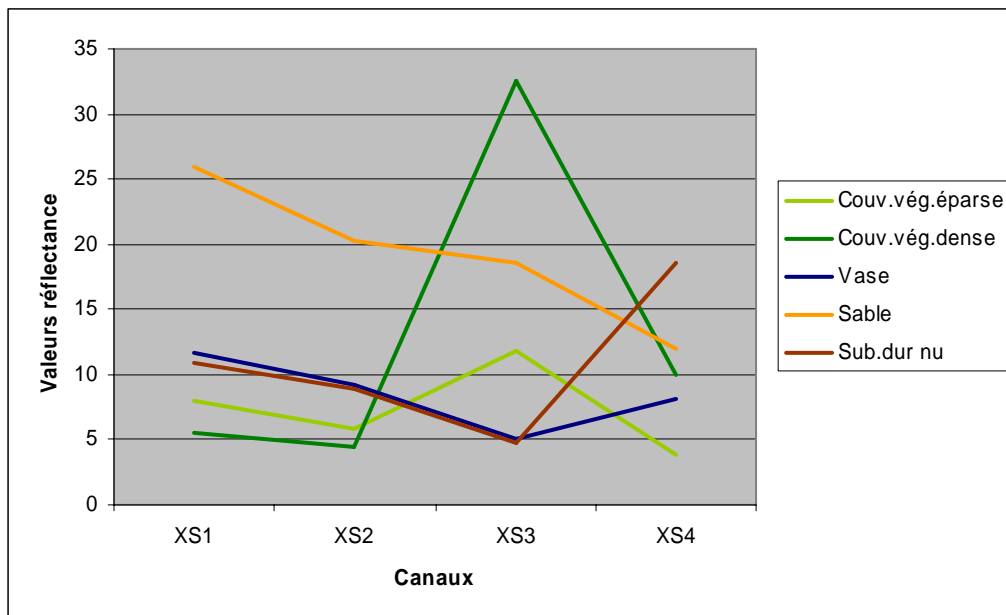


Figure 8 : Signatures spectrales de la première classification.

Les signatures obtenues à partir de valeurs moyennes de réflectance dans chaque canal sont représentées sur le tableau 3. Ces signatures spectrales sont assez bien différenciées. Les seuls habitats qui ont une signature spectrale proche sont "substrat dur nu" et "vase", cependant le fait que leurs réponses spectrales divergent sur le canal 4, devrait nous permettre de les classer correctement.

L'algorithme statistique de classification que nous avons utilisé est le Maximum de Vraisemblance sous hypothèse gaussienne. Chaque pixel est ainsi classé selon sa probabilité d'appartenance à une classe. L'hypothèse gaussienne implique que la probabilité d'occurrence d'une classe est homogène sur l'ensemble de l'image. Le comportement numérique de chaque groupe de pixel est estimé à partir du comportement numérique des noyaux associés à la classe. L'image classifiée est en figure 9.

Analyse du résultat :

L'évaluation des résultats obtenus par la classification dirigée a ensuite été opérée sur les zones tests. L'évaluation quantitative s'appuie sur des outils statistiques dont l'élément principal est la matrice de confusion. Pour la construction de cette matrice nous avons utilisé 31 polygones.

A l'analyse de la matrice de confusion, on observe que les résultats sont satisfaisants. Cependant, la vase et le sable sont plus fréquemment confondus. Pour tenter de comprendre l'erreur, nous avons recouru à la photo-interprétation et celle-ci nous a permis d'identifier la source probable du problème : la présence de zones sablo-vaseuses, constituées d'un mélange de vase et de sable, qui correspond aux espaces occupées par la conchyliculture.

DONNEES CLASSIFIES	DONNEES DE TERRAIN					Précision utilisateur
	Couv. végétale éparse	Couv. végétale dense	Vase	Sable	Substrat dur nu	
Couv. végétale éparse	6	0	0	0	0	100
Couv.vég.dense	0	5	0	0	0	100
Vase	0	0	5	5	0	50
Sable	1	0	0	7	0	87,5
Substrat dur nu	0	0	0	0	2	100
Précision réalisateur	85,71	100	100	58.33	100	

Tableau 2 : Matrice de confusion de la première classification

ERDAS permet aussi de calculer le coefficient de kappa, qui permet d'estimer la précision de la classification pour chaque classe. Sa valeur moyenne est de 0.75, ce qui veut dire que la classification est très bonne.

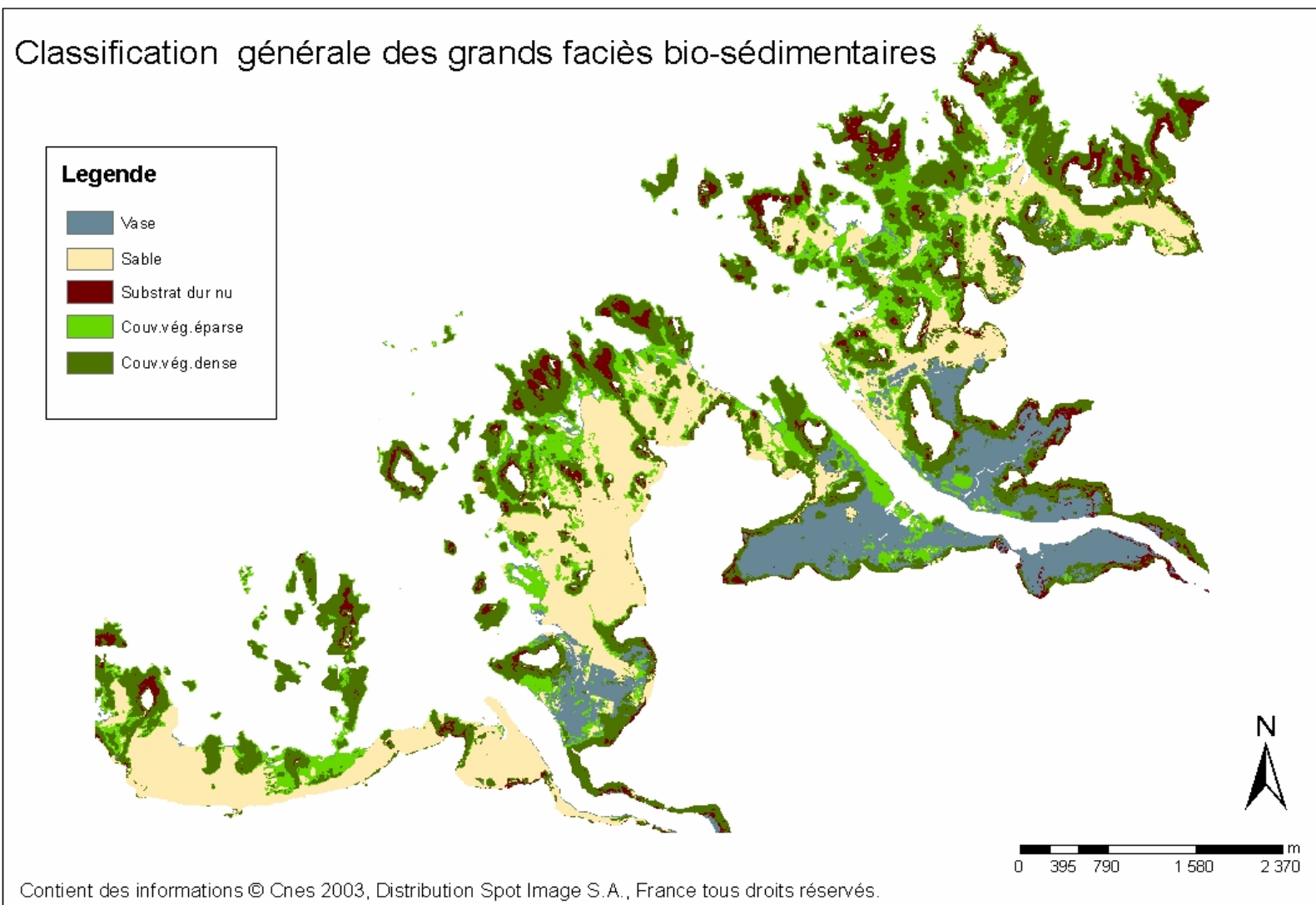


Figure 9 : Classification Bio-sédimentaire

3.2) Différentiation de la classe sable en 5 catégories

L'étape suivante consiste à tenter de discriminer au sein de la classe "sable" 5 nouvelles classes :

- Sable fin,
- Sable moyen,
- Sable grossier,
- Sable mixte,
- Sable de haut de plage.

Pour ne pas que les autres catégories de l'image interfèrent sur le résultat, il était au préalable nécessaire d'isoler la classe "sable". Nous avons par conséquent élaboré un masque, que nous avons appliqué à l'image de départ de manière à ne conserver que la partie occupée par le sable, la valeur zéro étant attribuée aux autres pixels.

La procédure appliquée est la même que celle utilisée dans la classification générale. Ainsi, aux zones d'entraînement des différents types de sable on a appliqué un algorithme de Maximum de Vraisemblance. Le produit résultant sera l'image masquée sur le sable avec 5 types de sables différenciés.

La vérification empirique du résultat s'est un nouveau faite à travers la matrice de confusion. Au total, sur 47 zones test, 75 % sont bien classées. L'indice kappa est de 0,6825, valeur acceptable, puisqu'on considère comme très bon un résultat supérieur à 0,75, et très mauvais un résultat inférieur à 0,4. (Malthus.T, 2000)

DONNEES CLASSIFIEES	DONNEES DE TERRAIN						Précision utilisateur
	Non classées	Sable fin	Sable moyen	Sable grossier	Sable mixte	Sable de haut de plage	
Non classées	0	1	1	1	0	0	-----
Sable fin	0	9	1	2	1	0	69.23%
Sable moyen	0	0	7	1	1	0	87.50%
Sable grossier	0	0	1	11	1	0	84.62%
Sable mixte	0	1	0	0	6	0	85.71%
Sable de haut de plage	0	0	0	0	0	3	100%
Précision réalisateur	-----	81.82%	70%	73.33%	68.67%	100%	

Tableau 3 : Matrice de confusion de la classification des sables

Les zones qualifiées de « non classées » sont des zones sablo-vaseuses identifiées comme « vase ». Parmi les classes, c'est le « sable de haut de plage » qui est le mieux discerné. Pour les autres classes, la classification est acceptable, même si globalement le résultat est moyen par rapport à la classification précédente, ce qui peut s'expliquer par le fait que les signatures spectrales sont très proches. De plus, il s'agit de sédiments meubles, donc peu stables et très mélangés.

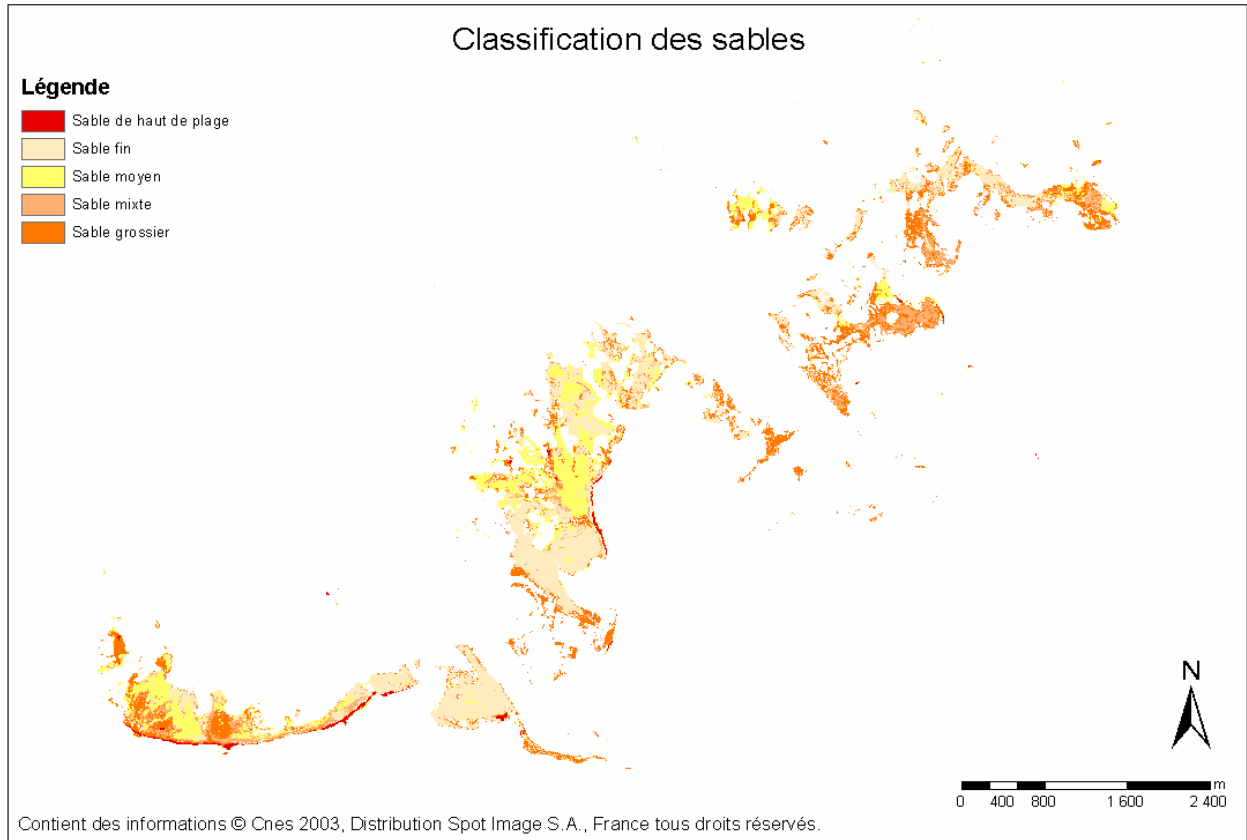


Figure 10 : Classification des sables

Ensuite, on superpose l'image de la classification des sables à celle dérivée de la première classification. On obtient ainsi une image avec 9 classes. Ensuite, on ajoute une classe « herbiers ». Les herbiers n'étant pas détectables par classification, pour créer cette classe nous avons intégré dans l'image une couche vectorielle fournie par le REBENT. Pour finaliser le produit, on superpose la couche vectorielle du cadastre conchylicole, puisque c'est la seule façon d'expliquer la présence d'une classe « vase » si étendue.

Au final, on obtient une image en 10 classes des principaux faciès bio-sédimentaires plus la couche vectorielle représentant les activités conchylicoles de la zone.

Le résultat sera une image classée selon les critères suivants:

- **Sable fin (0.063-0.25mm)** (« Atlas POLMAR de sensibilité du Finistère »)
- **Sable moyen (0.25-0,50mm)** (« Atlas POLMAR de sensibilité du Finistère »)
- **Sable grossier (0,50-2 mm)** (« Atlas POLMAR de sensibilité du Finistère »)
- **Sable mixte**
- **Sable de haut de plage**
- **Vase (< 0,063mm)** (« Atlas POLMAR de sensibilité du Finistère »)
- **Substrat dur nu**
- **Couverture végétale dense** (*Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*)
- **Couverture végétale éparse** (*Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*)
- **Herbiers** (*Zostera marina*)
- **Cadastre conchylicole.**

Ayant l'intention de regrouper des pixels pour avoir une image finale nette et lisse, ne comportant pas d'unités de taille trop petite qui n'auraient pas de signification réelle, nous avons appliqué un « filtre non linéaire » (Girard.MC.1999) de fenêtre 5X5, traitement qui repose sur une analyse des pixels en fonction d'une mesure statistique. Dans ce cas-ci, on a choisi la médiane. Le produit abouti est représenté dans la figure 11.

On a modifié cette classification pour l'adapter à la typologie européenne de référence des habitats EUNIS (European Nature Information System), celle-ci s'appuie sur une approche qui permet d'accéder à des niveaux de précision allant de la simple distinction entre les types rocheux ou meuble (niveau 2), intégrant d'une part, le mode d'exposition et le type de substrat (niveau 3), puis, d'autre part, la notion de groupement fonctionnel d'habitats (niveau 4) jusqu'à l'identification précise des peuplements benthiques définis par la présence d'espèces dominantes ou de groupes d'espèces caractéristiques (niveaux 5 et 6). (Rollet,C. 2005). La classification de notre image se situe au niveau 3 de la classification EUNIS. Le résultat est montré dans la figure 12 et les correspondances de notre nomenclature initiale avec EUNIS apparaissent ci-dessous. L'image résultante est similaire à la première classification réalisée « classification générale des faciès bio-sédimentaires ».

CLASSIFICATION	EUNIS	
Sable fin	A2.2	Littoral sands and muddy sands
Sable moyen	A2.2	
Sable mixte	A2.2	
Sable grossier	A2.2	
Sable de haut de plage	A2.2	
Vase	A2.3	Littoral muds
Substrat dur nu	A1	Littoral rock and other hard substrata
Couverture végétale dense	A1.3	Low energy littoral rock
Couverture végétale éparse	A1.3	
Herbiers	A5.53	Sublittoral seagrass beds

Tableau 4 : Comparaison de la classification avec celle d'EUNIS.

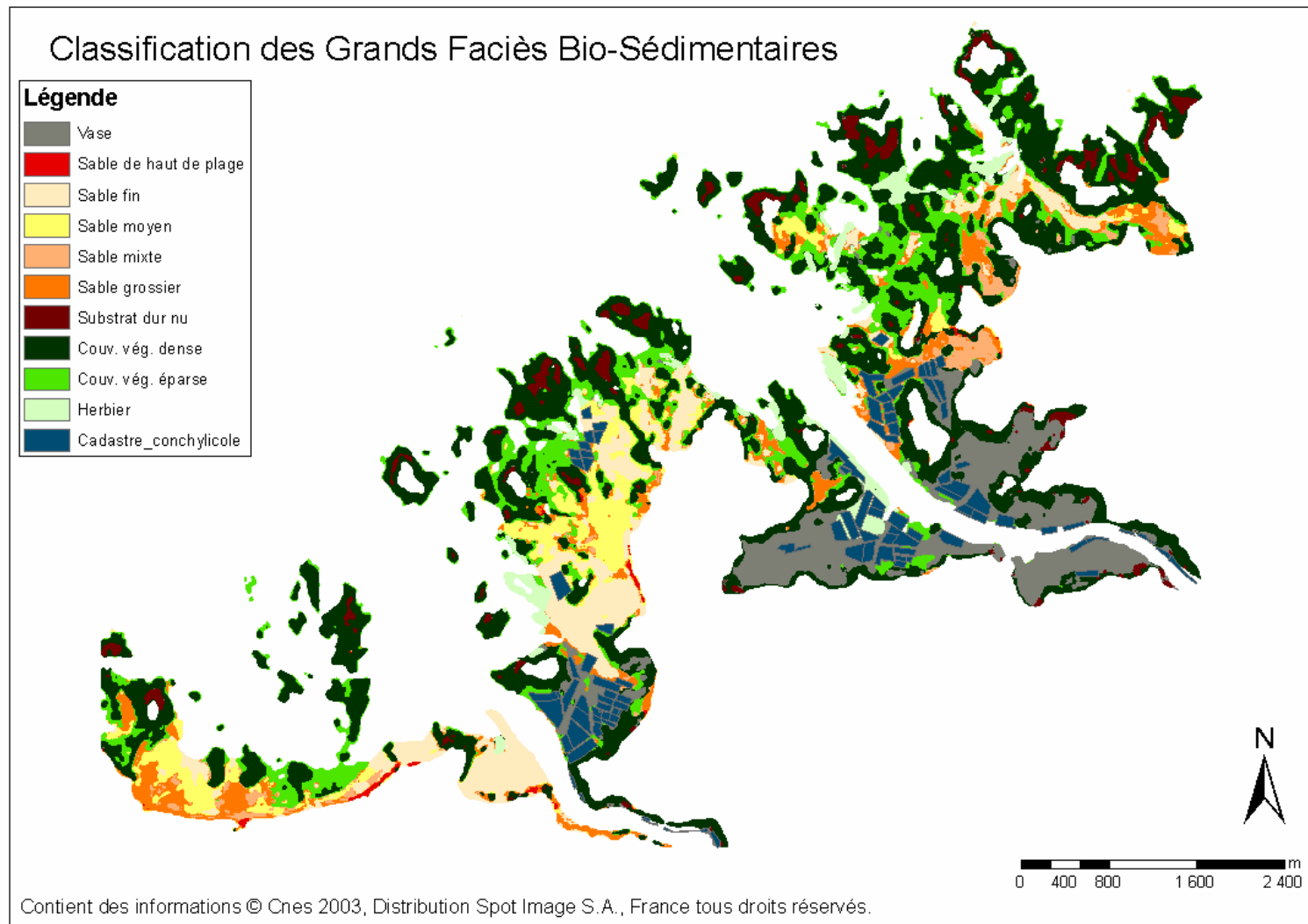


Figure 11 : Classification finale

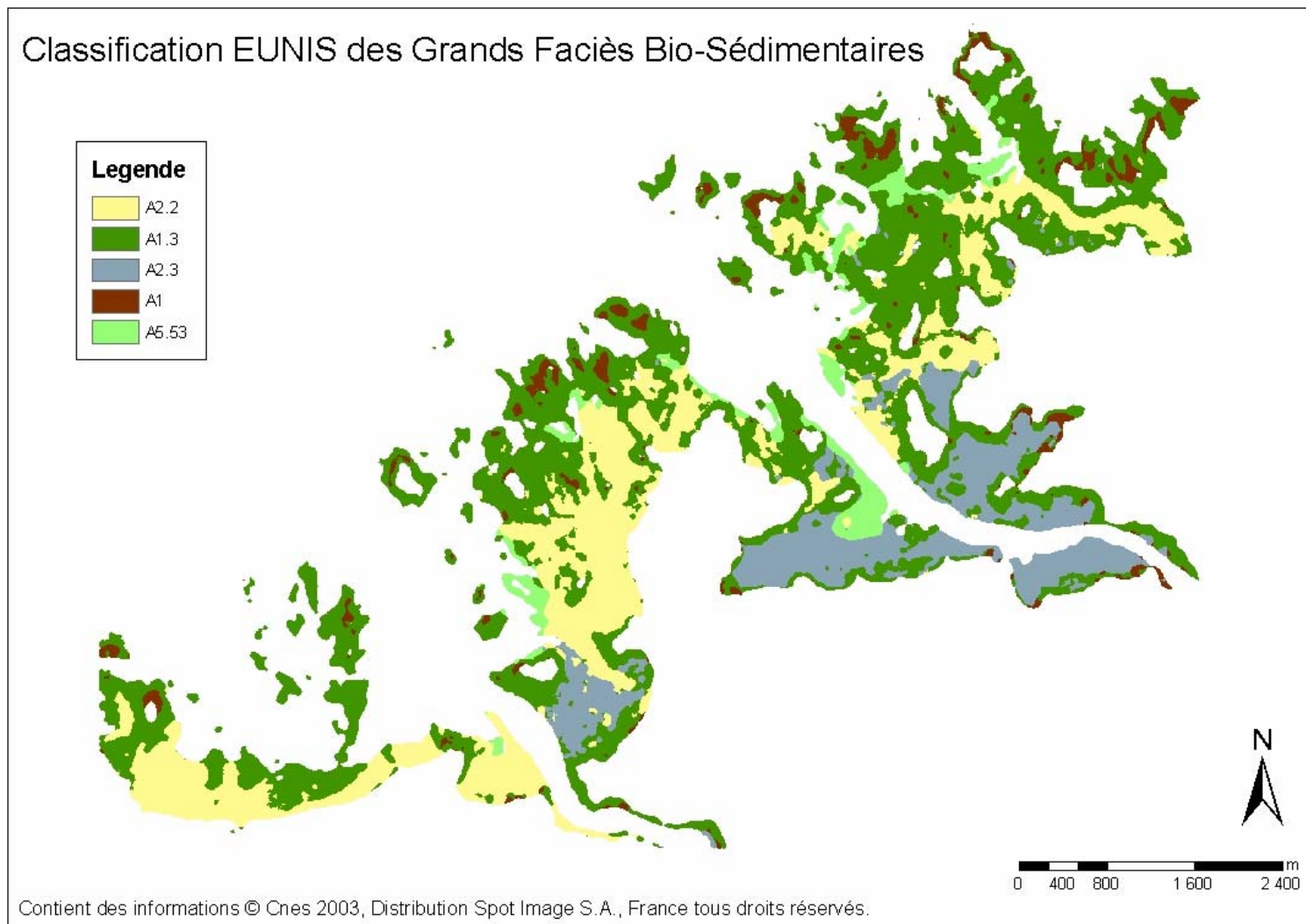


Figure 12 : Classification EUNIS

1) DISCUSSION

Points positifs

On distingue très bien les grandes unités bio-sédimentaires de la zone (niveau 3 d'EUNIS). La classification a en effet très bien fonctionné, comme a pu le montrer la validation.

Le succès de l'étude est en grande partie dû à la qualité et la quantité des données à disposition :

- L'image SPOT à 2,5 m qui nous a servi de référence pour le géoréférencement de la scène à traiter
- Données de spectroradiométrie fournies par le CEVA, sans lesquelles la calibration aurait été impossible
- Données terrain, déjà disponibles (géodatabase REBENT) ou acquises par nos propres soins sur le terrain, qui nous ont permis d'établir de manière très précise de nombreuses zones d'échantillonnage et de confronter nos résultats à la réalité par le biais de matrices de confusion.
- L'orthophotographie littorale, grâce à laquelle nous avons pu effectuer des validations visuelles (par superposition).

Points à améliorer

Les herbiers n'ont pu être identifiés : la résolution de la scène SPOT avec laquelle nous avons travaillé ne nous a pas permis d'observer de différences significatives entre les différentes zones d'herbiers étudiées. Il n'est pas certain néanmoins qu'une meilleure résolution nous aurait permis de résoudre le problème, comme le montre l'étude « Cartographie synthétique de l'environnement littoral du Finistère », où l'on explique que sur une image SPOT à 2,5 mètres, il est difficile de différencier les herbiers sur le substrat vaseux. Cette étude met néanmoins en évidence qu'il est possible de les distinguer sur les sables mais plutôt par la forme qu'ils acquièrent. Pour pallier à ce problème, nous avons été contraints d'injecter dans l'image classifiée des données vectorielles exogènes.

2) PERSPECTIVES

A terme, l'idée serait d'étendre à tout le littoral breton la cartographie des grandes unités bio-sédimentaires par l'intermédiaire d'images SPOT. Pour cela, il est important de mettre l'accent sur quelques aspects particulières où problèmes qui pourraient survenir en utilisant la méthodologie présente.

Premièrement, il est conseillé, comme nous venons de le voir, d'avoir dès le départ à disposition une bonne source d'information, de manière à obtenir des signatures spectrales claires et bien différenciées et d'être en mesure d'effectuer une validation fiable. Si ce n'est pas le cas, une bonne alternative serait d'acquérir cette information sur le terrain. Des relevés rapides de points, avec une identification simplement visuelle des faciès, peuvent s'avérer suffisants pour peu que le nombre de points soit conséquent. Ensuite une approche consisterait à comparer les signatures spectrales obtenues dans des études similaires, pour cela une calibration radiométrique serait nécessaire. La méthode de calibration directe que nous avons employée s'est montrée très performante. Par conséquent, en l'absence de données, on pourrait envisager d'utiliser un simple radiomètre de terrain, comme le CIMEL par exemple, pour mesurer sur le terrain la réflectance au sol. L'idéal est de lever un nombre de cibles limité (5 à 6 points suffisent) mais de s'assurer de la bonne répartition des valeurs sur l'ensemble de la gamme des niveaux de gris afin d'améliorer la droite de régression. Le point clé est de trouver des surfaces suffisamment « pures » et stables dans le temps. Il convient en effet de prendre en garde aux effets saisonniers qui affectent les cibles végétales, les mesures de terrain étant rarement simultanées aux prises d'images.

En conclusion, une classification dirigée réalisée juste avec quelques connaissances préalables sur la zone d'étude est une méthodologie parfaitement applicable et qui donne de bons résultats. La pratique de quelques prétraitements comme le géoréférencement ou la calibration radiométrique est nécessaire pour comparer l'image satellite avec d'autres scènes où données dont on dispose. Cette méthodologie d'utilisation des images SPOT pour la cartographie bio-sédimentaire des estrans est ainsi applicable à d'autres scènes.

BRGM.(Bureau de Recherches Géologiques et Minières)

CEVA (Centre d'Etude et de Valorisation des Algues)

DYNECO (Département Dynamiques de l'Environnement Côtier)

EPOC (Environnements et Paleo-environnements Océaniques)

EUNIS (European Nature Information System)

IFREMER (Institut français de recherche pour l'Exploitation de la Mer)

MESH (Mapping European Seabed Habitats).

METHYS (Modélisation, Expérimentation et Télédétection en Hydrodynamique Sédimentaire)

REBENT (Réseau de surveillance des biocénoses benthiques).

SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine)

UMR (Unité mixte de Recherche)

VIGIES (Valorisation de l'Information pour la Gestion Intégrée et la Surveillance)

BIBLIOGRAPHIE

- Girard,MC. et Girard,CM. (1999) « Traitements des données de télédétection ». Paris
- Lillesand, T.M. et Kiefer R.W (2000) « Remote sensing and image interpretation ». *New York*
- Bonnot-Courtois,C. et Levasseur J.E. (2002). « Reconnaissance de la limite terrestre du domaine maritime. Interet et potentialites de criteres morpho-sedeimentaires et botaniques ». Rennes.
- Green,E.P., Mumby,PJ, Edwards,A.J., Clark,C.D.(2000). «Remote sensing handbook for tropical coastal management ». Paris
- « Evaluation du potentiel de l'imagerie SPOT 5 dans le secteur du bassin d'Arcachon : Cartographie du milieu lagunaire et du littoral océanique ». *METHYS, EPOC, l'Université de Bordeaux, et BRGM*
- « Atlas POLMAR de sensibilité du Finistère ».(2005) *CEDRE*
- «Cartographie synthétique de l'environnement littoral du Finistère : exploitation de SPOT5 pour la cartographie de l'estran, du trait de côte et de l'occupation du littoral » (2004) *Géomer-CETMEF*
- Malthus, TM, Karpouzli,E (2003) « Integrating field and high spatial resolution satellite-based methods for monitoring shallow submersed aquatic habitats in the Sound of Eriskay, Scotland,UK. » *International Journal of Remote sensing*.(vol.24,n°13.)
- Oliveira,E.(2005): «Cartographie prédictive des habitats benthiques. ». Brest
- Le Berre,I.(1999). « Mise au point de methodes d'analyse et de representation des interactions complexes en milieu littoral ». Brest-*IFREMER*
- « Réseau Benthique. Développement d'un pilote breton. Elaboration de l'Avant Projet Sommaire » (2001). Brest-*IFREMER*
- Le Brown,K., Matthews,A. (2003). “The developpement of remote sensing techniques for marine SAC monitoring”. *English Nature Research Reports*.
- «Mise en place d'indicateurs opérationnels de suivi des couvertures des grandes algues dans le cadre du réseau REBENT » (2004). *CEVA*
- Caloz,R., Collet.C.(2001) « Précis de télédétection ». *Vol.3 Traitements numériques d'images de télédétection*.Paris