



## Projet Interreg ARCH

Assessing Regional Changes to natural Habitats – photointerpétation, cartographie et étude des potentialités des nouvelles technologies de télédétection pour le suivi des habitats naturels et de la biodiversité sur le territoire du Nord – Pas-de-Calais et du Kent

### LOT N°2

ÉTUDE DES POTENTIALITES DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE TELEDETECTION  
POUR LE SUIVI DES HABITATS NATURELS ET DE LA BIODIVERSITE SUR LE  
TERRITOIRE TRANSFRONTALIER NORD – PAS-DE-CALAIS

## Rapport de la mission 3

**« Inventaire des technologies de télédétection  
applicables au projet ARCH »**

REFERENCES DU DOCUMENT : VERSION DU JEUDI 30 JUIN 2011  
REFERENCES : CR59-62 - ARCH - RAPPORT MISSION 3 - 30-06-2011 – V3.0



## Description du document

- Partenaires:

Comité de pilotage ARCH		
Pays	Organisation	
France	Madame Cécile LECLAIRE	Conseil régional Nord Pas de Calais Direction de l'environnement
United Kingdom	Madame Laurence GUEDON	Kent County Council ARCH Team Flood Risk & Natural Environment

Prestataires	
Pays	Organisation
France	SIRS
United Kingdom	Flasse consulting
France	EURISY

- Document

	Prestataire	Noms	Date
<b>Auteurs</b>	SIRS	Alexandre Pennec	2011/06/30
<b>Contributions</b>	SIRS	Christophe Sannier, Jean-Paul Gachelin,	2011/06/30
<b>Relecture</b>	SIRS	Sylvie Boitelle	2011/06/30
<b>Validation</b>	SIRS	Pascal Versmessen, Christophe Sannier	2011/06/30

Version	Date	Auteurs	Description
1.0	2011/05/31	Alexandre Pennec	Livraison v1.0
2.0	2011/06/30	Alexandre Pennec	Livraison v2.0 avec intégration des remarques de la région NPdC
3.0	2011/28/30	Alexandre Pennec	Livraison v3.0 avec intégration des remarques internes à SIRS

- Résumé

Au-delà des expériences recensées au cours de cette mission 2, la mission 3 se propose de réaliser une documentation technique sur la technologie de télédétection. Pour rappel, la mission 2 consiste à réaliser un inventaire des expériences significatives européennes menées dans le domaine de la télédétection et de la biodiversité en Europe et le suivi d'habitats naturels

Ainsi, le présent rapport doit présenter une analyse de la télédétection, en termes de technologie et de méthodologie. La présente documentation doit permettre de poser les bases sur les principes guidant la télédétection (technologies actuellement disponibles ou à venir, leurs caractéristiques techniques, les nouvelles méthodes de traitement des données en développement, etc.) afin de pouvoir répondre aux futurs besoins qui seront exprimés par les utilisateurs.

## SOMMAIRE

<b>DESCRIPTION DU DOCUMENT</b> .....	<b>2</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>4</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>9</b>
<b>1. LA TELEDETECTION SPATIALE</b> .....	<b>10</b>
1.1. LES PRINCIPES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION .....	10
1.1.1. <i>Les principes de base</i> .....	10
1.1.2. <i>L'onde électromagnétique</i> .....	10
1.1.3. <i>Le spectre électromagnétique</i> .....	11
1.1.4. <i>L'orbite et la fauchée du satellite</i> .....	14
1.1.5. <i>Les résolutions des images satellites</i> .....	17
1.2. LES CAPTEURS EMBARQUES SUR LES SATELLITES .....	18
1.2.1. <i>Les capteurs passifs</i> .....	18
1.2.2. <i>Les capteurs actifs</i> .....	20
1.3. LES PRETRAITEMENTS DES DONNEES.....	22
1.3.1. <i>La calibration</i> .....	23
1.3.2. <i>La correction radiométrique</i> .....	23
1.3.3. <i>La correction géométrique</i> .....	23
1.3.4. <i>La correction atmosphérique</i> .....	25
1.3.5. <i>Exemples de niveaux de correction proposés par les fournisseurs</i> .....	27
1.4. LES TRAITEMENTS.....	29
1.4.1. <i>Les compositions colorées</i> .....	29
1.4.2. <i>Le filtrage</i> .....	30
1.4.3. <i>La fusion de données</i> .....	32
1.4.4. <i>Les indices</i> .....	32
1.5. LES LOGICIELS DE TELEDETECTION .....	37
<b>2. L'EXTRACTION DE L'INFORMATION SUR L'HABITAT</b> .....	<b>39</b>
2.1. LA CARTOGRAPHIE PAR MISSION TERRAIN .....	39
2.2. L'ANALYSE D'IMAGE EN COMPLEMENT DE LA MISSION TERRAIN .....	39
2.2.1. <i>Les méthodes « traditionnelles et opérationnelles »</i> .....	39
2.2.2. <i>Les méthodes « émergentes »</i> .....	49
<b>3. DISCUSSION ET RECOMMANDATION</b> .....	<b>51</b>
3.1. LA NOMENCLATURE .....	51
3.2. L'ETENDUE GEOGRAPHIQUE.....	52
3.3. COMPROMIS ENTRE LES DIFFERENTES RESOLUTIONS .....	52
3.4. FOCUS SUR UNE ZONE D'INTERET SPECIFIQUE .....	52
3.5. LE COUT .....	54
3.6. LE CHOIX DE LA METHODOLOGIE DE CLASSIFICATION AUTOMATIQUE .....	55
3.7. EST-CE-QUE LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE LA TELEDETECTION SONT UTILISABLES EN CONTEXTE OPERATIONNEL ? ..	57
3.8. LA TRES HAUTE RESOLUTION COMME UNIQUE SOLUTION ? .....	57
3.9. LA MULTI-TEMPORALITE .....	58
3.10. QUID DES INITIATIVES EUROPEENNES ET NATIONALES ?.....	58
3.10.1. <i>L'initiative européenne GMES</i> .....	58
3.10.2. <i>L'initiative nationale GEOSUD</i> .....	61
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>63</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>64</b>

1) ANNEXE 1 : SATELLITES, ET LEURS CARACTERISTIQUES, ACTUELLEMENT EN ORBITE AUTOUR DE LA TERRE (CAPTEURS PASSIFS) .....	64
2) ANNEXE 2 : SATELLITES, ET LEURS CARACTERISTIQUES, PROCHAINEMENT EN ORBITE AUTOUR DE LA TERRE (CAPTEURS PASSIFS) .....	66
3) ANNEXE 3 : SATELLITES RADAR, ET LEURS CARACTERISTIQUES, ACTUELLEMENT ET PROCHAINEMENT EN ORBITE AUTOUR DE LA TERRE (CAPTEURS ACTIFS).....	67
4) ANNEXE 4 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE SATELLITES ACTUELLEMENT DISPONIBLES REPARTIS EN GROUPE SELON LES RESOLUTIONS SPECTRALES ET SPATIALES (ECHELLES LOGARITHMIQUES).....	68
REFERENCE .....	69

## Table des illustrations

FIGURE 1 : L'ONDE ELECTROMAGNETIQUE (SOURCE CCRS/CCT) .....	11
FIGURE 2 : LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE (LONGUEURS D'ONDE ET FREQUENCES) .....	11
FIGURE 3 : LES DIFFERENTES MESURES RADIOMETRIQUES (SOURCE CCRS/CCT) .....	13
FIGURE 4 : LES INTERACTIONS DU RAYONNEMENT INCIDENT AVEC LA CIBLE .....	13
FIGURE 5 : VARIATION DE LA REFLECTANCE EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE ET DU TYPE DE SOL ...	14
FIGURE 6 : ORBITE GEOSTATIONNAIRE.....	14
FIGURE 7 : ORBITE QUASI-POLAIRE .....	15
FIGURE 8 : PASSE MONTANTE ET PASSE DESCENDANTE .....	16
FIGURE 9 : LA FAUCHEE D'UN SATELLITE .....	16
FIGURE 10 : COMPARAISON DE QUATRE RESOLUTIONS SPATIALES.....	17
FIGURE 11 : LES CAPTEURS EN TELEDETECTION .....	19
FIGURE 12 : RE-ECHANTILLONNAGE .....	25
FIGURE 13 : LES FENETRES ATMOSPHERIQUES .....	27
FIGURE 14 : PRINCIPE DE LA COMPOSITION COLOREE.....	29
FIGURE 15 : FILTRE PASSE-BAS .....	30
FIGURE 16 : FILTRE PASSE-HAUT.....	31
FIGURE 17 : FILTRE DIRECTIONNEL (STRUCTURES VERTICALES) .....	31
FIGURE 18 : SIGNATURE SPECTRALE DES FEUILLES .....	33
FIGURE 19 : NDVI SUR L'EUROPE (SOURCE : METEO FRANCE) .....	34
FIGURE 20 : SIGNATURE SPECTRALE D'UN SOL STANDARD (MOYENNE DE 564 SPECTRES MESURES AU DEBUT DES ANNEES 810) .....	36

## Liste des abréviations

ARCH	Assessing Regional Changes to Habitats
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer
BR	Basse Résolution
CCRS/CCT	Canada Center for Remote Sensing / Centre Canadien de Télédétection
Cemagref	L'institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CORINE	Coordination of environmental information (Coordination de l'information sur l'environnement)
DEM	Digital Elevation Model (voir MNT)
DIREN	Direction Régionale de l'Environnement
DMC	Disaster Monitoring Constellation
EEOS	Epidemiology Earth Observation Services
ENGREF	Ecole National du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
ENVISAT	Environmental Satellite
EOS	Earth Observing System (Système d'Observation de la Terre)
ERS	European Remote Sensing Satellite (Satellite de télédétection européen)
ESA	European Spatial Agency (Agence Spatiale Européenne)
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EVI	Enhanced Vegetal Index
GEO	Group on Earth Observations (Groupe sur les Observations de la Terre)
GEOSUD	GEOInformation for SUSTAINABLE Development (Information spatiale et Développement Durable)
GMES	Global Monitoring for Environment and Security (Programme européen de surveillance de la Terre)
GPS	Global Positioning System (Système de Positionnement Mondial)
HR	Haute Résolution
HRG	Haute Résolution Géométrique
INBO	Instituut voor Natuur – en Bosonderzoek (Institut de Recherche pour la Nature et la Forêt)
IR	Infrarouge
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRS-LISS	Indian Remote Sensing Satellite - Linear Imaging and Self Scanning sensor (Satellite Indien de Télédétection)
J.O	Journal Officiel
LIDAR	Light Detection And Ranging
METEOSAT-VISSR	Meteo Satellite - Visible and Infrared Spin Scan Radiometer
MNE	Modèle Numérique d'Elevation

MNT	Modèle Numérique de Terrain
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MR	Moyenne Résolution
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NOAA-AVHRR	National Oceanic and Atmospheric Administration's - Advanced Very High Resolution Radiometer
NPdC	Nord-Pas de Calais
PIAO	Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur
PIR	Proche Infrarouge
PNRZH	Programme National de Recherche sur les Zones Humides
RADAR	RADio Detection And Ranging
RADARSAT	RADAR Satellite
RVB	Rouge-Vert-Bleu
SAR	Synthetic Aperture Radar ((Radar à synthèse d'ouverture)
SIG	Système d'Information Géographique
SIRS	Systèmes d'Information à Référence Spatiale
SONAR	SOund NAVigation and Ranging
SPOT	Satellite Probatoire pour l'observation de la Terre
THR	Très Haute Résolution
TM	Thematic Mapper
UTM	Universal Transverse Mercator
VITO	Institut Flamand de Recherche Technologique
WGS	World Geodetic System

## Introduction

Au-delà des expériences recensées au cours de cette mission 2, la mission 3 se propose de réaliser une documentation technique sur la technologie de télédétection. Pour rappel, la mission 2 consiste à réaliser un inventaire des expériences significatives européennes menées dans le domaine de la télédétection et de la biodiversité en Europe et le suivi d'habitats naturels. Ici, il s'agit de :

- Recenser les technologies de télédétection actuellement disponibles ou à venir
- Présenter leurs caractéristiques techniques, organisationnelles et financières
- Analyser les nouvelles méthodes de traitement des données en développement
- Analyser les prestations de services disponibles ou à venir (notamment dans le cadre du programme GMES)
- Qualifier le potentiel d'usages de ces services pour les besoins du territoire transfrontalier Kent/NPdC

Ainsi, le présent rapport doit présenter une analyse de la télédétection, en termes de technologie et de méthodologie. La présente documentation doit permettre de poser les bases sur les principes guidant la télédétection (technologies actuellement disponibles ou à venir, leurs caractéristiques techniques, les nouvelles méthodes de traitement des données en développement, etc.) afin de pouvoir répondre aux futurs besoins qui seront exprimés par les utilisateurs.

En termes de méthodologie de travail et dans le but de réaliser ce rapport, tout un ensemble de démarches a été réalisé. Ainsi, de manière non exhaustive, on peut citer :

- Réunions internes à SIRS avec les différents experts de la télédétection.
- Réunions et rencontres avec des acteurs du suivi d'habitats en France et en Europe.
- Participations à des workshops européens sur le suivi d'habitats.
- Contacts avec les différents fournisseurs de services : données satellitaires (contacts directs et par sites internet des fournisseurs) et logiciels de télédétection (participation à la présentation de nouvelle version de logiciel).
- Recherches bibliographiques internes à SIRS.
- Recherches bibliographiques et études documentaires à partir de cours de télédétection, articles scientifiques parus sur internet.

## 1. La Télédétection Spatiale

### 1.1. Les principes physiques de la télédétection

#### 1.1.1. Les principes de base

La télédétection est « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (J.O du 11 décembre 1980). Elle utilise les propriétés d'émission ou de rayonnement des ondes électromagnétiques par les objets. Il s'agit donc d'une discipline qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Parmi toutes ces plates-formes, nous allons plus particulièrement nous intéresser à la télédétection spatiale.

Le principe de base de la télédétection implique la mesure d'une énergie réfléchi sur la surface terrestre ou émise par celle-ci. Cette énergie peut provenir de différentes sources. Il peut s'agir d'une source naturelle comme le soleil qui illumine la surface terrestre. Celle-ci est la plus commune. Le rayonnement alors réfléchi par la surface de la Terre est ensuite capté et enregistré par le capteur embarqué sur le satellite. Par ailleurs, la surface de la Terre se comporte également comme une source naturelle en émettant son propre rayonnement. On est dans le domaine de la télédétection passive. En outre, l'énergie peut également provenir d'une source artificielle comme les antennes émettrices des capteurs. Ces antennes émettent un rayonnement vers la surface terrestre qui est ensuite rétrodiffusé et enregistré par la plateforme satellitale. Ce processus est celui de la télédétection active dans le domaine des hyperfréquences.

Au cours de son trajet, le rayonnement électromagnétique est amené à interagir avec l'atmosphère et la surface terrestre. La nature des interactions dépend du rayonnement et des propriétés spectrales des surfaces.

La mesure et l'enregistrement du signal réfléchi, émis ou rétrodiffusé par la surface de la Terre se réalise au niveau de la plateforme satellitale par les capteurs.

Enfin, afin que les données récoltées par le satellite puissent être traitées, elles doivent être transmises au sol vers une station satellite pour subir un ensemble de prétraitements. En effet, les données enregistrées à bord se présentent sous la forme de données brutes, elles doivent donc subir tout un ensemble de prétraitements (corrections radiométriques, géométriques,...).

#### 1.1.2. L'onde électromagnétique

L'énergie se transporte d'un point à un autre sous la forme d'une onde. Il existe deux types d'ondes :

- les ondes mécaniques qui se propagent par vibration de la matière (exemple de l'onde sonore)
- les ondes électromagnétiques qui se propagent dans le vide en dehors de tout support matériel.

Dans le cadre de la télédétection, c'est cette dernière qui est étudiée.

L'onde électromagnétique se compose de deux champs perpendiculaires l'un par rapport à l'autre, à savoir, un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Sa vitesse de propagation dépend du milieu considéré. Par exemple, dans le vide, la vitesse de propagation est égale à  $3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>.

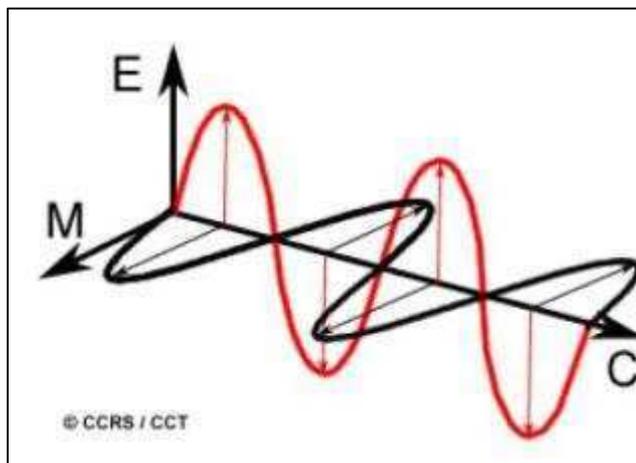


Figure 1 : L'onde électromagnétique (source CCRS/CCT)

### 1.1.3. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde ou de leur fréquence. Par exemple, l'énergie solaire n'est pas uniformément répartie sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Ainsi, le soleil émet son maximum d'énergie dans la portion dite visible. Cependant, d'autres longueurs d'ondes sont émises par le soleil comme le proche infrarouge, le moyen infrarouge ou l'infrarouge thermique.

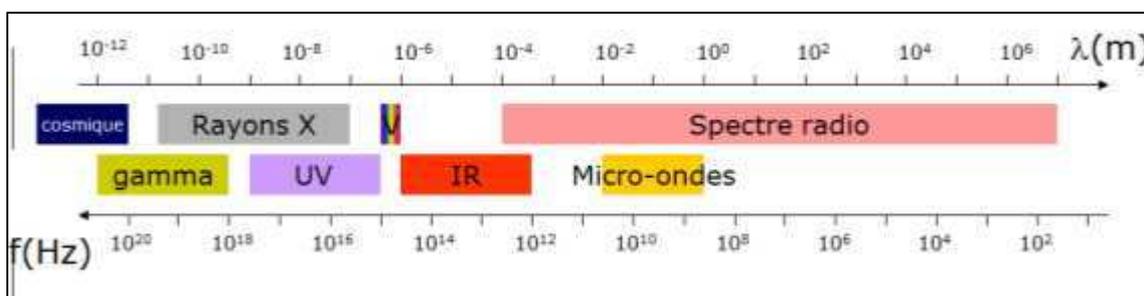


Figure 2 : Le spectre électromagnétique (longueurs d'onde et fréquences)

Trois domaines spectraux sont particulièrement exploités en télédétection :

- le domaine du visible,
- le domaine des infrarouges (comprenant le proche infrarouge, le moyen infrarouge et l'infrarouge thermique),
- le domaine des micro-ondes (ou hyperfréquences).

Le domaine du visible est la portion du spectre à laquelle l'œil humain est sensible et qui permet de visualiser les couleurs. Il s'étend de 0,4  $\mu$ m (couleur bleue) à 0,8  $\mu$ m (couleur rouge). Le rayonnement solaire atteint son maximum, à savoir 0,5  $\mu$ m, dans ce domaine.

Il existe de nombreux capteurs qui permettent de capter l'énergie électromagnétique provenant des différentes fenêtres spectrales du domaine du visible. Par exemple, le satellite américain Landsat dispose de trois bandes dans le visible (bleu, vert, rouge), le satellite du SPOT dispose de deux bandes dans le domaine du visible (vert et rouge).

Le rayonnement infrarouge correspond au rayonnement émis par tous les corps dont la température excède les  $-273^{\circ}\text{C}$ , (le « zéro absolu »). Le domaine de longueurs d'onde de l'infrarouge s'étend de  $0,7\ \mu\text{m}$  à  $100\ \mu\text{m}$ . La gamme de l'infrarouge est généralement sous-divisée en quatre domaines d'infrarouge, à savoir, le proche infrarouge dont la gamme s'étend de  $0,78$  à  $1,2\ \mu\text{m}$ , l'infrarouge moyen dont les longueurs d'onde se situent entre  $1, 2$  et  $3\ \mu\text{m}$ , l'infrarouge thermique s'étalant de  $3\ \mu\text{m}$  à  $15\ \mu\text{m}$  et l'infrarouge lointain entre  $15\ \mu\text{m}$  et  $100\ \mu\text{m}$ .

En télédétection, le proche et le moyen infrarouge présentent un intérêt certain, c'est pourquoi, de nombreux satellites lancés ces dernières années sont équipés de capteurs sensibles à ces longueurs d'onde. En effet, le proche infrarouge est fortement réfléchi chez les végétaux et est donc révélateur d'un couvert végétal. Ainsi, le proche infrarouge déterminera plutôt les quantités de biomasse, car il est réceptif à la morphologie de la plante ainsi qu'à la structure des feuilles. De son côté, le moyen infrarouge permet de mettre en évidence une autre propriété des feuilles, la teneur en eau. L'utilisation du moyen infrarouge permet de réduire les effets des aérosols et de la diffusion.

Les ondes radar ou hyperfréquences s'étendent sur des longueurs d'onde bien plus grandes, à savoir,  $1\ \text{cm}$  à  $1\ \text{m}$ . Ces longueurs d'onde permettent notamment d'observer la surface de la Terre de jour comme de nuit quelles que soient les conditions atmosphériques. En effet, l'atmosphère est quasiment transparente à ces longueurs d'onde. Le rayonnement traverse donc sans problème les nuages. En télédétection, le domaine des hyperfréquences est, notamment, utilisé par les capteurs actifs (RADAR, LIDAR, SONAR) qui émettent leur propre rayonnement.

La mesure de l'énergie ainsi propagée est la radiométrie; le capteur mesure le flux d'énergie transporté par les ondes électromagnétiques. Usuellement, ce sont des valeurs de luminance et de réflectance qui sont déterminées par le capteur. La luminance (en anglais *radiance*) représente la puissance émise dans une direction donnée par une surface non ponctuelle, par unité d'angle solide. Elle s'exprime en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ .

Un des aspects contraignants de cette quantité est qu'elle ne permet de réaliser que des comparaisons de valeurs entre objets d'une même image. Le suivi temporel d'une surface au cours du temps ne peut se faire par l'utilisation de la luminance puisqu'elle est dépendante de l'éclairement incident (soit l'énergie reçue depuis toutes les directions par la surface recevant les ondes électromagnétiques). Il faut donc convertir les luminances en une grandeur indépendante de l'éclairement incident, à savoir la réflectance. La réflectance est donc le rapport entre la luminance mesurée au capteur et l'éclairement directionnel incident. C'est une grandeur sans unité comprise entre  $0$  et  $1$ . Il convient également de préciser que les définitions présentées ici de la luminance, l'éclairement et la réflectance dépendent de l'intervalle étroit de longueur d'onde.

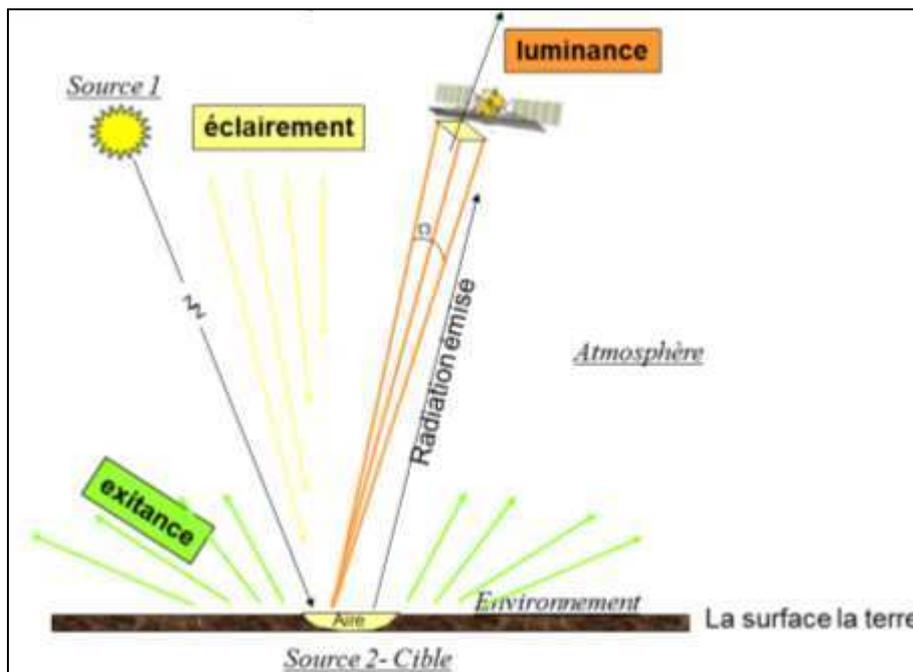


Figure 3 : Les différentes mesures radiométriques (source CCRS/CCT)

Outre le fait d'être réfléchi, l'énergie peut aussi être transmise par la surface ou absorbée par la cible. C'est l'ensemble de ces trois phénomènes qui caractérise chaque cible. Cette combinaison détermine ce que l'on appelle la signature spectrale d'un objet. Il s'agit de l'émission caractéristique d'un objet en fonction des longueurs d'onde.

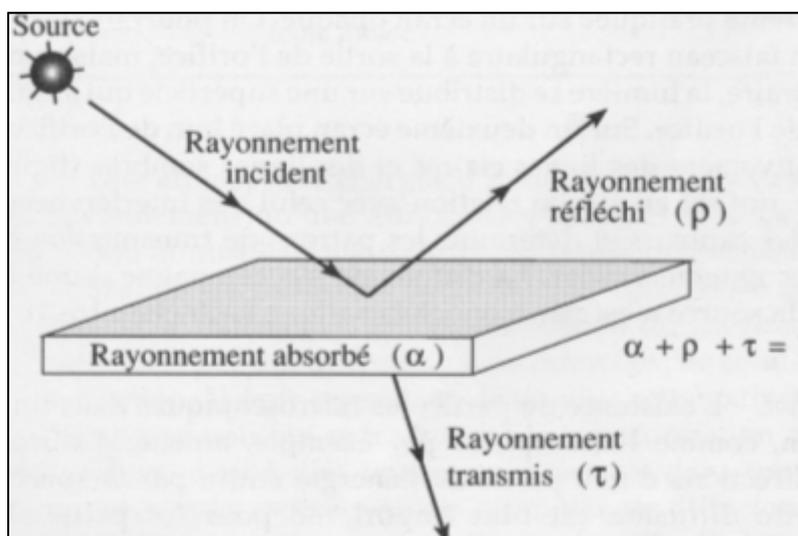


Figure 4 : Les interactions du rayonnement incident avec la cible

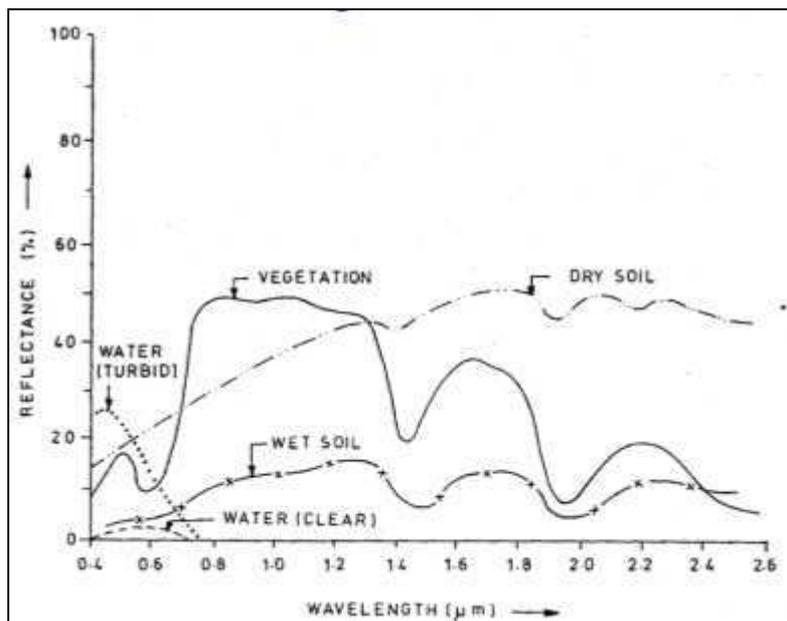


Figure 5 : Variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde et du type de sol

### 1.1.4. L'orbite et la fauchée du satellite

La trajectoire empruntée par un satellite dans son mouvement autour de la Terre est appelée orbite. L'orbite d'un satellite est fonction des capacités techniques des capteurs qu'il transporte et des objectifs spécifiques de la mission. Le choix d'une orbite est déterminé par l'altitude (la hauteur du satellite au-dessus de la surface de la Terre), l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre. Certains satellites survolent constamment la même région à la surface de la Terre. Ils sont en orbite géostationnaire dans le plan équatorial de la Terre. Ces satellites angulaires ont une altitude d'environ 36 000 kilomètres et se déplacent à une vitesse qui correspond à celle de la Terre, donnant ainsi l'impression qu'ils sont stationnaires. Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une région spécifique. Les satellites de communication et d'observation des conditions météorologiques sont situés sur de telles orbites. L'altitude élevée de certains satellites météorologiques leur permet d'observer les nuages et les conditions qui couvrent un hémisphère complet de la Terre.

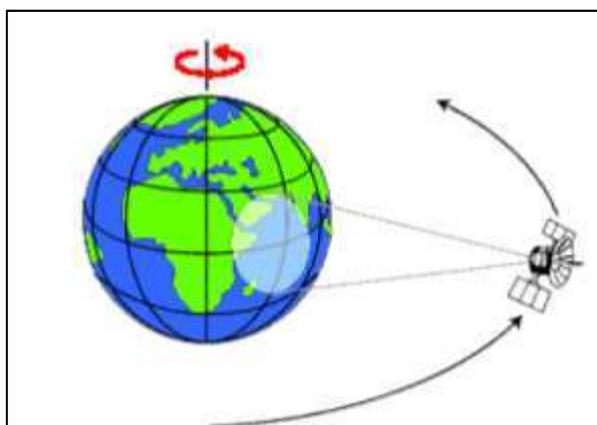


Figure 6 : Orbite géostationnaire

D'autres plates-formes spatiales suivent une orbite légèrement inclinée par rapport à l'axe des pôles. Cette configuration, combinée à la rotation de la Terre (Ouest-Est), implique qu'au cours d'une période donnée, les satellites peuvent observer la quasi-totalité de la surface de la Terre. Ce type d'orbite est appelé orbite quasi-polaire liée à de l'inclinaison de l'orbite du satellite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la Terre. La plupart des satellites sur orbite quasi-polaire ont aussi une orbite héliosynchrone; c'est-à-dire qu'ils observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Pour une latitude donnée, la position du Soleil dans le ciel au moment où le satellite survole une certaine région au cours d'une saison donnée sera donc toujours la même. Cette caractéristique orbitale assure des conditions d'illumination solaire similaires, lorsqu'on recueille des données pour une saison particulière sur plusieurs années ou pour une région particulière sur plusieurs jours. Ceci est un facteur important lorsqu'on compare deux images successives ou lorsqu'on produit une mosaïque avec des images adjacentes, puisque les images n'ont pas à être corrigées pour tenir compte de l'illumination solaire.

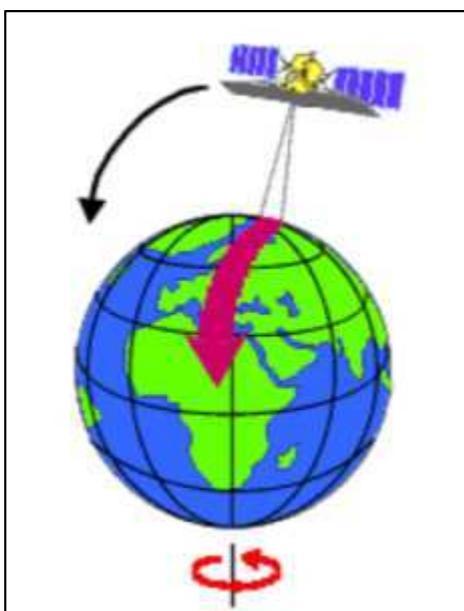


Figure 7 : Orbite quasi-polaire

De nos jours, la plupart des plates-formes satellitaires sont placées sur orbite quasi-polaire. Elles se déplacent donc vers le nord d'un côté de la Terre et vers le sud dans l'autre moitié de leur orbite. Ces deux types de passage du satellite se nomment respectivement orbite ascendante et orbite descendante. Les capteurs qui enregistrent l'énergie solaire réfléchi par la Terre ne recueillent l'information qu'au cours de leur orbite descendante, lorsque le Soleil illumine la Terre.

Les capteurs actifs qui possèdent leur propre source d'illumination ou les capteurs passifs qui enregistrent l'énergie émise par la planète (l'énergie infrarouge thermique par exemple) peuvent amasser des données autant lors des orbites ascendantes que descendantes de leurs satellites.

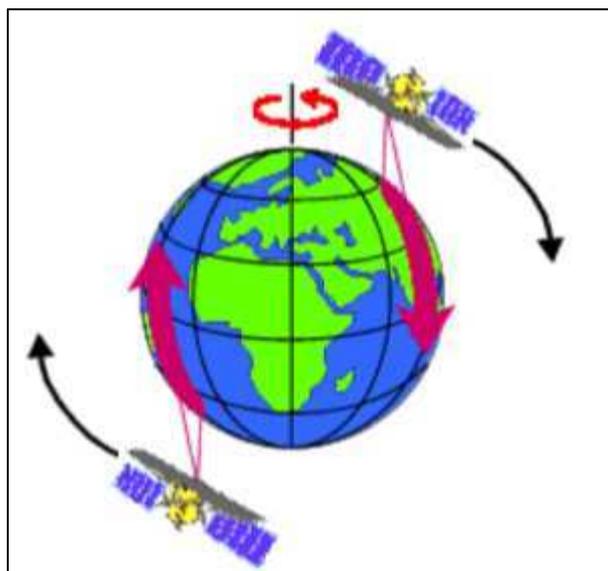


Figure 8 : Passe montante et passe descendante

Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur "observe" une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de fauchée. Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et plusieurs centaines ou même plusieurs milliers de kilomètres. Pour les satellites à orbite quasi-polaire, le satellite se déplace selon une trajectoire nord-sud. Cependant, la trajectoire du satellite présente une composante vers l'ouest due à la rotation de la Terre. Ce mouvement apparent du satellite permet à la fauchée du capteur d'observer une nouvelle région à chacun des passages consécutifs du satellite. L'orbite du satellite et la rotation de la Terre permettent une couverture complète de la surface de la planète après un cycle orbital complet.

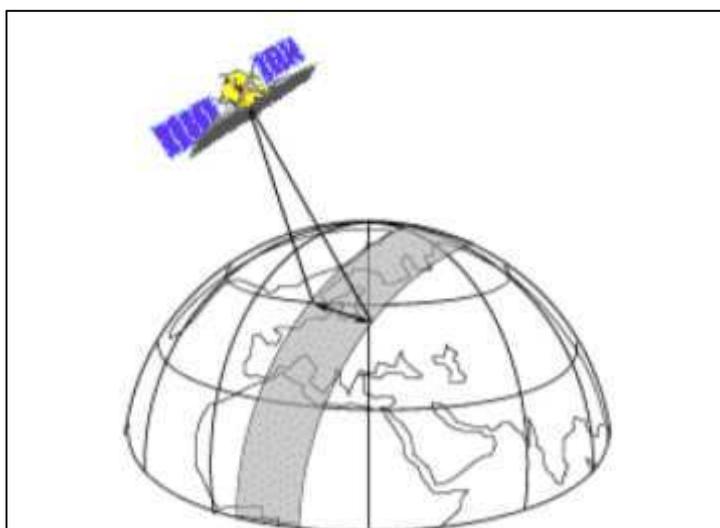


Figure 9 : La fauchée d'un satellite

### 1.1.5. Les résolutions des images satellites

Une des considérations majeures concernant le choix du satellite et du capteur associé (et donc de l'image satellite) est le choix à réaliser en termes de résolutions spectrales, spatiales et temporelles.

#### 1.1.5.1. La résolution spatiale

La résolution spatiale d'un capteur est exprimée et définie par le pixel. Elle correspond usuellement à la plus petite distance détectable et discernable au sol. Elle est communément exprimée en mètres. On peut présenter un classement général des capteurs selon la taille du pixel de la manière suivante :

- Les données à basse résolution (BR) spatiale dont la taille du pixel est supérieure à 1000 mètres. On peut citer les satellites METEOSAT-VISSR ou NOAA-AVHRR.
- Les données à moyenne résolution (MR) dont la taille du pixel se situe entre 20 et 1000 mètres. On trouve, par exemple, les satellites SPOT-VEGETATION ou MODIS-Terra et MODIS-Aqua.
- Les données à haute résolution (HR) de taille de pixel entre 10 et 20 mètres. On peut citer les satellites EOS-ASTER ou Landsat-TM et Landsat-ETM+.
- Les données à très haute résolution (THR) spatiale dont la taille de pixel se situe entre 1 et 10 mètres. On trouve, par exemple, les satellites SPOT-5, Quickbird, Ikonos ou WorldView-1 et WorldView-2.

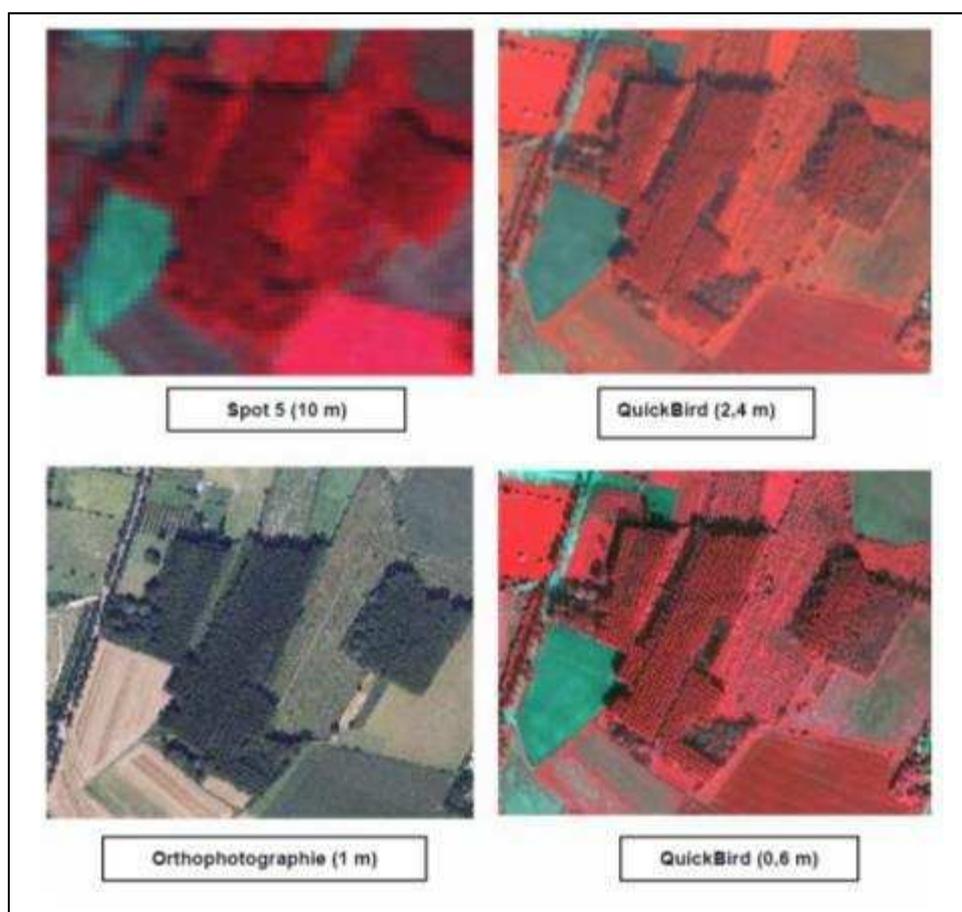


Figure 10 : Comparaison de quatre résolutions spatiales

L'amélioration de la résolution spatiale est l'un des principaux champs d'investigation dans le domaine de la télédétection spatiale et des satellites. Ainsi, ces dernières années, le nombre de plateformes satellitaires capables de fournir des données à très haute résolution, jusqu'à alors limitées aux plateformes aéroportées, avec des tailles de pixel de 1 à 10 mètres, a considérablement augmenté.

### **1.1.5.2. La résolution spectrale**

Selon les capteurs, la largeur de la gamme spectrale et le nombre de bandes spectrales varient. Plus la gamme spectrale est grande et plus les bandes associées sont nombreuses et étroites, meilleure sera la détection de phénomènes spécifiques à certains domaines spectraux. On parle alors de résolution spectrale.

### **1.1.5.3. La résolution temporelle**

Chaque satellite dispose de ce que l'on appelle un temps de revisite, c'est-à-dire le temps entre deux passages consécutifs au-dessus de la même zone. Ce temps de revisite peut s'étendre de quelques jours à une dizaine de jours. En théorie, le temps de revisite est plus court que le temps écoulé entre deux dates nécessaires pour un suivi. Par conséquent, la résolution temporelle peut sembler sans importance. Toutefois, la présence de nuages sur les scènes est un obstacle majeur à la collecte d'images non perturbées.

## **1.2. Les capteurs embarqués sur les satellites**

Comme on l'a vu précédemment, la mesure et l'enregistrement du signal se réalise au niveau de la plateforme satellitaire par les capteurs. On distingue les capteurs passifs des capteurs actifs.

### **1.2.1. Les capteurs passifs**

#### **1.2.1.1. Généralités**

Les capteurs passifs utilisent les propriétés de réflexion du rayonnement solaire dans le domaine optique (visible et proche infrarouge) et celles de l'émission dans l'infrarouge thermique et dans le domaine des micro-ondes, afin de caractériser les objets à la surface terrestre.

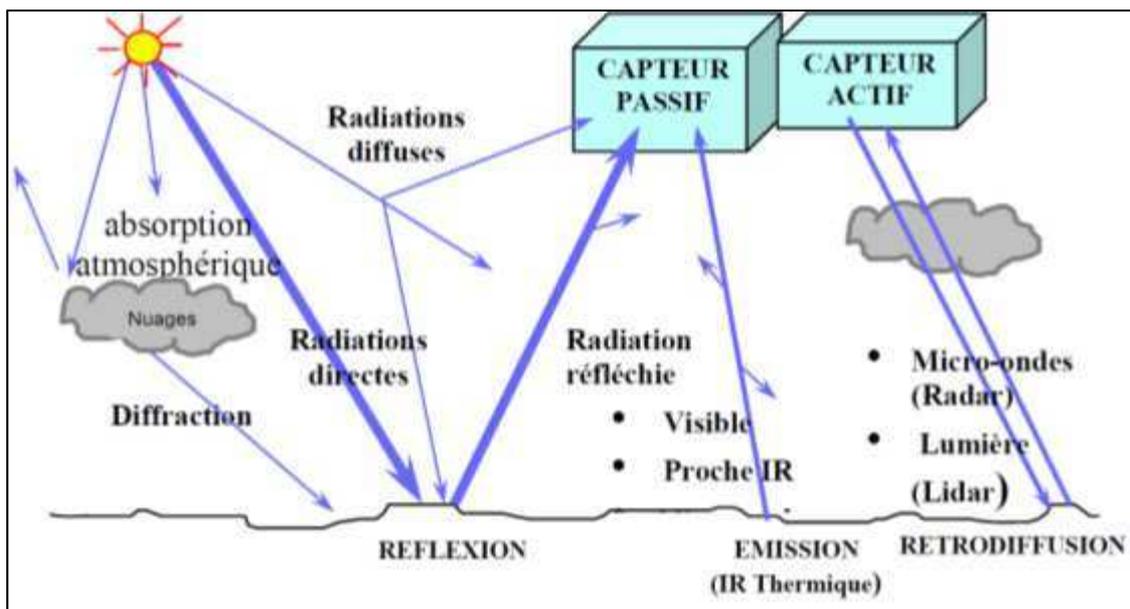


Figure 11 : Les capteurs en télédétection

Un avantage majeur des systèmes satellitaires par rapport aux technologies par photographie aérienne est la largeur de scène des images. Cet apport doit permettre de réduire les coûts de traitement des données sur de vastes zones d'étude.

Néanmoins, le capteur passif ne peut percevoir que l'énergie réfléchiée par la surface lorsque le Soleil illumine la Terre ou l'énergie transmise par la Terre. Les conditions atmosphériques sont des obstacles majeurs pour l'utilisation de tels capteurs. Le capteur passif n'est donc que récepteur.

Il existe différents types de satellites d'observation de la Terre suivant les domaines d'application (météorologie, océanographie,...) et suivant les différents systèmes d'acquisition d'images. Les données fournies par les satellites varient selon les caractéristiques du capteur embarqué sur le satellite mesurant les radiations électromagnétiques réfléchies par les corps qui composent la surface terrestre :

- Pour les ondes électromagnétiques du visible et de l'infrarouge proche, les capteurs utilisés sont optiques, c'est-à-dire qu'ils reçoivent la réflexion de la lumière provenant de la surface terrestre et n'émettent aucun signal.
- Pour l'infrarouge thermique, des détecteurs thermiques sont utilisés.

Enfin l'acquisition d'une même scène se fait suivant deux modes principaux :

- Le mode panchromatique correspond à une seule image, produite à partir de la gamme spectrale à laquelle le capteur est sensible (visible et souvent une partie du proche infrarouge). Cette image est traduite en niveau de gris.
- Le mode multispectral correspond au mode par lequel plusieurs images sont prises simultanément, chacune dans une région différente du spectre électromagnétique.

### 1.2.1.2. Les différents types de satellites

Ce chapitre a pour vocation de recenser, de la manière la plus exhaustive possible, les différents satellites THR, HR et MR de la télédétection spatiale. Les différents satellites et les caractéristiques techniques des capteurs embarqués (résolution spatiale, bandes spectrales, résolution temporelle des satellites, etc.) sont présentés sous la forme de tableaux récapitulatifs présents en annexes.

### 1.2.2. Les capteurs actifs

Les capteurs actifs sont utilisés dans le domaine des hyperfréquences (énergie émise par le capteur lui-même et rétrodiffusée par la surface terrestre). Le capteur actif produit sa propre énergie afin d'illuminer l'objet visé. L'énergie réfléchiée par cette cible est alors perçue par le capteur pour être mesurée. Le capteur actif utilise des longueurs d'onde qui ne sont pas produites en quantité suffisante par le Soleil comme les micro-ondes, L'un des points forts de ce type de capteur est qu'il permet des mesures quel que soit le moment de la journée ou de la saison.

Il existe différentes formes de capteurs actifs qui sont : le RADAR (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) ou le LIDAR (*L*ight *D*etection *A*nd *R*anging). Le RADAR fonctionne dans les hyperfréquences (micro-onde de 1,0 millimètre à 1,0 mètre) et le LIDAR génère une série de pulsations laser.

#### 1.2.2.1. Le RADAR

Le RADAR se réfère donc à ces capteurs qui illuminent la surface de la Terre en générant une source d'énergie dans le domaine des micro-ondes selon la direction souhaitée. Ces capteurs sont capables de fonctionner, à la fois, de jour et de nuit. De plus, puisqu'ils fonctionnent à des longueurs d'onde de l'ordre du cm et du mm, ils sont relativement peu affectés par les conditions atmosphériques (nuages et pluies).

Par convention, les systèmes RADAR sont caractérisés par une lettre désignant la gamme de longueurs d'onde (ou de fréquences) du signal électromagnétique généré et la polarisation du signal (horizontale H ou verticale V). La majorité des systèmes RADAR fonctionne en bande X (2,4 - 3.8 cm), en bande C (3,8 cm - 7,5 cm), bande L (15,0 cm – 30,0 cm) ou bande P (30,0 cm – 100,0 cm).

Jusqu'à présent, la majorité des systèmes satellitaires lancés ne permet de collecter des données que sur une unique bande. Actuellement, la technologie RADAR se développe rapidement et la perspective de systèmes multi-bandes, multi-polarisations est prometteuse. Ainsi, dans le futur, de plus en plus de systèmes satellitaires déployés seront, a priori, capables de collecter des données sur plusieurs bandes, améliorant ainsi la capacité de discriminer des objets.

Dans une perspective de suivi des habitats, les capteurs RADAR présentent quelques avantages.

D'une part, les résolutions spatiales sont souvent de meilleure qualité vis-à-vis des capteurs passifs qui ne permettent pas de fournir régulièrement des images à des résolutions spatiales adéquates. D'un point de vue technique, ces capteurs permettent de fournir des images avec des tailles de pixels jusqu'à 1 mètre.

De plus, la capacité de ces capteurs à acquérir des données quelles que soient les conditions atmosphériques procure un avantage supplémentaire du point de vue opérationnel vis à vis des capteurs passifs.

Par ailleurs, le développement des techniques par interférométrie permet d'obtenir une information sur la hauteur des objets (paire de capteurs embarqués sur la plate-forme qui permet de capter deux images d'une même scène mais légèrement décalées).

Les systèmes RADAR permettent une étude des milieux forestiers. La technologie RADAR présente un potentiel pour la distinction des zones boisées des autres surfaces. Même si l'utilisation d'images ne comprenant qu'une seule bande n'est peut-être pas la meilleure solution pour la cartographie d'habitats, les données en bande L permettent, par exemple, de différencier les basses, moyennes végétations des zones de forêts ou urbaines, avec des niveaux de précisions acceptables de l'ordre de 80% pour la forêt. Aux longueurs d'onde plus grandes, les données en bande L et P, la pénétration du signal dans la canopée est plus importante. Ainsi, les images permettent de fournir des informations liées aux couches inférieures de la forêt.

Toutefois, il reste certains problèmes techniques spécifiques au traitement des images RADAR. Les pixels des images sont sensibles à certaines caractéristiques des surfaces (autres que la simple présence de végétation) comme par exemple la rugosité ou la topographie. En ce qui concerne les surfaces végétalisées, les images RADAR sont sensibles à l'humidité et à leur structure.

Par ailleurs, ces images sont affectées par une source spécifique de bruit aléatoire appelé « *speckle* » (chatoiement) qui peut conduire à une réduction/dégradation de la résolution spatiale de départ. Cette réduction de la résolution spatiale sera particulièrement importante lorsqu'une seule bande est disponible pour la cartographie.

De par leur potentiel, les applications des capteurs actifs peuvent être nombreuses. Ainsi, le RADAR peut être utilisé pour des applications portant sur :

- L'agriculture,
- L'utilisation dans les systèmes d'information ainsi que les modèles sur les cultures,
- L'identification du type de pratique et de la superficie des cultures, comme les parcelles en culture non labourées ou en labour partiel, les parcelles de pâturage permanent, les parcelles en labour conventionnel,
- La foresterie,
- La surveillance des régions fréquemment ennuagées comme les forêts tropicales par exemple,
- La cartographie des zones de coupe et de régénération,
- La géologie,
- La détection des failles et linéaments,
- L'océanographie,
- L'amplitude des vagues,
- La détection des navires,
- La détection des nappes de pétroles,
- La glace,
- La cartographie,
- La détection des icebergs,
- L'hydrologie,
- La détermination de la teneur en eau des sols et de la végétation,
- La surveillance des inondations,

- Les modèles hydrologiques,
- Le littoral ou la foresterie.

### 1.2.2.2. Le LIDAR

Le LIDAR se réfère à une gamme d'instruments dont la caractéristique principale est de transmettre une série d'impulsions laser (habituellement dans le proche infrarouge) vers une cible au sol qui retransmet une partie de l'énergie. Les signaux de retour sont détectés par le capteur LIDAR et les changements dans les propriétés de la lumière sont utilisés afin de déterminer une ou plusieurs propriétés de la cible. L'instrument LIDAR le plus simple utilise le délai de réponse pour déterminer, avec précision, la distance à la cible. Lorsque l'instrument est porté par une plate-forme aérienne (avion ou hélicoptère) dont la position et l'orientation sont contrôlées à l'aide d'un système de positionnement par GPS et de guidage inertiel, il est alors possible de déterminer la hauteur du terrain. La technologie LIDAR permet une acquisition des données avec une résolution spatiale de 1 à 2 mètres, et des hauteurs avec des précisions métriques.

La technologie Lidar offre des possibilités intéressantes en ce qui concerne le suivi des forêts notamment. En outre, alors que les capteurs passifs et les capteurs RADAR sont moins sensibles aux propriétés structurales des forêts denses, des recherches récentes indiquent que les instruments LIDAR permettent d'estimer plusieurs caractéristiques structurelles au sein des peuplements denses comme par exemple les forêts tempérées de conifères et de feuillus ainsi que les forêts tropicales denses.

Ainsi, la technologie LIDAR permet, par exemple, de déterminer la hauteur des arbres, le pourcentage de couverture de la canopée, le volume de bois ou la quantité de biomasse. En revanche, la possibilité de discriminer les espèces par l'utilisation de la seule technologie LIDAR n'est pas encore pleinement opérationnelle. Couplé avec les technologies de capteurs passifs, le LIDAR peut permettre de distinguer les zones boisées des zones de broussailles ou de prairies.

Le Lidar permet des applications complémentaires dans les domaines suivants :

- Le littoral,
- La prévention des inondations,
- La bathymétrie,
- L'hydrologie,
- Les glaciers et avalanches,
- Les glissements de terrain,
- La foresterie comme par exemple la création de Modèle Numérique de Terrain (MNT) ou de Modèle Numérique d'Elevation (MNE) ou la détermination des hauteurs et structures d'arbres,
- La surveillance des volcans,
- Les lignes de transmission,
- La cartographie des routes.

## 1.3. Les prétraitements des données

Avant de pouvoir manipuler les images satellites, un ensemble de prétraitements doit être réalisé afin de rendre les données brutes utilisables et éliminer certaines imperfections. En effet, lorsque le signal, après avoir été réfléchi par l'objet, est reçu par le capteur du satellite, l'information est dite brute. Ce

signal est prétraité au niveau de la plate-forme satellitaire puis il est envoyé au sol pour être traité (ou non) par des équipes de scientifiques. Ces traitements permettent de réaliser les corrections complémentaires habituelles (radiométriques, géométriques). Ainsi, chaque stade dans la chaîne de traitements correspond à un niveau de traitement des données qui constitue un produit accessible par un utilisateur.

Aujourd'hui, chaque fournisseur d'images propose sa propre nomenclature qui n'est pas transposable d'un capteur à un autre.

A l'avenir, la tendance veut que l'on s'oriente vers une nomenclature officielle internationale des images afin de connaître le niveau de correction des images. En outre, plus l'image est avancée dans la chaîne de traitements, plus son coût d'achat est important. C'est pourquoi, il est possible d'acheter les images non corrigées et de réaliser soi-même lesdites corrections.

### **1.3.1. La calibration**

La calibration consiste en la transformation de la donnée brute enregistrée par le capteur embarqué sur le satellite afin d'obtenir une information utile. En effet, cette donnée brute ne correspond à aucun paramètre auquel l'utilisateur pourrait associer un sens physique.

Ainsi, dans un premier temps, il s'agit de passer de la donnée brute en « Compte Numérique (CN) » à une mesure physique, la luminance, puis, dans un deuxième temps, un étalonnage absolu permet de modifier les valeurs relatives de l'image numérique en mesures de réflectance.

Cette étape est d'autant plus importante qu'elle doit permettre d'obtenir un jeu d'images cohérentes du point de vue spectral quelle que soit la date de prise de vue ou le capteur.

### **1.3.2. La correction radiométrique**

Le but des corrections radiométriques est de réaffecter à chaque pixel une valeur de radiométrie la plus fidèle possible de celle mesurée sur le terrain.

Ces corrections radiométriques permettent ainsi de corriger différents phénomènes internes au capteur, synonymes de bruits radiométriques pour l'image (linéarité du balayage du miroir, erreurs d'échantillonnage dans le temps, erreur systématique due au détecteur, géométrie perspective, distorsion panoramique). Ces phénomènes sont essentiellement dus au vieillissement, au dérèglement ou au mauvais fonctionnement du capteur. Parmi les corrections radiométriques habituelles, on trouve la restauration. Il s'agit de réattribuer une valeur spectrale aux pixels où l'information est manquante. Il est ainsi possible de corriger des lignes de pixels absentes ou endommagées en tenant compte des lignes voisines par interpolation ou filtre médian ou de corriger les effets de lignages (bandes de bruit régulières dues aux traces de balayage lors fonctionnement du capteur) par harmonisation des histogrammes.

Ces corrections sont souvent prises en charges par les fournisseurs de données qui réalisent, en interne, les prétraitements radiométriques.

### **1.3.3. La correction géométrique**

Les images satellites, même si elles disposent d'une référence spatiale (système de référence, voire une projection associée), peuvent faire face à un positionnement géométrique biaisé. La prise d'images

n'est jamais une reproduction fidèle de la surface visée. Une multitude de facteurs est responsable des distorsions de l'image. En effet, les images de télédétection, acquises sous certaines conditions de visée, présentent des distorsions géométriques. Elles ont plusieurs origines qui peuvent être classées en trois catégories :

- Les distorsions relatives au satellite : altitude de la plate-forme ou mouvements (orientation et vitesse) du système de balayage et de la plate-forme (tangage, roulis, lacet).
- Les distorsions relatives au capteur : vitesse de déplacement du miroir, irrégularité du miroir, angle de prise de vue, perspective.
- Les distorsions relatives à la Terre : rotation, courbure de la Terre ou topographie.

Au final, il peut exister un décalage de plusieurs mètres, voire dizaine de mètres, entre la réalité terrain et l'image.

Une correction géométrique de l'image permet alors de corriger ces distorsions. Il est primordial de procéder à ces corrections afin de pouvoir, par exemple, comparer deux images prises à des époques différentes, réaliser une mosaïque de plusieurs images, pouvoir superposer l'image satellite à une carte topographique numérisée (connaître les coordonnées terrain selon un système précis, donner une information supplémentaire pour l'interprétation, mettre à jour une carte, s'assurer de l'ajustement de l'interprétation à un système précis) ou à une carte thématique issue d'une interface SIG.

Pour corriger ces déformations géométriques, deux méthodes existent :

- la méthode directe.
- la méthode inverse.

**La méthode directe** est de loin la plus complexe. Elle consiste à modéliser mathématiquement chacun des phénomènes, nommés plus haut, qui affectent géométriquement l'image et ensuite corriger l'image déformée selon ces modèles. Étant donné la difficulté à modéliser les nombreuses déformations, cette méthode est très peu utilisée.

**La méthode inverse** est par conséquent la plus utilisée. Il s'agit d'établir une relation mathématique entre l'image brute et une image de référence (une image satellitaire de la même région déjà corrigée, une carte vectorielle ou même une carte de référence). Autrement dit, on localise les mêmes lieux sur l'image à corriger et sur l'image de référence. Après cette collecte de points, il faut définir la fonction mathématique que nous permettra d'effectuer la transformation.

Deux approches existent :

- le modèle de transformation planimétrique.
- le modèle de transformation non planimétrique.

Cette dernière méthode est la plus couramment utilisée car elle est complètement indépendante de la géométrie de capteurs et elle permet de corriger aisément les distorsions difficiles à modéliser. L'idée de cette méthode est de construire, à partir de jeu de couples de coordonnées de points de référence ou points d'amer (*Ground Control Point*) et de points sur l'image à modifier, un polynôme de degré 1, 2, voire plus, selon l'importance des déformations, identifiant la relation entre les points de l'image originale et les points de l'image de référence et qui permet donc de transformer l'image biaisée.

Plus le degré du polynôme est élevé, plus l'image transformée sera étirée. De plus, chaque degré de polynôme nécessite un nombre minimal de points d'appui (lié au nombre d'inconnues du polynôme). Il est également primordial que les points d'appui soient répartis sur l'emprise totale de l'image car les parties de l'image sur lesquelles aucun point de référence n'est établi demeurent déformées.

Une fois la transformation appliquée, l'image n'est plus représentée sur une maille rectangulaire. Autrement dit, les points dans le système des coordonnées d'origine ne tombent pas exactement sur les points de maillage de la nouvelle grille de référence. Un ré-échantillonnage est alors nécessaire afin de déterminer la nouvelle valeur radiométrique du pixel corrigé.

Plusieurs méthodes de ré-échantillonnage existent :

- la méthode par plus proche voisin (cette méthode consiste à placer les points de l'ancien maillage sur les plus proches du nouveau maillage),
- la méthode par interpolation linéaire (cette méthode est fondée sur la moyenne pondérée des quatre plus proches pixels de l'ancien maillage),
- la méthode dite convolution cubique (c'est la même façon de procéder qu'avec l'interpolation linéaire, mais avec une matrice de 4 x 4 pixels).

La première, contrairement aux deux autres, présente l'avantage d'être spectralement fidèle aux valeurs originales mais il peut y avoir des valeurs sautées et des duplicatas ainsi qu'un effet d'escalier. Les deux dernières sont plus précises spatialement.

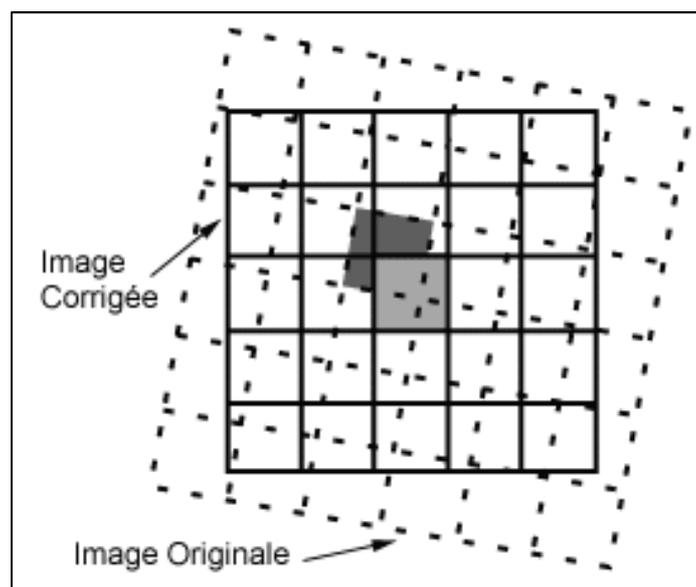


Figure 12 : Ré-échantillonnage

#### 1.3.4. La correction atmosphérique

En télédétection, l'atmosphère, de par sa composition, peut être considérée comme un milieu perturbateur du rayonnement électromagnétique. En effet, les molécules gazeuses, les gouttes de pluie, de neige, de cristaux de glace, les particules en suspension (aérosols, poussières, fumées,...) sont autant de facteurs affectant le rayonnement, d'autant plus que le signal électromagnétique mesuré au niveau des capteurs traverse par deux fois l'atmosphère.

La contribution de l'atmosphère dans la valeur radiométrique d'un pixel peut ainsi dépasser 50% dans certaines longueurs d'ondes, comme le bleu par exemple. Les effets des composantes de l'atmosphère sur le rayonnement se traduisent alors par deux phénomènes d'interaction que sont la diffusion qui se décline sous 3 formes (diffusion de Rayleigh, de Mie et non-sélective) et l'absorption. Il est donc impératif de prendre en compte ces phénomènes puisque le signal électromagnétique mesuré par le capteur est perturbé par ces interactions.

Les perturbations varient en fonction des composantes de l'atmosphère, de la longueur d'onde, de l'épaisseur optique et de l'angle d'incidence (i.e. angle zénithal).

Ainsi, pour les phénomènes de diffusion, la diffusion de Rayleigh concerne les molécules aux dimensions plus petites que la longueur d'onde, la diffusion de Mie, pour les molécules dont la dimension est voisine de la longueur d'onde et la diffusion non-sélective concerne les particules de grandes tailles par rapport à la longueur d'onde. Ci-après, des exemples de taille de molécules et particules présentes dans l'atmosphère :

- Les molécules gazeuses (azote, oxygène, argon, dioxyde de carbone) : taille de  $10^{-8}$  cm ou 0,001  $\mu\text{m}$ ,
- Les aérosols solides : 0,1  $\mu\text{m}$  à 1  $\mu\text{m}$ ,
- Les cristaux de glace des nuages : 1  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ ,
- Les fumées industrielles, brouillard : 0,5  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$ ,
- Les pollens et cendres : 10  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ ,
- Les nuages, brumes : 20  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$ ,
- Les gouttes d'eau : 0,5  $\mu\text{m}$  à 5000  $\mu\text{m}$ ,
- Les grêlons : taille jusqu'à 10 cm.

Les aérosols sont des particules solides ou liquides d'origine naturelle ou industrielle, de différentes compositions chimiques, en suspension dans l'atmosphère. Peuvent être à l'origine de ces particules, la combustion, l'érosion, les océans, les volcans ou les interactions photochimiques.

Les aérosols jouent un rôle prépondérant dans l'atmosphère. En effet, ils constituent le mécanisme principal de pollution atmosphérique et sont la composante atmosphérique la plus active du point de vue optique. De plus, ils influencent le bilan radiatif de l'atmosphère (affectent l'albédo terrestre) et participent au processus de formation des nuages et des précipitations. Enfin ils interviennent dans les processus de transport de la matière dans l'atmosphère (moteur principal de la pollution atmosphérique).

On parle de fenêtres atmosphériques pour faire référence à la région du spectre où l'atmosphère est transparente au rayonnement. Ainsi, l'absorption est limitée dans certaines régions particulières du spectre électromagnétique.

Par exemple, dans le domaine du visible (de 0,4 à 0,7  $\mu\text{m}$ ), l'atmosphère est relativement transparente et présente donc une large fenêtre atmosphérique. En revanche, dans l'infrarouge (de 8 à 14  $\mu\text{m}$ ), l'atmosphère est opaque de 22  $\mu\text{m}$  à 1 mm, ce qui explique la non utilisation de cette portion de spectre en télédétection.

Dans les hyperfréquences, l'atmosphère est transparente au-delà de 3 cm, mais devient opaque pour des longueurs d'onde supérieures à 30 m. Ainsi, en observant les fenêtres atmosphériques disponibles

et en tenant compte des deux sources d'énergie les plus communes (le Soleil et la Terre), on peut déterminer les longueurs d'onde les plus utiles pour la télédétection.

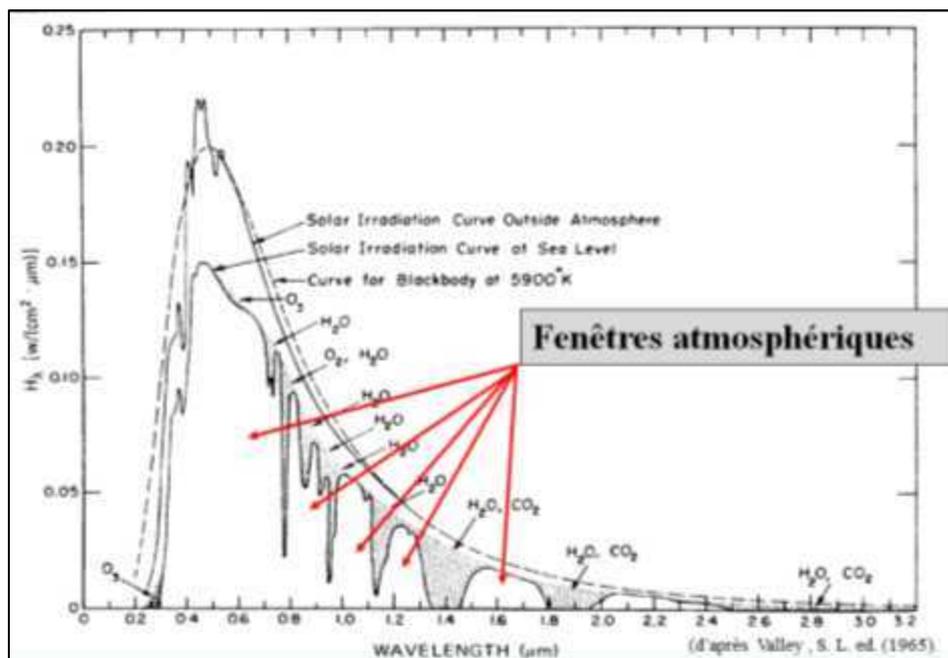


Figure 13 : Les fenêtres atmosphériques

Les corrections atmosphériques peuvent se réaliser grâce à l'utilisation des logiciels de télédétection. Sous le logiciel ENVI, le module FLAASH permet de prendre en compte les perturbations atmosphériques et corriger les images.

### 1.3.5. Exemples de niveaux de correction proposés par les fournisseurs

Pour le fournisseur de données SPOT Image, les niveaux de corrections se répartissent de la manière suivante (extrait) :

- Niveau 1A : « Le niveau 1A est un niveau de prétraitement quasiment brut où seules les corrections radiométriques ont été effectuées. C'est un niveau particulièrement destiné aux utilisateurs désirant des données ayant subi le minimum de traitement. En radiométrie, seuls les effets instrumentaux sont corrigés par un modèle linéaire qui égalise la sensibilité des détecteurs. Pour ce niveau de prétraitement, aucune correction géométrique n'est effectuée ».
- Niveau 1B : « Le niveau 1B est le niveau de traitement de base incluant des corrections radiométriques et des corrections géométriques. Ces dernières prennent en considération les caractéristiques de la prise de vue et du système satellite/Terre. Corrections : les mêmes corrections radiométriques que pour le niveau 1A sont appliquées. Les corrections géométriques portent sur les effets systématiques : effet panoramique, rotation et courbure de la Terre, variation d'altitude du satellite par rapport à l'ellipsoïde de référence ».
- Niveau 2A : « Correction radiométrique identique à celle du niveau 1A. Correction géométrique effectuée dans la projection cartographique standard (UTM WGS84 par défaut) sans prise de points d'appui. Permet, en tenant compte du décalage éventuel en localisation, de combiner

l'image à des informations géographiques de types différents (vecteurs, cartes raster et autres images satellite) ».

- Niveau 2B : « Mise en projection cartographique avec prise de points d'appui prélevés sur des cartes ou par mesure sur site type GPS. L'image est corrigée à une altitude moyenne dans une projection et un découpage cartographique standardisés. Utilisé lorsque les déformations dues au relief ne sont pas déterminantes (terrain plat, ..) ».
- Niveau 3 : « Mise en projection cartographique à partir de points d'appui et d'un MNE issu de Reference3D pour éliminer les distorsions dues au relief ».

Pour le fournisseur de données DigitalGlobe (images satellites QuickBird, Ikonos ou WorldView), les niveaux de corrections se répartissent de la manière suivante (extrait) :

- Niveau 1 : « *Basic Imagery with the least amount of processing (geometrically raw), designed for customers desiring to process imagery into a useable form themselves. Sensor corrections: Internal detector geometry; optical distortion; scan distortion; line rate variations; mis-registration of the multispectral bands.* »
- Niveau 2 : « *Standard Imagery with radiometric and geometric correction, and delivered in a map projection. Sensor corrections: idem Basic Imagery, but has a coarse DEM applied to it, which is used to normalize for topographic relief with respect to the reference ellipsoid. The degree of normalization is relatively small, so while this product has terrain corrections, it is not considered orthorectified.* »
- Niveau 3 : « *Orthorectified Imagery with radiometric, geometric, and topographic correction, and delivered in a map projection. Require DEMs and/or Ground Control Points to remove relief displacement and to place each pixel into its correct, map location.* »

Aujourd'hui, de par ces exemples, on constate que chaque fournisseur d'images propose sa propre nomenclature. Il n'existe pas toujours de correspondances directes entre chacune d'elles. Ainsi, ces nomenclatures ne sont pas transposables d'un capteur à un autre. De manière générale, le niveau 1 correspond au niveau de données brutes ou corrigées des erreurs internes aux satellites, le niveau 2 au niveau de données corrigées par des données externes (géo-référencement,...) et le niveau 3 correspond au niveau de données thématiques.

Parfois, les fournisseurs ne proposent pas des niveaux de correction hiérarchisés en niveaux chiffrés, comme ici, mais avec leur propre typologie. Par exemple, e-geos, qui proposent les données Geoeye-1, classe ses niveaux de correction comme suit : GEO – GeoProfessional – GeoProfessional Precision – GeoStereo – GeoStereo Precision. La correspondance est d'autant plus complexe.

Dans le futur, la tendance veut que l'on s'oriente vers une nomenclature officielle internationale des images afin de connaître le niveau de correction des images utilisées.

## 1.4. Les traitements

### 1.4.1. Les compositions colorées

Lorsque les images sont enregistrées et captées par les satellites, celles-ci sont codées en niveaux de gris. Il est alors possible de visualiser les images en noir et blanc. Cependant, il est également possible de visualiser ces images en couleurs sous la forme de compositions colorées.

Ainsi, ces compositions permettent de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets. Elles sont fréquemment utilisées pour faire ressortir les différents types de surface sur les images multispectrales ou mettre en évidence certains phénomènes environnementaux.

On utilise donc le principe de la composition colorée. On se base sur l'espace de couleur Rouge-Vert-Bleu, ou modèle RVB développé en 1931 par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) et le principe des canaux cathodiques d'un écran. Il s'agit du modèle idéal pour expliquer la synthèse additive des couleurs puisqu'il consiste à représenter l'espace des couleurs à partir des trois couleurs primaires que sont le rouge, le vert et le bleu.

Ainsi, à chaque canal (rouge, vert ou bleu), on affecte une image qui, usuellement, correspond à l'une des bandes spectrales disponibles sur l'image satellite. Les couleurs résultantes sont fonction des valeurs radiométriques des pixels dans chacune des trois bandes spectrales sélectionnées. Plus les valeurs des pixels sont élevées, plus la couleur affectée sera saturée.

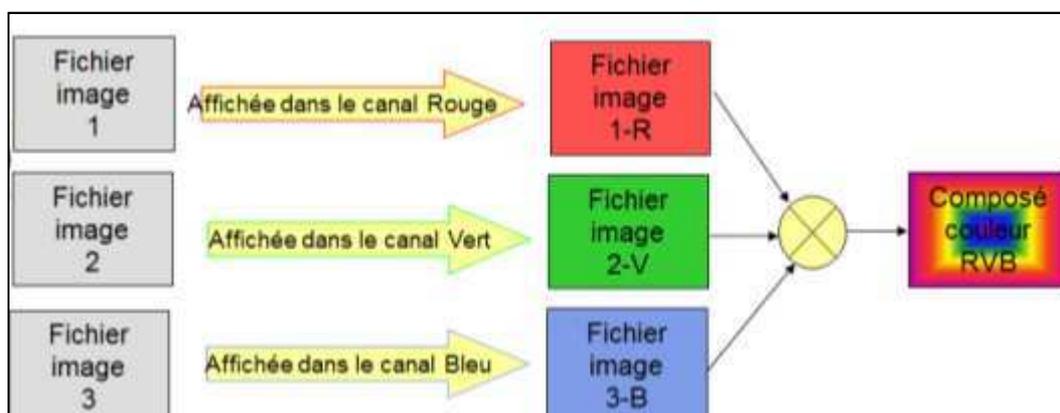


Figure 14 : Principe de la composition colorée

Par exemple, affecter, respectivement, les bandes spectrales rouge, verte et bleue de l'image satellite aux canaux rouge, vert et bleu de l'espace RVB permet de visualiser la scène en vraies fausses couleurs comme si nous observions la scène depuis le satellite. Néanmoins, différentes combinaisons de bandes sont possibles selon les besoins de l'utilisateur. Ainsi, par exemple, affecter, respectivement, les bandes spectrales proche infrarouge, rouge et verte de l'image satellite aux canaux rouge, vert et bleu de l'espace RVB permet une meilleure visualisation de la végétation et de l'occupation des sols. Dans cette composition colorée en fausses couleurs, les végétaux apparaissent en rouge car la réponse spectrale des végétaux est plus forte dans cette gamme spectrale.

### 1.4.2. Le filtrage

Le bruit contenu dans les images satellites est un phénomène qui tend à masquer l'information utile. Ce bruit peut provenir de deux sources distinctes :

- les sources externes, composées principalement de l'atmosphère, du relief et de la géométrie de la terre,
- les sources internes comme le système de mesures, la réponse inégale des détecteurs, le bruit électronique, le bruit de transmission.

Le bruit présent dans une image satellite peut-être, soit aléatoire, soit périodique. Si le bruit est présent de façon homogène dans toute l'image, le filtre spatial sera directement appliqué à l'image. Les fonctions de filtres ne permettent pas seulement de réduire ces bruits présents dans l'image mais aussi de rehausser certaines particularités de l'image.

Avant toute chose, il convient de définir la notion de fréquence spatiale. La fréquence spatiale n'a aucun lien avec la fréquence des ondes électromagnétiques en provenance de la terre. On parle ici de la variation d'intensité pour chaque pixel de l'image. On parle de basses fréquences spatiales lorsque la région considérée est d'intensité homogène, comme par exemple la mer. Les hautes fréquences spatiales caractérisent, elles, les régions d'intensités très contrastées comme par exemple le passage mer-côte.

Les filtres spatiaux sont des opérateurs locaux. Autrement dit, les filtres spatiaux prennent en compte le voisinage d'un pixel pour accentuer, atténuer ou extraire une propriété locale. Ce type de filtre met en relation la valeur du pixel traité, situé au centre de la fenêtre, avec celles des pixels voisins. Les paramètres à considérer peuvent être la taille de la fenêtre du filtre, l'influence de l'éloignement au moyen de coefficients de pondération, l'isotropie ou l'anisotropie du phénomène traité.

- Filtre passe-bas : ce filtre permet d'éliminer les hautes fréquences spatiales. Le filtre passe-bas entraîne donc un lissage de l'image. Il est utilisé pour mettre en évidence des régions homogènes avec des pixels aux caractéristiques spectrales similaires. Parmi les filtres passe-bas, on trouve, par exemple, le filtre moyen et le filtre médian. Le premier additionne l'ensemble des valeurs du masque et calcule la valeur moyenne qu'il attribue au pixel central. Le second utilise la valeur médiane du masque.

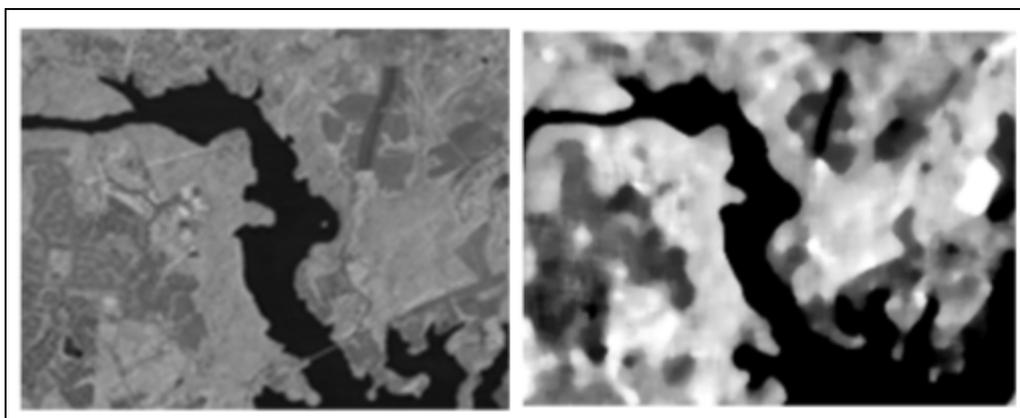


Figure 15 : Filtre passe-bas

- Filtre passe-haut : ce filtre permet d'éliminer les basses fréquences spatiales. Le filtre passe-haut a tendance à accentuer les détails, les contours et permettre la détection de limites. Parmi les filtres passe-haut, on trouve le filtre de Prewitt, le filtre de Sobel ou les filtres directionnels. Ces derniers permettent de faire ressortir l'information selon une direction spécifique.

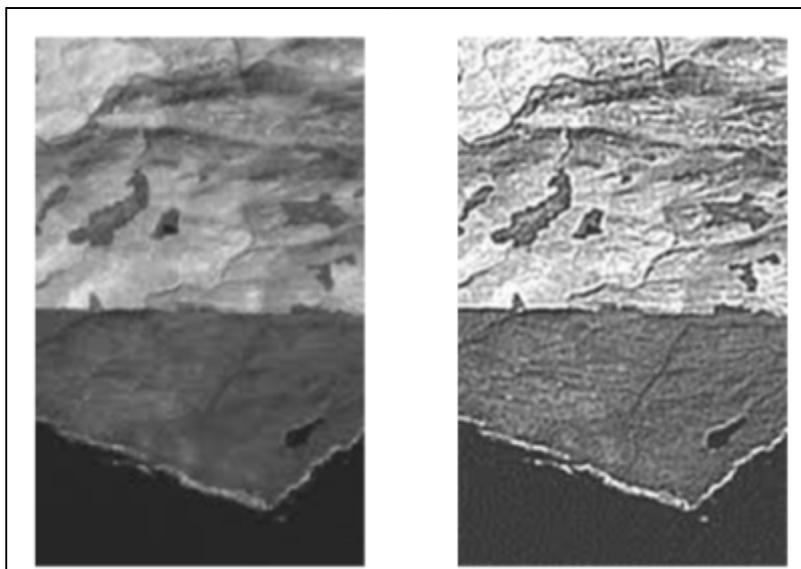


Figure 16 : Filtre passe-haut

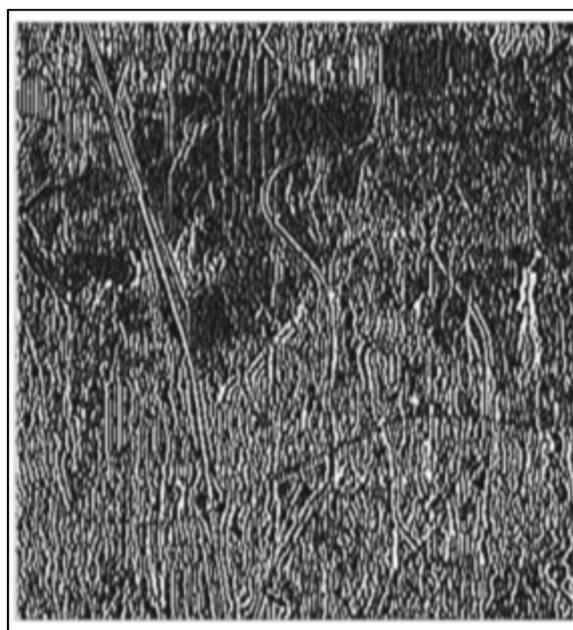


Figure 17 : Filtre directionnel (structures verticales)

- Filtre adaptatif : ce filtre trouve un intérêt notamment pour la réduction du bruit de chatoiement présent dans les images radar. Le chatoiement (*speckle* en anglais) est causé par l'interférence aléatoire des ondes électromagnétiques dans une cellule de réflexion de la surface de l'objet. La présence du chatoiement dégrade donc la résolution radiométrique réduisant alors la possibilité de discriminer les structures fines. Les filtres plus efficaces afin de pallier ce phénomène sont les filtres adaptatifs dont le fonctionnement est adapté aux variations spatiales du signal en utilisant les statistiques locales du signal bruité.

Parmi les filtres adaptatifs, on trouve les filtres adaptatifs moyen et médian, le filtre de Frost, le filtre de Wallis, le filtre de Lee.

### 1.4.3. La fusion de données

La fusion de données se réfère à l'utilisation de données provenant de différentes sources afin de produire une donnée de sortie à valeur ajoutée ou plus utile que chacune des données utilisées individuellement en entrée. A l'origine, cette technique se référait à la combinaison d'une donnée panchromatique à haute résolution spatiale avec une donnée multispectrale de moins bonne résolution afin de produire une image dite « *pan-sharpening* ». Depuis, la technique de fusion de données s'est développée au-delà de cette approche.

De nombreux travaux ont mis l'accent sur la fusion de données multispectrales avec une donnée panchromatique à meilleure résolution spatiale; images acquises depuis la même plateforme. On peut citer comme exemple, la combinaison de la donnée panchromatique à 15 mètres de résolution spatiale avec les données multispectrales 30 m du satellite Landsat-ETM+, mais également la donnée panchromatique 5 mètres avec les données multispectrales 10 m du satellite SPOT-HRG.

Néanmoins, la technique n'implique pas obligatoirement l'utilisation de données acquises par un même capteur. Ainsi, des approches combinant des photographies aériennes avec des données satellitales Landsat ont été explorées. Quelles que soient les données satellitales utilisées, le principal objectif de ce type de traitement est d'obtenir une image au niveau de détail spatial plus fin tout en préservant les propriétés radiométriques des objets de l'image.

L'un des intérêts majeurs de cette technique est l'utilisation de la donnée dans les algorithmes de classification. L'intégration de données « *pan-sharpening* » permet d'améliorer les résultats de classification.

La combinaison de données multi-temporelles peut aussi améliorer les précisions de classification.

### 1.4.4. Les indices

Chaque longueur d'onde présente ses propres caractéristiques, lui permettant de caractériser un phénomène bien précis. Ces informations ne sont pas directement mesurables à partir des bandes spectrales des images satellites multispectrales.

En effet, la réflectance (ou la luminance) ne correspond pas à notre manière habituelle d'appréhender les phénomènes physiques. En revanche, l'utilisation d'une combinaison d'observations de réflectance, dans deux ou plusieurs bandes spectrales, permet d'extraire ces informations.

On parle d'indices. Il s'agit d'une approche empirique qui permet de décrire l'état d'un phénomène donné. Plusieurs opérations sont possibles afin de combiner les différentes bandes spectrales comme les opérations arithmétiques (soustraction, addition, division,...) par exemple.

Parmi les plus connus et les plus couramment utilisés, on trouve bien évidemment les indices de végétation qui permettent d'identifier et de suivre le comportement et l'évolution temporelle des couverts végétaux mais également de discriminer les zones urbaines et infrastructures.

### 1.4.4.1. Les indices de végétation

Au cours des dernières décennies, de nombreux indices de végétation ont été développés.

Ils prennent la forme soit d'expressions très basiques (simple différence ou simple ratio), soit de formules beaucoup plus complexes. Ainsi, certains de ces indices de végétations permettent d'évaluer certains paramètres du couvert comme la biomasse, la capacité de photosynthèse des végétaux ou la teneur en eau. D'autres indices, eux, ont été développés pour étudier la structure de la canopée. Il peut s'agir d'indices de végétation bruts ou normalisés.

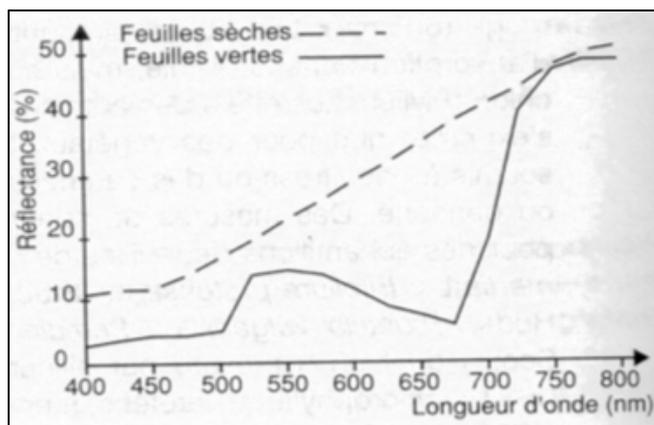


Figure 18 : Signature spectrale des feuilles

L'un des plus utilisés est le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Il a été créé par Rouse en 1973, puis repris à de nombreuses reprises. Il s'agit de l'indice le plus couramment utilisé dans la recherche environnementale. L'indice NDVI permet de suivre l'activité chlorophyllienne des végétaux, par le biais de la réflectance dans le rouge et dans le proche infrarouge. Concrètement, il est calculé de la manière suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

Où PIR est la réflectance du proche infrarouge, et R celle du rouge.

Cependant, l'influence des aérosols (dont la présence est en partie due à la combustion de biomasse) et des nuages limitent fortement l'interprétation des observations réalisées par les satellites. En effet, de manière générale, l'évolution temporelle du NDVI est très liée aux variations atmosphériques comme la variation en aérosols et en nuages.

Par exemple, dans les régions tropicales, les données acquises pendant la saison des pluies sont biaisées par la persistance des nuages; alors qu'en saison sèche, les contaminations par les aérosols réduisent fortement la restitution du NDVI.

Par ailleurs, cet indice souffre de limitations dues à la saturation aux hauts niveaux de biomasse. Ainsi, le NDVI, prenant des valeurs entre -1 et 1, a tendance à saturer pour des valeurs supérieures à 0,80. En fait, lorsque le milieu forestier devient de plus en plus dense, les valeurs de réflectance dans le rouge ne peuvent plus s'abaisser au-dessous d'une certaine limite, rapidement approchée, pendant que celles du proche infrarouge continuent à s'élever plus longtemps. Il en résulte donc une saturation aux environs de 0,80. A partir de cette valeur, on considère que le NDVI n'est plus en mesure de discriminer de façon convenable l'activité chlorophyllienne.

La vapeur d'eau peut également avoir une influence sur les valeurs de NDVI.

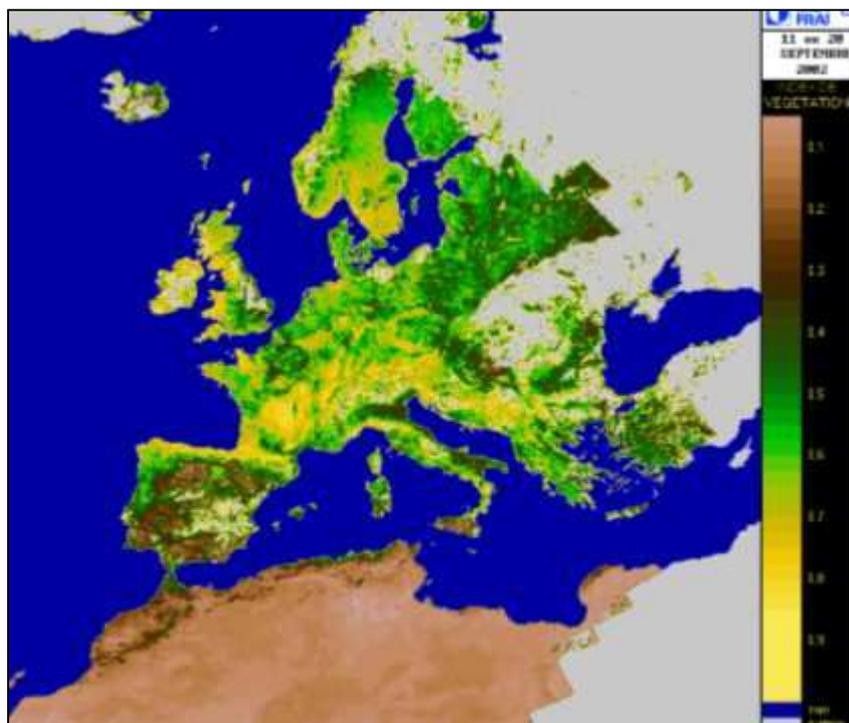


Figure 19 : NDVI sur l'Europe (source : Météo France)

Il existe des indices plus élémentaires et plus anciens mais dont l'utilité est très limitée. Parmi ceux-ci, on peut citer le *Difference Vegetation Index* (DVI) ou le *Ratio Vegetation Index* (RVI). Ils se calculent comme suit :

$$DVI = PIR - R$$

Et

$$RVI = PIR / R$$

Où PIR est la réflectance du proche infrarouge, et R celle du rouge.

L'inconvénient de ces indices est qu'ils sont extrêmement sensibles aux variations atmosphériques, ainsi qu'à la contribution spectrale des sols et la tendance à la saturation est bien plus importante que pour le NDVI.

Comme on vient de le voir, les conditions atmosphériques ont donc une grande influence sur les indices. Ainsi, certains indices ont été développés afin de pallier ces perturbations. Parmi ceux-ci, on trouve, par exemple, le *Enhanced Vegetal Index* (EVI). Historiquement, le développement de cet indice est lié à celui du satellite MODIS (par Huete en 2002). Il s'agit d'une amélioration de l'indice NDVI et permet donc de suivre l'activité chlorophyllienne.

Cet indice présente de nombreux avantages comparativement aux précédents indices comme le NDVI. En effet, celui-ci tient compte de la contamination des pixels par les aérosols et par les effets du sol. Ainsi, cet indice montre une très faible saturation sur une année pour les valeurs élevées d'activité chlorophyllienne.

L'indice EVI prend également en compte les effets de sol, c'est-à-dire, il permet de corriger, ou tout du moins, réduire l'influence des sols sous-jacents aux couverts végétaux sur le signal mesuré au niveau du capteur satellitaire.

L'indice EVI s'appuie sur les réflectances dans le proche infrarouge du capteur et sur la bande bleue. Cette dernière est sensible aux conditions atmosphériques et est souvent utilisée pour des corrections d'artefacts dus à l'atmosphère (détection des nuages, brumes...). En fait, l'indice EVI ajuste la réflectance dans le canal rouge en fonction de celle dans le canal bleu. Il permet ainsi de réduire les effets atmosphériques.

Cet indice peut se mettre en place de la manière suivante :

$$EVI = 2,5 \cdot (PIR - R) / (PIR + 6 \cdot R - 7,5 \cdot B + 1)$$

Où PIR est la réflectance du proche infrarouge, R celle du rouge et B celle du bleu.

D'autres indices tiennent également compte des effets atmosphériques en exploitant les propriétés précédemment exposées. Par exemple, l'*Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)*, créé par Kaufman et Tanré en 1992 propose un indice permettant de réduire ces effets en utilisant également la bande bleue. L'indice se calcule de la manière suivante :

$$ARVI = (PIR - \rho) / (PIR + \rho)$$

$$\text{avec } \rho = R - \gamma \cdot (B - R)$$

Où PIR est la réflectance du proche infrarouge, R celle du rouge, B celle du bleu et  $\gamma$ , un facteur d'auto-corrrection atmosphérique dépendant du type d'aérosols. Il est calculé à partir des réflectances dans les bandes bleue et rouge.

De leur côté, Pinty et Verstraete (1992) proposent l'indice *Global Environmental Monitoring Index (GEMI)*. Cet indice permet également de réduire les perturbations atmosphériques. Plus complexe à mettre en place, il se calcule de la manière suivante :

$$GEMI = \eta \cdot (1 - 0,25 \cdot \eta) - (R - 0,25) / (1 - R)$$

$$\text{avec } \eta = (2 \cdot (PIR^2 - R^2) + 1,5 \cdot PIR + 0,5 \cdot R) / (PIR + R + 0,5)$$

Où PIR est la réflectance du proche infrarouge, R celle du rouge et B celle du bleu.

Tout comme pour l'indice EVI, il existe des indices permettant de tenir compte des effets de sols et ainsi réduire l'influence des sols sous les couverts végétaux. On peut également citer le *Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)* créé par Huete (1988). Cet indice introduit un paramètre d'ajustement qui caractérise le sol et son taux de recouvrement par la végétation. Il se calcule de la manière suivante :

$$SAVI = (1 + L) \cdot (PIR - R) / (PIR + R + L)$$

Où PIR est la réflectance du proche infrarouge, R celle du rouge et L, le paramètre d'ajustement qui prend la valeur de 0,25 pour une forte densité et de 1 pour une très faible densité de végétation et 0,5 pour des densités intermédiaires.

Des améliorations de l'indice SAVI ont été développées. Parmi ceux-ci, on trouve le *Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index (TSAVI)* proposé par Baret en 1989 ou le *Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI)* développé par Qi en 1994. Ces indices introduisent des paramètres de corrections basés sur la droite des sols.

D'autres indices de végétation permettent d'extraire des informations différentes. Par exemple, le *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (ou *Shortwave Infrared Water Stress Index* (SIWSI) ou *Land Surface Water Index* (LSWI) selon le capteur et les bandes utilisés), proposé par Gao en 1996, est un indice de stress hydrique permettant notamment d'estimer la teneur en eau du feuillage des couverts forestiers. Celui-ci utilise également deux bandes, à savoir, le proche infrarouge et le moyen infrarouge. L'utilisation du moyen infrarouge permet de s'affranchir, en partie, de l'effet des sols.

Le NDWI se calcule de la manière suivante :

$$\text{NDWI} = (\text{PIR} - \text{MIR}) / (\text{PIR} + \text{MIR})$$

Où PIR est la réflectance du proche infrarouge, et MIR celle du moyen infrarouge.

#### 1.4.4.2. Les indices de sol

Le sol nu est bien plus complexe à analyser et plusieurs indices peuvent être élaborés selon la rugosité, la couleur, la couleur de Munsell, la composition (indice d'argile), la granulométrie, etc.

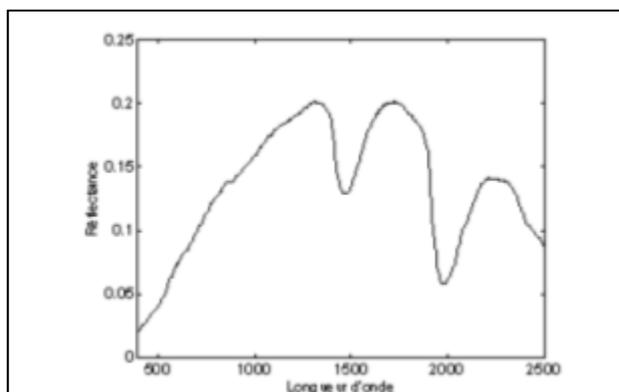


Figure 20 : Signature spectrale d'un sol standard (moyenne de 564 spectres mesurés au début des années 80)

Parmi les différents indices de sol, on trouve, notamment, le *Normalized Difference Soil Index* (NDSI) utilisé en pédologie. Il permet de différencier les couvertures végétalisées des étendues minérales.

Le NDSI se calcule de la manière suivante :

$$\text{NDSI} = (\text{MIR} - \text{PIR}) / (\text{MIR} + \text{PIR})$$

Où PIR est la réflectance du proche infrarouge et MIR, celle dans le moyen infrarouge

Enfin, citons, les indices *Brillance Soil Index* (BSI) et *Soil Moisture Index* (SMI) qui permettent, respectivement, de caractériser la brillance et la sécheresse/désertification du sol. Ils se calculent de la manière suivante :

$$\text{BSI} = (\text{R}^2 + \text{PIR}^2)^{1/2}$$

Et

$$\text{SMI} = \text{LE} / \text{LEp}$$

Où R est la réflectance dans le rouge, PIR celle dans le proche infrarouge, LE, l'évapotranspiration réelle et LEp, l'évapotranspiration potentielle.

## 1.5. Les logiciels de télédétection

De nombreux logiciels existent afin de traiter et d'analyser les images géospatiales. Ces logiciels présentent quasiment tous les mêmes possibilités en termes de manipulation, gestion et traitement de la donnée géospatiale. Certains de ses logiciels présentent des fonctionnalités additionnelles sous forme d'outils et modules additionnables à la plateforme d'origine; voire même des logiciels indépendants. Parmi les fonctionnalités et modules disponibles sur ces logiciels, on trouve de manière non exhaustive :

- Outils de visualisation et édition de la donnée,
- Outils de correction géométrique et mosaïquage d'images,
- Outils de correction atmosphérique,
- Outils de traitement de la donnée : rehaussement des images par manipulation des histogrammes, filtrage spatial ou morphologique, rééchantillonnage, projection, clip de l'image, création d'image « *pan sharpening* », calcul d'indices, opérations arithmétiques sur les bandes, analyse en composantes principales,...
- Outils d'extraction de l'information des images multispectrales dont la classification par-pixel, supervisée et non supervisée, la classification neuronale, etc.
- Outils d'analyse spatiale : création de zones tampon, gestion de base de données,...
- Outils de gestion et d'analyse des données RADAR (calcul de la brillance, calibration, analyse de texture, filtre de chatouement, ...),
- Outils de gestion et d'analyse des données hyperspectrales,
- Outils de production cartographique,
- Outils de gestion et traitement des données Lidar : création de Modèle Numérique de Terrain, de Modèle Numérique d'Élévation,
- Outils de gestion et création d'Ortho-images satellite ou aériennes,
- Outils de gestion des données vectorielles et interface compatible avec des logiciels SIG comme ArcGIS®.

Parmi les logiciels existants, on trouve, à la fois, des logiciels spécialisés payants et gratuits :

- PCI Geomatica, logiciel payant canadien : <http://www.pcigeomatics.com/>,
- ERDAS Imagine, logiciel payant américain : <http://www.erdas.com/Homepage.aspx>,
- ENVI, logiciel payant américain : <http://www.itvis.com/language/fr-FR/Soci%C3%A9t%C3%A9/Pagedaccueil.aspx>,
- IDRISI Taïga, logiciel payant américain : <http://www.clarklabs.org/products/idrisi-taiga.cfm>,
- BEAM, logiciel gratuit de l'Union Européenne (ESA) : <http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/welcome>,
- SPRING, logiciel gratuit brésilien : <http://www.dpi.inpe.br/spring/francais/index.html>,

Les outils de classification orientée objet sont, principalement, disponibles sur des logiciels indépendants.

On trouve :

- Definiens Cognition Network Technology (successeur de eCognition), logiciel payant américain : <http://www.ecognition.com/products>
- FeatureObjex, logiciel payant issu de la suite PCI Geomatica : [http://www.pcigeomatics.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=9&Itemid=4](http://www.pcigeomatics.com/index.php?option=com_content&view=article&id=9&Itemid=4)
- ERDAS Objective, logiciel payant de la suite ERDAS Imagine : <http://www.erdas.com/products/ERDASIMAGINE/IMAGINEObjective/Details.aspx>
- Feature Extraction, logiciel payant de la suite ENVI : <http://www.itvis.com/language/fr-FR/NosProduits/ENVI/ENVIEX/fxworkflow.aspx>

## 2. L'extraction de l'information sur l'habitat

### 2.1. La cartographie par mission terrain

En premier lieu, et historiquement, on trouve les cartographies des habitats basées uniquement sur des missions de terrain.

La classification des habitats obtenue dans le cadre de Corine Biotope en est le parfait exemple. La typologie des habitats naturels et semi-naturels présents sur le sol européen, publiée officiellement en 1991, repose sur la description de la végétation s'appuyant, notamment, sur les résultats d'études phytosociologiques menées dès 1984. De par les missions de terrain, chaque habitat fut caractérisé, plus ou moins finement selon les données disponibles, par le syntaxon phytosociologique correspondant, ainsi que par une brève description du type de formation végétale et floristique pouvant y être observée.

Néanmoins, si une telle méthodologie fut entreprise à large échelle sur quelques projets, il est plus usuel de rencontrer de telles approches pour des cartographies d'habitat sur une échelle locale (une aire protégée par exemple).

### 2.2. L'analyse d'image en complément de la mission terrain

Aujourd'hui, il est de plus en plus courant de procéder à la cartographie des habitats en couplant les méthodes d'extraction de l'information, à savoir, la mission terrain et l'analyse d'images. La mission terrain peut être réalisée dans le cadre du projet, mais aussi liée à l'utilisation de données exogènes construites à partir de mission sur le terrain.

Quelle que soit la méthode employée pour l'analyse, l'objectif consiste à extraire des zones homogènes, que ce soit du point de vue spectral mais aussi écologique, etc... Ce caractère homogène dérive donc de la méthode employée.

#### 2.2.1. Les méthodes « traditionnelles et opérationnelles »

Quelle que soit la technologie choisie, des traitements peuvent être entrepris afin d'extraire l'information utile des données. La segmentation a pour but d'interpréter l'information et d'assigner une étiquette aux différents « objets » présents sur l'image.

Historiquement, les premières méthodes de cartographies utilisaient les feuilles calques superposées aux photographies ou ortho-photographies aériennes. Par exemple, la mise à jour 1995/1996 de la cartographie de l'occupation du sol de la région Nord-Pas de Calais fut réalisée par cette approche. Les évolutions furent ainsi inventoriées par l'utilisation conjointe d'impressions sur calque de la base précédente et de photographies sur des tables lumineuses.

Aujourd'hui, deux méthodes opérationnelles permettent de segmenter les images satellites, à savoir, la Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO) et les méthodes de classification automatique. Couplées aux missions terrain et aux données exogènes, elles permettent d'élaborer des cartographies fines des habitats.

### 2.2.1.1. La PIAO

La photo-interprétation est une approche logique et raisonnée basée sur un examen visuel d'images par un opérateur appelé photo-interprète. Cette approche logique est basée sur la reconnaissance d'objets grâce à un raisonnement par lequel on repère des zones homologues à partir de la couleur, de la texture et de la structure.

L'identification d'unités géographiques consiste donc en la caractérisation des zones homogènes, l'examen de leur environnement et la recherche de zones analogues dans le but de confirmer ou d'infirmer une hypothèse d'identification. Une interprétation correcte induit donc la nécessité pour le photo-interprète de disposer de bonnes connaissances de base en termes de contexte géographique de la zone étudiée.

Les images à photo-interpréter peuvent être analysées soit sur un tirage papier (photographies aériennes ou images satellites), soit directement à l'écran (photographies aériennes scannées et images satellites numériques), comme par exemple dans le cadre de la PIAO.

La PIAO est une méthode mixte proposée pour l'étude de l'occupation du sol qui repose au départ sur l'interprétation visuelle d'images, mais l'interprète a accès à une station de traitement interactive pour visualiser et traiter les données de base à interpréter. Il y effectue des zooms sur les zones à problèmes, procède, selon ses besoins, à des transformations radiométriques (ratios, combinaisons linéaires de bandes spectrales, calcul d'indices, examen d'images prises à d'autres saisons ou par d'autres capteurs ou bien encore informations exogènes mises sur SIG).

Néanmoins, l'interprétation visuelle est souvent limitée à une seule image à la fois car il est difficile d'effectuer une interprétation visuelle à partir de plusieurs images sur des temps de production raisonnables. De plus, l'interprétation humaine est un procédé subjectif qui implique des différences d'un photo-interprète à l'autre.

L'utilisation de plusieurs images peut avoir lieu lors de l'utilisation de la vision stéréoscopique en appui de la PIAO. En effet, le recours à la vision stéréoscopique est une approche qui permet une pleine exploitation des données issues de la photographie aérienne pour la visualisation des reliefs. Le recours à la vision stéréoscopique est possible à partir d'images satellites. Le principe de la vision stéréoscopique est le suivant : dans la vision binoculaire habituelle, chaque œil voit un même objet sous un angle différent et enregistre donc sur sa rétine une image différente. Le fusionnement au niveau du cerveau de ces deux images crée l'impression de relief. La vision stéréoscopique oblige chaque œil à ne voir qu'une seule photographie : chaque rétine enregistre donc une image différente et recrée ainsi les conditions de la vision binoculaire. Pour reconstituer la forme d'un objet dans l'espace, une double perspective va être nécessaire. En effet, une photographie isolée ne permet pas d'appréhender complètement la topographie d'un site. La stéréoscopie est donc le procédé qui va permettre de recréer le relief à partir de deux photos qui se superposent à 60 % qui est appelé couple stéréoscopique. Le couple stéréoscopique est l'ensemble formé sur deux images des points homologues. La vision stéréoscopique est permise grâce à l'utilisation d'un stéréoscope, mais également par l'utilisation de logiciels informatiques spécialisés. A l'aide d'un stéréoscope les différents éléments de la photo vont se détacher et s'organiser selon la troisième dimension. Des détails imperceptibles et incompréhensibles deviennent apparents et plus faciles à interpréter (différentiation des communautés végétales suivant les hauteurs par exemple). Toutes les couvertures aériennes de l'Institut Géographique National et de l'Inventaire Forestier National sont stéréoscopiques.

La PIAO peut être exploitée de différentes manières lors de l'élaboration de la carte d'habitats.

Elle peut représenter l'essentiel du travail de segmentation. Les objets digitalisés par l'opérateur sont les objets finaux, le terrain vient en appui ponctuel ou pour la validation de la classification. Des projets comme ARCH en sont la parfaite illustration (se référer au guide de PIAO pour davantage de précision sur la méthodologie).

A l'inverse, la PIAO peut venir en appui de la mission terrain. Elle permet d'extraire des premières couches d'informations qui sont ensuite caractérisées sur le terrain.

Le projet « Cartographie de la végétation et des habitats du site Natura 2000 FR9400576 : « Massif montagneux du Cinto » – Partie Bonifatu », porté par SIRS et qui s'inscrit dans le cadre de l'action de l'Union Européenne en faveur de la préservation de la diversité biologique et la mise en place de site Natura 2000, illustre parfaitement cette méthodologie. Ainsi, le projet avait pour objectifs d'élaborer les cartographies de végétation du site Natura 2000 de la forêt de Bonifatu et du versant nord du Cepu, de codifier ces cartographies de végétation afin qu'elles soient exploitables comme cartographies d'habitats Natura 2000 et enfin d'informatiser ces cartographies.

Dans une telle approche, la cartographie d'habitats est donc le résultat d'un travail combinant la Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur et le terrain. Ici, l'approche se déroule en 3 étapes principales.

Dans un premier temps, une photo-interprétation de premier niveau est effectuée par un échantillonnage stratifié afin d'identifier les unités de végétation. Cette première photo-interprétation sert à zoner le territoire d'étude et à délimiter des polygones correspondant à des îlots de végétation. Elle s'est appuyée sur un travail d'analyse des orthophotographies et des clichés infrarouges. Par ailleurs, des relevés terrain sont également réalisés dans cette première étape. Lors de cette phase de terrain, une série de polygones, types représentatifs de la diversité du site, est retenue pour y effectuer des relevés phytosociologiques. Parallèlement à la réalisation de ces relevés, des observations directes de terrain (prospection pédestre à l'intérieur d'unités de végétation, observation à la jumelle des versants opposés, etc.) associées à des prises de vue panoramiques ont permis de dresser une première cartographie des unités physiognomiques de végétation présentes sur le site, en les recoupant avec les polygones pré-identifiés par la photo-interprétation.

Puis, dans un second temps, une photo-interprétation de deuxième niveau est effectuée ainsi que la définition des types de végétation par des compléments de relevés phytosociologiques. Il s'agit de caractériser les habitats naturels. Chaque unité physiognomique présentant une végétation homogène fait l'objet d'une série de relevés phytosociologiques afin de caractériser l'habitat correspondant. Ces relevés ont été effectués au sein d'une zone paraissant homogène et caractéristique de l'unité de végétation pré-identifiée. La méthodologie qui a été mise en œuvre pour effectuer ces relevés et caractériser les différents habitats « naturels » s'appuie sur la démarche de la Phytosociologie Synusiale Intégrée permettant de caractériser l'imbrication des différentes communautés végétales qui peuvent coexister au sein d'une même formation dominante. A terme, une correspondance est établie avec la nomenclature CORINE afin de déterminer l'habitat.

Enfin, la dernière étape consiste en la représentation cartographique proprement dite, sur papier et au format informatique pour être intégrée dans des plates-formes SIG.

### 2.2.1.2. Les méthodes automatiques

Le développement plus récent des technologies de télédétection spatiale, comme les satellites et capteurs associés, marque un tournant important. Ces satellites permettent alors de générer des images multispectrales sous format numérique à haute résolution spatiale sur des échelles spatiales bien plus étendues et dans des proportions bien plus importantes. Le développement de procédures automatiques, plus adaptées qu'une interprétation et une classification visuelle et manuelle, accompagna donc, tout naturellement, l'imagerie satellitaire. L'analyse numérique est donc plus objective, ce qui permet des résultats reproductibles. Si elle peut être utilisée

La classification est donc une méthode d'analyse et d'extraction de l'information qui consiste à rassembler les groupes de pixels sur la base de leurs similitudes spectrales. Le groupement se fait à partir des statistiques et des caractéristiques spatiales et spectrales que possède chaque pixel. En principe, les classes sont donc différentes les unes des autres; une classe ne contient que des pixels semblables et est homogène. Autrement dit, il s'agit de regrouper les pixels selon leur ressemblances spectrales, de déterminer les contours d'un groupe de pixels afin de former des unités spatiales interprétables en termes de classes thématiques.

Couramment, les algorithmes de segmentations/classifications automatiques d'images se divisent en deux familles selon l'objet sur lequel l'algorithme travaille (mais aussi en fonction du format de sorties des résultats) : les classifications par-pixel et les classifications orientées objet.

Ainsi, les classifications par-pixel permettent d'analyser chaque pixel d'une image et de l'assigner à une classe précise à l'aide de sa signature spectrale (et parfois à l'aide de données complémentaires annexes). La donnée de sortie est l'image raster généralement composée du même nombre de pixels que l'image d'origine.

De leurs côtés, les classifications orientées objet sont historiquement bien plus récentes que les premières. Cette méthode s'appuie, non pas sur le pixel, mais sur la notion d'objet. En complément de l'information spectrale, des informations supplémentaires sont prises en compte par l'algorithme comme la forme ou la texture de l'objet. La donnée de sortie est le fichier vecteur aisément intégrable dans des plateformes SIG.

Les deux techniques présentent donc un intérêt certain dans le cadre du projet ARCH. De telles méthodes pourraient constituer la base d'une approche reproductible à des fins de surveillance et suivi de l'habitat.

#### 2.2.1.2.1. Classification par pixel

La classification repose ici sur deux principes fondamentaux : tous les objets (ou pixels) d'une même classe se caractérisent par des signatures spectrales identiques et toutes les signatures de classes d'objets sont parfaitement distinctes les unes des autres.

Communément, il existe deux méthodes de classifications basées sur le pixel à partir desquelles toutes les variantes sont dérivées. Il s'agit des classifications supervisées et des classifications non supervisées. Elles sont respectivement utilisées afin de déterminer a priori et a posteriori les classes (ou modes) d'occupation du sol. Les algorithmes de classification sous-jacents travaillent le plus communément sur l'information spectrale, à savoir, la réflectance, ou à défaut sur la donnée brute, le Compte Numérique. Ainsi, on présume que les régions de l'image ayant une même signature spectrale ont un mode d'occupation du sol ou un habitat similaire.

## **Les classifications non-supervisées**

Les classifications non-supervisées identifient de manière automatique les groupes (ou classes) sur la base de l'information spectrale des pixels. Ces classes sont ensuite associées à des modes d'occupation des sols afin de réaliser une cartographie.

Cette classification se fait sans aucune information a priori sur la nature des objets à classer. Ainsi, les données multispectrales sont le plus couramment utilisées pour ce genre de classification car elles permettent d'exploiter au mieux les différences de signatures entre objets.

Bien que de nombreuses techniques de segmentation aient été développées, l'essence même de la classification non supervisée reste la même.

Comme il est dit précédemment, les pixels sont identifiés comme appartenant à une classe en utilisant l'information spectrale, à savoir les valeurs de réflectance (ou à défaut les comptes numériques) pour chaque bande prise en compte dans l'analyse de classification.

Usuellement, puisque ce processus permet d'utiliser l'information spectrale provenant de trois bandes ou plus, les regroupements peuvent être visualisés dans l'espace multidimensionnel.

Parmi les méthodes de classifications non supervisées, il existe deux grandes catégories :

- les classifications hiérarchiques qui produisent des suites de partition de classes de plus en plus vastes,
- les classifications non hiérarchiques qui produisent une partition de l'espace en un nombre de classes fixé.

Parmi les méthodes aujourd'hui les plus répandues, on trouve celles des centres mobiles ou celles par nuées dynamiques.

Parmi celles intégrées dans la majeure partie des logiciels de télédétection, on peut citer les algorithmes « K-Means » ou « ISODATA » (méthode des centres mobiles). Quel que soit l'algorithme choisi, l'opérateur contrôle l'ensemble du processus de classification non supervisée, et notamment, il est amené à déterminer le nombre de classes souhaité en sortie.

Pour la méthode ISODATA, l'opérateur choisit un nombre minimum et maximum de classes. Sur un plan opérationnel, ces valeurs sont généralement fixées en surestimant le nombre de classes souhaitées. Ainsi, une phase de combinaison des classes est nécessaire afin de regrouper les classes identiques. L'idée sous-jacente est de produire une cartographie qui soit en meilleure adéquation avec la nomenclature finale souhaitée.

Quel que soit le processus utilisé lors de l'extraction initiale et la réduction subséquente des classes, la classification non supervisée nécessite une interprétation post priori de la signification terrain des classes obtenues. Cela se fait habituellement en utilisant des données de référence terrain.

## **Les classifications supervisées**

Les méthodes de classifications supervisées nécessitent, dans un premier temps, la définition et la mise en place d'un jeu de données d'entraînement.

Concrètement, ce jeu d'apprentissage permet d'établir une librairie des signatures spectrales types de chaque classe devant être extraite afin de réaliser la cartographie des modes d'occupation des sols. La zone d'entraînement choisie afin de réaliser ce jeu d'apprentissage doit donc être représentative de l'ensemble de la zone d'étude afin de couvrir toutes les variations de réflectance des classes et tenir compte de la variabilité locale des classes environnementales due au type de sol, à l'humidité, etc.

Les sites d'entraînement doivent être exempts d'anomalies et constituer une représentation statistique adéquate de la zone. Ils doivent donc être en nombre conséquent. Une fois que le jeu de données d'entraînement a été mis en place, le processus même de classification peut être lancé.

Les signatures spectrales de chaque pixel de l'image sont examinées et comparées aux signatures types établies dans un premier temps pour chaque classe. L'assignation d'un pixel à une classe donnée est basée sur un critère de respect de règles ou algorithmes de décision (soit paramétriques, soit non paramétriques) qui permettent le découpage de l'image en groupes.

Les règles de décision dite paramétriques considèrent l'espace des points comme homogène du point de vue spatial ; dès lors chaque pixel est assigné à une classe donnée.

Les règles dites non paramétriques considèrent l'espace comme étant discret, chaque groupe étant alors délimité par une frontière.

Dès lors un pixel peut être considéré, en dehors de ces frontières, comme non classé.

Concrètement, il existe différentes méthodes de classifications supervisées implémentées dans les logiciels de télédétection comme par exemple les méthodes de la distance minimale, des parallélépipèdes ou du maximum de vraisemblance.

Si les deux premières sont les plus simples à mettre en place, elles sont, néanmoins, les moins efficaces. En effet, par ces méthodes, de nombreux pixels peuvent n'être assignés à aucunes classes.

En revanche, la méthode de classification par maximum de vraisemblance est plus précise; car les règles de décision sont basées sur la notion de probabilité d'appartenance et non de simples distances. Cet algorithme est donc le plus usuellement utilisé en télédétection lors de la mise en œuvre de classifications supervisées.

### Des applications possibles

Les exemples de projets utilisant de telles approches sont nombreux; les approches par classification automatiques se sont très largement démocratisées.

Ainsi, le projet de « **Cartographie de la végétation littorale en milieu dunaire humide par télédétection spatiale pour La Réserve Biologique Domaniale de Merlimont (62)** » porté par SIRS dans le cadre du prolongement du programme LIFE Européen et la mise en place d'un plan de gestion sur le site de la Réserve Biologique Domaniale de Merlimont en est un premier exemple.

Ce projet a permis l'élaboration d'une cartographie de formations végétales en 14 classes réparties en trois grands domaines (dunaire, de transition et forestier).

Pour ce faire, des données SPOT XS à 20 mètres de résolution spatiale sur 3 dates ont été utilisées. A partir de ces données, trois indices de végétation normalisés ont pu être développés afin d'établir un

seuillage entre les surfaces végétalisées et les surfaces non végétalisées (eau et sable vif), puis être intégrés dans le processus de classification semi dirigée en 16 classes.

La vérification de la pertinence des résultats fut possible par une excellente connaissance du milieu et des relevés floristiques sur de nombreux sites tests.

Dans ce projet, l'utilisation d'une composition colorée multi dates basée sur les indices de végétation permet d'obtenir de bons résultats en terme de discrimination des formations végétales. D'autre part, disposer de données à meilleure résolution ainsi que d'un canal moyen infrarouge aurait permis d'améliorer sensiblement la cartographie et notamment de mettre en évidence les variations spatiales du caractère humide des occupations végétales.

Enfin, l'acquisition d'une séquence d'images récentes permettrait de mettre en évidence les multiples dynamiques végétales de ces milieux en constante évolution, notamment la fermeture par les arbustes des espaces prairiaux.

Le projet « n°6 PNRZH : **Entre Scarpe et Escaut : hydrosystème, biodiversité et changements socioéconomiques durables des zones humides** » permettant la caractérisation des zones humides de la plaine de la Scarpe et de l'Escaut est un autre exemple.

Ce projet se concentra notamment sur les prairies humides bordées de fossés (en particulier dans les secteurs fréquemment inondés), les bois et forêts humides parsemés de mares, les marais anciennement aménagés (parcelles géométriques de petite taille qui mêlent de nombreux étangs, des parcelles maraîchères, des prairies et des peupleraies, des marais drainés (ancien système de drainage renforcé par une extension du réseau de drain souterrain), les friches humides souvent partiellement inondées associées aux affaissements miniers en bordure de terrils et les tourbières résiduelles (Tourbière de Vred).

A partir d'images SPOT XS multispectrales et panchromatiques, de données dérivées (type indices) et des données exogènes, une classification automatique fut implémentée. Elle permet notamment de distinguer les marais/hors-marais des sols agricoles (indice de brillance des sols nus par seuillage de l'indice de végétation NDVI), de discriminer les principaux types de couverture végétale (apport des NDVI saisonniers) : boisements, prairies permanentes, cultures, de cartographier des plans d'eau et de délimiter la zone d'expansion potentielle de la zone humide (confrontation du NDWI avec les données topographiques du MNT et les données hydrologiques).

Le projet « n°1 PNRZH : **Zones humides de l'estuaire et des marais de Seine. Structure, Fonctionnement et Gestion** » dans le cadre du programme Seine Aval est un autre exemple.

A partir de données SPOT XS et de données dérivées de type indice de végétation, la méthode de classification automatique permet d'identifier précisément les principales formations végétales en zone humide littorale dans le secteur du marais du Hode.

**Une étude menée par SIRS démontra l'intérêt de classifications supervisées afin mettre en évidence des milieux comme les prairies mésophiles et hydro morphes de la basse vallée de l'Authie (62 et 80).**

A partir d'image satellite Landsat 5 et d'un ensemble de parcelles d'apprentissage utilisées pour le paramétrage de la classification, l'utilisation de la bande du Moyen Infrarouge permet d'améliorer la qualité de la classification pour la majorité des thèmes mais de manière très sensible pour les prairies.

En effet, l'utilisation d'une telle bande améliore considérablement la lisibilité des phénomènes liés à l'hydromorphie : la radiométrie des milieux prairiaux humides est considérablement plus faible que celle des milieux mésophiles. L'apport du Moyen infrarouge pour les phénomènes liés à l'hydromorphie est aujourd'hui très largement reconnu.

Des travaux réalisés pour la **DIREN Champagne – Ardennes** basés sur des données Landsat et des approches par classification automatique permirent une bonne classification des prairies, cultures et sols nus clairs parmi 21 postes sur 4 départements, à savoir : l'Ardennes, l'Aube, la Haute-Marne et la Marne.

La méthodologie était basée sur une série de classifications ascendantes hiérarchiques aboutissant donc à l'identification et à la cartographie de 20 classes d'occupation du sol, ensuite sub-divisées en 145 unités paysagères (agrégation par classification texturale). La dernière étape consistait au regroupement des 145 unités paysagères par classification ascendante hiérarchique en 21 classes de paysages ruraux.

#### **2.2.1.2.2. Classification orientée objet**

Tout comme les méthodes de classification par pixel, les méthodes de classifications orientées objet peuvent être utilisées afin d'identifier les modes d'occupation des sols ou des habitats lors d'algorithmes de classification.

Ces méthodes s'inspirent de la perception humaine. Ainsi les algorithmes sous-jacents ne traitent pas le pixel de manière isolée, comme le font les méthodes de classification par pixel, mais dans son contexte. L'image utilisée est alors segmentée en groupes de pixels montrant des caractéristiques similaires. Ces groupes sont alors considérés comme des objets ce qui rend possible une interprétation basée, non plus seulement sur la base de la donnée spectrale mais aussi sur un ensemble de propriétés de l'objet.

En effet, la méthode orientée objet permet de prendre en compte et d'intégrer au processus de classification tout un ensemble de caractéristiques comme la taille, la forme ou la texture des objets. D'autres informations comme le contexte spatial peuvent également être inclus. Ainsi, des objets tels que les routes, bâtiments de l'image peuvent, à un degré de précision plus ou moins intéressant, être identifiés.

Puisque ces méthodes de classifications permettent, dans l'absolu, d'intégrer les habitats naturels, ces techniques semblent donc présenter un grand potentiel dans le cadre de la classification.

Avant l'étape de classification proprement dite, l'image doit être segmentée. La segmentation regroupe les pixels proches montrant des caractéristiques spectrales similaires. Ainsi, l'image est sous-divisée afin de produire une série d'objets spatialement discrets constitués de plusieurs pixels.

Puis, il s'agit de calculer pour chacun des objets toute une série d'attributs qui renseignent sur leurs caractéristiques spectrales, spatiales, texturales et contextuelles. Ces propriétés sont ainsi utilisées afin de construire ce que l'on appelle les règles de classification.

Il existe deux grandes approches de classification, l'une par entraînement, l'autre par construction de règles.

La première est basée sur un algorithme de maximum de vraisemblance à partir d'objets d'entraînements sélectionnés par l'opérateur.

Pour la seconde approche, l'opérateur génère des règles de manière cognitive à partir de ses connaissances. Ces règles peuvent utiliser la couleur mais aussi la taille, la forme, le contexte des objets ce qui améliore considérablement les performances de l'interprétation.

Quelle que soit la méthode utilisée, les règles mathématiques sont utilisées afin de faire correspondre les caractéristiques d'un objet de l'image (réflectance, forme, surface, texture,...) avec l'un des profils types de l'échantillon. Tous les objets de l'image se voient alors attribuer une classe unique ou sont laissés non classés si les profils des objets sont inhabituels.

Les classifications orientées objet diffèrent également des classifications par pixel dans le format de sortie de la classification. En effet, l'extraction des objets ou polygones se fait sous forme vectoriel. Cela permet ainsi l'intégration des résultats dans une plateforme SIG.

Le Pays de Galles a notamment utilisé cette approche pour la mise à jour de sa première cartographie.

En effet, si cette dernière entreprise sur tout le pays est la cartographie des habitats semi-naturels la plus complète et la plus largement utilisée au Pays de Galles, elle reste néanmoins fondée, en grande partie, sur des missions menées sur le terrain sur plusieurs décennies. Cette cartographie initiée en 1979 ne fut achevée qu'en 1997. Etant donné que les ressources financières étaient limitées, il n'était pas envisageable de répéter l'expérience.

L'approche par classification orientée objet, fondée sur la mise en place de règles de classification, fut donc retenue. Cette classification fut développée grâce au logiciel eCognition sur la base de données satellites multi-temporelles acquises entre 2003 et 2006. Elle permet de cartographier les habitats semi-naturels et les terres agricoles du pays de Galles afin d'avoir une mise à jour progressive de la cartographie issue de la phase 1.

La classification des objets des classes d'habitat de la phase 1 a été réalisée en deux étapes. Tout d'abord, le paysage gallois a été segmenté en objets en utilisant des données orthorectifiées SPOT-5 HRG à Haute Résolution spatiale (10 m) et des données issues des frontières du *Land Parcel Information System* (LPIS). Les règles de classification furent ensuite progressivement développées afin de discriminer et cartographier la distribution des 105 sous-habitats au Pays de Galles sur la base de séries temporelles SPOT HRG, Terra-1 Advanced ASTER et IRS LISS -3, de données dérivées (indices de végétation par exemple) et des informations exogènes (la topographie par exemple).

Les règles permirent de coupler les connaissances écologiques au contenu informatif des données de télédétection en utilisant une combinaison de seuils, d'opérations booléennes, etc.

Un deuxième jeu de règles a ensuite été appliqué pour traduire la classification plus détaillée résultante de la classification objet aux classes d'habitat de la cartographie de la phase 1. Une précision générale supérieure à 80% fut atteinte (sur la base de mission terrain), et la précision oscille entre 70 et 90% pour la majorité des classes.

Grâce à cet exercice, le Pays de Galles est devenu le premier pays en Europe à produire une carte nationale d'habitats (par opposition à la cartographie d'occupation des sols) grâce à une approche orientée objet à partir de données satellitaires. En outre, l'approche peut être adaptée pour permettre une surveillance continue de l'étendue et l'état des habitats et des terres agricoles au Pays de Galles.

### 2.2.1.2.3. L'évaluation des résultats

L'évaluation d'une classification, quelle que soit la méthode employée, peut se faire par la mise en place de ce que l'on appelle, une matrice de confusion ou tableau de contingence.

Cette matrice permet d'évaluer le degré de précision d'une classification. Celle-ci est obtenue en comparant les données issues de l'algorithme de classification avec des données de référence. Ces dernières peuvent provenir de campagnes sur le terrain ou de photographies aériennes par exemple.

Quelle que soit la source de ces données de référence, il est important qu'elles proviennent de source ayant une typologie identique afin de permettre la comparaison et qu'elles soient en nombre suffisant afin que chaque classe soit suffisamment représentée. Il est important de préciser que, dans le cas d'une classification supervisée, ces données de référence doivent être différentes de celles ayant été utilisées lors du processus de classification et la mise en place du jeu de données d'apprentissage.

La matrice de confusion se construit en reportant sur les lignes, les données de référence, et sur les colonnes celles issues de la classification. Elle permet donc de comparer pixel par pixel, la classe assignée à chaque pixel par le processus de la classification avec la vraie classe extraite de la vérité-terrain.

A partir de cette matrice de confusion, il est possible de mettre en place tout un ensemble de métriques permettant de quantifier le degré de précision de la classification. Parmi ces métriques on trouve :

- La précision générale : il s'agit du nombre de pixels correctement classés (par rapport aux données d'entraînement pour la validation), divisé par le nombre total de pixels d'entraînement.
- La précision utilisateur : il s'agit du pourcentage de pixels d'une classe issue de la classification correspondant à la même classe dans les données de référence.
- La précision réalisateur/producteur : il s'agit du pourcentage de pixels d'une classe de référence affectés à la même classe par la classification.
- Le taux de commission : il s'agit du pourcentage de pixels d'une classe donnée, issue de l'algorithme de classification, appartenant en réalité à une autre classe selon le jeu de référence.
- Le taux d'omission : il s'agit du pourcentage de pixels d'une classe donnée qui n'ont pas été assignés à ladite classe.

La matrice de confusion s'accompagne généralement de tableaux indiquant les pourcentages de confusion entre une classe donnée et chacune des autres classes.

La précision générale de la classification nous informe sur la qualité globale de la classification. Or, celle-ci est dépendante de l'échantillonnage des pixels.

Il existe donc d'autres techniques par lesquelles il est possible d'établir une mesure de confiance pour la matrice de confusion. Une de ces techniques est le calcul du coefficient Kappa. La valeur du coefficient de Kappa varie entre 0 et 1. Par exemple, une valeur de coefficient de Kappa de 0,85, usuellement admis comme étant la valeur minimale à atteindre, signifie que 85% de la classification n'est pas dû au hasard.

## 2.2.2. Les méthodes « émergentes »

Au-delà des méthodes d'extraction décrites précédemment et aujourd'hui opérationnelles, comme la Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur, les méthodes automatiques de classification (par pixel ou orientée objet), de nouvelles méthodes émergent.

Dans ces approches, la donnée de télédétection n'est plus la base de la méthodologie d'extraction de l'information mais elle est intégrée comme paramètre dans un modèle statistique. Il s'agit essentiellement d'approches de modélisation de l'écologie d'une espèce, quelle que soit l'espèce vivante (végétale, animale, bactérienne,...). Elles se différencient des cartes d'observation usuelles par la démarche employée.

En effet, on ne cherche pas à détecter ou identifier un objet sur l'image mais à modéliser l'écologie d'un vivant. Il s'agit de statistiques de distribution de l'habitat ou l'espèce à partir de plusieurs paramètres qui vont être confrontés aux données terrain.

Ces paramètres peuvent être de différentes natures, que ce soit environnementaux, climatologiques, géologiques, biologiques, phytosociologiques, anthropiques, physiques, etc.

Au final, on obtient un zonage de probabilité de présence ou d'existence d'une espèce vivante, d'un habitat ou d'un phénomène non visible, non détectable sur l'image satellite. Ces méthodes émergentes recherchent donc l'information à une échelle sous le pixel, on parle de méthode d'analyse sub-pixellaire.

Ces procédés sont notamment utilisés pour les espèces végétales. Il s'agit de décrire un habitat à partir d'observations dérivées de données de télédétection et de statistiques croisées avec des informations exogènes (données terrain par exemple). Il est alors possible, entre autres, de reconstituer des cartes d'abondance ou des cartes d'habitats par la reconstitution de nomenclature (de type *Corine Land Cover* par exemple).

De récents travaux réalisés par Elizabeth Farmer utilisent cette approche dans le cadre de sa thèse intitulée « A Critical Evaluation of Remote Sensing Based Land Cover Mapping Methodologies ».

Il s'agit d'une approche, utilisant des données dites primitives, descriptives des communautés, afin de réaliser une cartographie de la végétation.

Le point de départ de la méthodologie reste la mission terrain réalisée par des experts. Basées sur un échantillonnage du terrain (225 échantillons de 1 m<sup>2</sup>), ces missions permettent de caractériser cinq attributs des communautés végétales rencontrées sur l'échantillon investigué, constituant ainsi les données primitives, i.e. :

- les espèces présentes,
- le pourcentage de couverture,
- la taille,
- la structure,
- la densité.

A partir de la définition de classes végétales selon ces cinq attributs, une première cartographie est constituée pour chaque échantillon. Couplées à des données exogènes (MNT notamment), ces classifications servent de données d'entraînement pour la classification par pixel (classification supervisée) d'une image satellite SPOT-5.

La précision générale obtenue pour la carte de végétation résultante est de l'ordre de 80%, variable selon l'échantillon. Le travail de validation est basé sur l'utilisation de photographies aériennes. La méthodologie par l'utilisation de données primitives descriptives présente donc un fort potentiel en termes de description de la variabilité végétale d'un paysage et de cartographie des habitats.

Ces approches sont également très utilisées en épidémiologie pour la reconstitution des habitats des espèces vectrices de maladies. De récents travaux sur le paludisme réalisés par Vanessa Machault dans le cadre de sa thèse intitulée « Utilisation de données d'observation de la terre par satellite pour l'évaluation des densités vectorielles et de la transmission du paludisme », et aujourd'hui repris dans le projet EEOS Malaria, abordent cette méthodologie de cartographie indirecte par la reconstruction de l'habitat d'une espèce vivante, à savoir, l'anophèle.

L'idée est, à partir des satellites d'observation de la Terre de type SPOT-4 et SPOT-5, respectivement à 20 et 2,5 mètres de résolution spatiale, d'identifier et évaluer les facteurs environnementaux déterminants du paludisme.

Les facteurs déterminants de la maladie sont de deux types :

- géo-climatiques (saisonnalité, pluies, humidité, température, végétation, présence d'eaux de surface),
- anthropiques (activités agricoles, irrigation, déforestation, urbanisation).

Par exemple, à partir des données satellitaires, il est alors possible de mettre en place des indicateurs de végétation (de type NDVI), des indicateurs d'humidité (de type NDWI) ou des indices de sol (de type indice de brillance). Puis ces facteurs sont associés à la distribution spatiale et temporelle des déterminants biologiques du paludisme.

Ces indicateurs paludométriques sont, par exemple, dans le cas présent : les gîtes larvaires et les collections d'eau, l'agressivité anophélienne, la transmission des Plasmodiums, l'infection plasmodiale, la morbidité palustre via modèles et cartes reposant sur des données de terrain, connaissances a priori ou avis.

Ainsi, l'association entre les données environnementales, météorologiques et climatiques obtenues par télédétection spatiale et les indicateurs paludométriques (principalement obtenus par des données issues du terrain) permettent d'ajuster des modèles statistiques prédictifs, reconstituer des cartographies de l'habitat de l'anophèle et dresser des cartes du risque entomologique associé.

Il s'agit, par exemple, de cartographies des niveaux de risque dans des milieux urbains pour des actions de prévention sanitaire ou d'urbanisation raisonnée (possibilité de mise à jour annuelle) ou de cartographies dynamiques afin de cibler les actions de lutte anti-larvaire ou anti-imago dans les lieux et les endroits où le risque est le plus élevé (possibilité de mise à jour mensuelle, voire bimensuelle).

De tels travaux permettent ainsi de mieux appréhender la transmission du paludisme en milieu urbain et mieux connaître les conditions de transmission afin de lutter efficacement contre le paludisme. Le point intéressant est l'adéquation entre l'utilisation des indicateurs de télédétection et la modélisation, et les mécanismes biologiques observés sur le terrain.

### 3. Discussion et recommandation

La mission 3 de l'activité 3 du projet ARCH porte sur l'étude des potentialités des nouvelles technologies de télédétection spatiales et services associés pour la connaissance et le suivi des habitats naturels et de la biodiversité sur le territoire transfrontalier Nord-Pas de Calais et Kent.

Il s'agit, plus particulièrement, d'étudier la possibilité de mise à jour de la cartographie, résultat de l'activité 1, par l'utilisation d'images satellites à des fins de suivi des habitats naturels et de la biodiversité sur le territoire.

La cartographie issue de l'activité 1 est fondée sur le principe de la PIAO à partir de photographies aériennes. Or la solution de la PIAO s'avère être très lourde à mettre en place de par le temps de travail que cela représente et est très couteuse car elle nécessite la planification de mission aéroportée à large échelle.

L'idée d'explorer les outils et techniques de la télédétection spatiale doit permettre de proposer des solutions plus efficaces en termes de mise à jour et suivi des habitats. Utiliser la télédétection semble offrir de nombreux avantages, en comparaison des techniques traditionnelles de cartographies basées sur ces campagnes terrain, comme des productions plus rapides par exemple.

A cet effet, un certain nombre de considérations sont à prendre en compte afin de saisir et comprendre les enjeux d'une telle utilisation et évaluer correctement le potentiel de la télédétection spatiale.

Ainsi, avant toute chose, il est primordiale de constater que le travail par l'utilisation de données géospatiales couplées à des méthodes d'extraction automatique de l'information, ce qui s'apparenterait à une utilisation optimale de la technologie de télédétection, ne peut en aucun cas remplacer le travail par Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur. La télédétection peut néanmoins apporter des pistes de réflexion intéressantes.

#### 3.1. La nomenclature

Il est évident qu'il est très difficile, voire même impossible, de reproduire le travail de photo-interprétation, que ce soit en termes de géométrie des objets (formes et frontières) qu'en termes de complexité et finesse de la nomenclature de la cartographie.

De manière générale, plus le nombre de classes recherchées est petit et plus les classes sont simple, plus la solution de télédétection est viable. Or, dans le cadre du projet ARCH, le niveau de finesse de la nomenclature et le nombre de postes recherchés (mono-spécifique, orienté habitats naturels sur plus de 60 classes) rend impossible l'utilisation complète de la télédétection à l'échelle de la région. En effet, les méthodes d'extraction usuelles sont des méthodes automatiques qui se basent, principalement, sur l'information spectrale de l'image. Ainsi, les signatures spectrales ne diffèrent que très peu d'un couvert forestier ou végétal à un autre de même composition par exemple.

La segmentation/séparation des classes ne peut donc pas être aussi fine que lors d'un travail de photo-interprétation, et cela même, en utilisant des images provenant de satellites à très haute résolution spatiale. L'apport de la télédétection spatiale est se porte davantage sur une première segmentation ou niveau de nomenclature.

### 3.2. L'étendue géographique

Un défi supplémentaire concerne l'emprise de la cartographie. En effet, le projet ARCH s'inscrit à une échelle régionale. L'étendue géographique implique deux problèmes. Il est, tout d'abord, très difficile, selon le satellite choisi (et le capteur associé), d'obtenir des images cohérentes du point de vue spectrale et temporelle sur toute la zone géographique couverte par le projet (problème de phénologie sous-jacent). Ensuite, il est aussi complexe de couvrir toute l'étendue géographique en utilisant une série d'images satellites provenant d'un même capteur.

Par exemple, l'utilisation de données SPOT-5 d'une résolution spatiale de 20 m dont la fauchée est de 60 km suppose l'utilisation de plusieurs dizaines d'images afin de couvrir l'ensemble de la région d'étude. Le problème est encore plus complexe si l'utilisateur souhaite utiliser des données THR de type QuickBird ou Ikonos (résolution spatiale inférieure à 2,5 m en mode multispectrale) dont la fauchée n'est que de 17 kms. Or, l'agilité du satellite ne permet pas une telle acquisition. L'utilisation de données HR est alors davantage viable.

Par ailleurs, les plateformes satellitaires permettent de capturer une bande continue qui s'étend schématiquement du nord au sud (en réalité, la rotation de la terre rend la fauchée en légère diagonale). Or, le satellite est restreint en termes de stockage de données ou de transmission de la donnée vers la station de réception. Couvrir toute l'étendue géographique du secteur d'étude est donc complexe. Le problème est d'autant plus vraiment avec des données THR de type QuickBird, Ikonos ou WorldView.

L'une des solutions serait alors de réaliser une mosaïque de la zone à partir d'images satellites provenant de capteurs embarqués sur différents satellites. Néanmoins, se pose alors le problème de la cohérence spectrale des images due aux différences de radiométrie entre scènes différentes qui est compliquée à gérer. Envisager une telle solution n'est pas la meilleure démarche de travail.

Enfin, la réalisation d'une mosaïque d'images satellites va nécessiter des données aux conditions atmosphériques idéales, voire parfaites, (absence de brumes ou de nuages) s'étalant sur plusieurs bandes différentes de prise de vue, conditions plutôt peu communes dans le Nord-Ouest de l'Europe.

La détection et la classification des habitats ayant une emprise générale qui s'étend d'est en ouest, comme ici pour la région Nord-Pas de Calais, peuvent donc se révéler être de véritables défis.

### 3.3. Compromis entre les différentes résolutions

Il est inéluctable de devoir réaliser un compromis entre la fauchée, la résolution spatiale au sol et la résolution spectrale. Ainsi, le choix d'une résolution spatiale élevée, a priori requis pour un rendu des formes semblable à l'imagerie aérienne, se fera au détriment de la résolution spectrale, a priori obligatoire pour les classifications complexes, ou de la largeur de fauchée, nécessaire pour une analyse cohérente sur de grandes surfaces, voire même des deux.

### 3.4. Focus sur une zone d'intérêt spécifique

En revanche, il serait relativement aisée et envisageable de mener des essais concluants en termes de précision de classification à une échelle locale et donc sur une zone dite « test ou d'entraînement » couverte par une seule image. Il pourrait s'agir d'un habitat spécifique à une échelle plus locale présentant un intérêt écologique ou de biodiversité.

L'utilisation de données satellites à très haute résolution spatiale et spectrale, dans ce cadre, serait une solution. Dans cette optique, aujourd'hui, l'utilisation des données issues du satellite WorldView-2 semble intéressante sur différents points.

En effet, les images issues de ce satellite présentent de nombreuses caractéristiques intéressantes ; à savoir, d'une part, une très haute résolution spatiale et, d'autre part, une large gamme de bandes spectrales (huit au total). Parmi celles-ci, il convient de noter la présence de nouvelles bandes spectrales parmi lesquelles on trouve la bande « *Yellow* », la « *Coastal* » et la « *Red-Edge* », peu présentes sur les différents capteurs existants à l'heure actuelle.

Cette dernière présente un intérêt tout particulier. En effet, elle correspond en réalité à une portion du spectre dans le proche infrarouge. Elle se réfère à la région de changement rapide de la réflectance de la chlorophylle. Ce pic d'activité chlorophyllienne des végétaux se situe donc dans le proche infrarouge où la réflexion est la plus importante. Cette bande doit donc permettre un meilleur suivi de l'activité végétale.

Si ces particularités sur le *Red-Edge* sont connues depuis plusieurs années, son utilisation restait limitée. De nombreux systèmes aéroportés comme les capteurs hyperspectraux présentent cette bande sur des résolutions spatiales intéressantes mais les surfaces couvertes par ce type de système ne permettent pas une exploitation optimale des caractéristiques de la bande sur de larges territoires. En effet, il n'est pas envisageable d'utiliser des images issues de capteurs aéroportés pour le suivi d'habitats naturels à l'échelle d'une région par exemple.

En ce qui concerne l'imagerie satellitale, et jusqu'à peu, les satellites hyperspectraux étaient les seuls à mesurer la réflectance dans cette bande mais à des résolutions spatiales faibles. Depuis peu, le satellite WorldView-2 présente donc une bande *Red-Edge* à une très haute résolution spatiale ; à savoir 50 cm en panchromatique et 2,00 m en multispectrale. Cette nouvelle bande disponible sur le satellite WorldView-2 permet donc d'obtenir des informations complémentaires intéressantes. Elle apparaît notamment comme très significative afin de mettre en avant les différents stades phénologiques des couvertures végétales. Son utilisation, couplée aux bandes multispectrales classiques, permet ainsi de mettre en place des indices de végétation à l'utilisation optimisée.

Par ailleurs, la haute résolution spectrale, couplée à l'existence de nouvelles bandes, est également intéressante en vue des phases d'extraction de l'information lors des classifications. En effet, ces procédures se basant principalement sur l'information spectrale, plus le nombre de bandes est grand, et plus les bandes sont décorréélées, meilleur est le résultat final. Dans ce sens, l'utilisation de données WorldView-2 sur des *hotspots* est attrayante.

Néanmoins, étendre la méthodologie sur une zone couverte par plusieurs images, qui plus est, de dates différentes (échelle régionale voire nationale ou continentale) est bien plus complexe. En effet, il peut y avoir des changements de signatures spectrales sur de courtes périodes dues à des changements de stade phénologique de la végétation ou des conditions atmosphériques différentes selon la scène, voire les deux. De plus, l'agilité des satellites actuels THR ne permet pas une acquisition d'images couvrant l'ensemble du territoire.

Ainsi, il est évident que la solution de la pleine utilisation de l'outil télédétection pour la cartographie des habitats naturels à l'échelle régionale et le suivi temporel peut ne pas être la meilleure utilisation de la ressource si elle est utilisée pour les raisons suivantes :

- La télédétection afin de produire un rendu cartographique avec une nomenclature aussi fine et détaillée des habitats naturels que de la photo-interprétation assistée par ordinateur de photographies aériennes.
- La répétabilité des techniques à l'échelle régionale pour l'analyse du suivi d'habitat par rapport à l'édition cartographique actuelle.

En revanche, la télédétection peut être une meilleure solution de la ressource s'il s'agit d'évaluer un habitat spécifique à une échelle plus locale plutôt que de réaliser la cartographie et le suivi à l'échelle du NPdC et du Kent. Il pourrait y avoir un certain nombre de cibles potentielles. Un habitat ou des espèces difficilement repérables à l'aide de photographies aériennes classiques.

### 3.5. Le coût

En dépit de leur attitude d'ouverture vers la télédétection spatiale, les utilisateurs finaux tels que les organismes de suivi d'habitats et les gestionnaires ne sembleraient pas, légitimement, prêts à utiliser la télédétection à n'importe quel prix.

Par exemple, une acquisition de données THR de type QuickBird-2 sur toute la région Nord-Pas de Calais représenterait un investissement de 400 000 € ; 100 000 £ pour la région Kent. De plus, cette simulation ne tient pas compte de la faisabilité de l'opération en termes de couverture géographique ; l'obtention d'images sur toute la zone étant, dans les faits, comme précisé précédemment, impossible. Pour une couverture du secteur d'étude par des données HR de type GeoEye, l'investissement serait de 15 000 € pour le Nord-Pas de Calais et 4 000 £ pour le Kent.

Or, ces organismes sont souvent confrontés à des problèmes de moyens limités afin d'accomplir leurs tâches. Ils sont donc réticents à investir des sommes importantes dans l'utilisation d'un produit sans en connaître tous les aboutissants. Ces experts recherchent ainsi un avantage certain, par rapport aux méthodes traditionnelles, en particulier en termes de coût et efficacité. S'il est vrai qu'à ce jour, les nombreux services de la télédétection (images, logiciels,...) sont souvent encore très chers, certaines solutions, à moindre coût, existent.

Ainsi, il existe, par exemple, des logiciels libres d'accès qui permettent de manipuler et analyser les données géospatiales. Parmi ceux-ci, on peut citer les logiciels BEAM, développé par l'ESA (l'Agence Spatiale Européenne), ou SPRING, développé par l'INPE (l'Institut National de Recherche Spatiale brésilien). Néanmoins, si les logiciels payants permettent une utilisation générale de tous types de données, ces logiciels gratuits sont souvent orientés et développés pour des données spécifiques. Par exemple, le logiciel BEAM est essentiellement axé sur les données issues des programmes de l'ESA. Le logiciel SPRING, lui, est axé sur les données SPOT, Landsat, ERS-1 notamment.

Par ailleurs, au-delà des logiciels, des données sont également disponibles gratuitement comme par exemple les images satellites Landsat. Il s'agit de données à moyenne résolution spatiale (30 m).

De plus, une mutualisation des achats d'images par les différents acteurs potentiellement utilisateurs au sein de la région ne peut qu'être recommandée.

### 3.6. Le choix de la méthodologie de classification automatique

Comme il est évoqué précédemment, il existe aujourd'hui de nombreuses méthodologies en télédétection afin d'extraire l'information utile des images satellites et permettre, par exemple, la cartographie des modes d'occupation des sols.

Usuellement, le choix va se porter entre l'utilisation de méthodes de classification par-pixel (supervisée ou non supervisée) ou des méthodes de classification orientée objet. Dès lors, le choix de l'utilisation d'une méthodologie, plutôt qu'une autre, peut sembler complexe.

Quoi qu'il en soit, en pratique, dans le domaine d'application de la cartographie des habitats, les approches hybrides, couplant des méthodes d'extraction automatiques et des méthodes d'analyse visuelle par photo-interprétation, sont généralement d'usage car elles conduisent à de meilleurs résultats.

L'une des questions légitimes qui se posent consiste à savoir si le choix qui sera réalisé ne rend pas impossible les comparaisons entre projets ayant des finalités de suivi des habitats et de la biodiversité similaires au projet ARCH ou entre différentes zones d'une même région dans le cadre d'un projet unique comme ARCH.

Or, les utilisateurs potentiels de la technologie sont très souvent trop peu familiers avec le panel d'images et de méthodologies disponible. De fait, il leur est très difficile de choisir la méthode la plus adaptée à leurs besoins. On peut alors aisément comprendre qu'ils puissent être demandeurs de la mise en place d'une approche standardisée et optimisée (en termes de spécifications sur l'image ou de techniques de traitement et de classification).

En réalité, il n'existe pas de technique ou méthodologie qui soit supérieure. En effet, l'un des points forts de la télédétection est sa capacité à intégrer les différentes données et techniques pour une finalité qui corresponde aux attentes des utilisateurs finaux. Il n'est donc pas envisageable voire même intelligent de forcer ou rendre obligatoire l'utilisation d'une technique particulière, au risque de dégrader la qualité du résultat final.

Il est intéressant de revenir sur les avantages et inconvénients de chacune des méthodes d'extraction présentées dans ce rapport et présenter ainsi quelques recommandations. Seront successivement abordées, les méthodes de classifications par pixel, puis orientées objet.

En ce qui concerne les méthodes de **classification non-supervisée**, l'un des points intéressants de ces méthodes est qu'elles permettent, à défaut d'obtenir une classification précise et détaillée des modes d'occupation des sols ou des habitats (en terme de nomenclature), de réaliser une première segmentation des images en grands thèmes. Cette segmentation peut, par la suite, être utilisée afin de mettre l'accent sur des zones ou des thèmes d'intérêt pour le suivi des habitats, que ce soit par des méthodes automatiques complémentaires, comme les classifications supervisées ou orientées objet, voire même des méthodes de PIAO.

En revanche, par ces méthodes de classification, le regroupement des pixels crée des classes dont la signification thématique est parfois difficile à identifier. Le rendu cartographique n'est pas possible. Il est souvent courant que les classes obtenues ne correspondent pas entièrement aux classes observées sur le terrain. Il est alors d'usage de procéder, dans la mesure du possible, à la fusion/combinaison des classes. Néanmoins, il n'est pas envisageable de pouvoir retrouver chacune des classes de la cartographie réalisée dans le cadre de l'activité 1.

Une alternative consiste à utiliser la PIAO en complément des méthodes automatiques dans une optique de correction et de rendu cartographique. Les classifications non-supervisées ne permettent pas d'atteindre des niveaux de précisions excédant les 75% (aux alentours de 60-70%).

De leur côté, l'avantage des méthodes de **classifications supervisées** est qu'elles permettent d'obtenir, contrairement aux méthodes non supervisées, des classes ayant une signification thématique précise. En revanche, du point de vue opérationnel, une telle méthode est longue à mettre en place car elle nécessite la détermination et la mise en place de zones d'apprentissage.

Cela implique donc la mise en place de missions sur le terrain, souvent couteuse et longue, afin de collecter toute l'information.

De plus, lors de l'utilisation de telles classifications avec un nombre de points de contrôle considérable, il est difficile d'éviter les effets de bord lorsque les bandes se chevauchent. Réaliser une cartographie continue, consistante et cohérente sur de vastes régions est alors un véritable défi. De telles méthodes de classification ne permettent généralement pas d'obtenir des précisions générales supérieures à 75-80%, pour un nombre de classes limité (une dizaine de classes). En comparaison, les niveaux de précision atteints par des cartographies utilisant la PIAO sont de l'ordre de 85%.

Enfin, **les classifications orientées objet** ont l'avantage, elles, de proposer une méthode plus avancée de classification qui permet d'extraire des objets spatiaux définis.

Le processus de classification fait appel à un ensemble de propriétés de l'objet, comme par exemple la surface, la forme, le contexte spatial ou la texture. Comparativement aux méthodes de classifications sur le pixel, ces classifications permettent d'obtenir une précision accrue.

Les vecteurs (polygones) sont générés automatiquement pour chaque objet évitant ainsi la nécessité d'une numérisation manuelle. Néanmoins, à l'heure actuelle, si les niveaux de précision pour la cartographie des zones urbaines sont acceptables et les règles associées aisées à définir, celles concernant les « terres » ou les « paysages » ne sont pas aussi faciles à établir. En effet, aujourd'hui, il semble que les connaissances soient encore insuffisantes concernant la meilleure façon de sélectionner les valeurs appropriées pour des paysages.

Ainsi, la phase de segmentation, l'établissement des règles de classification et le processus de classification peuvent devenir complexes et longs. Le champ d'investigation est encore large et de nombreux progrès restent donc à réaliser. Néanmoins, les premières utilisations de classifications orientées objet en Europe montrent des précisions générales pouvant atteindre les 80% sur des cartographies d'habitats.

Le choix entre les méthodes de classifications par pixel et orientées objet se pose aussi en termes de cartographie pour les utilisateurs finaux. En effet, si les classifications orientées objet permettent de produire des polygones en format vecteur directement intégrable sous des plateformes SIG, les classifications par pixel produisent des résultats sous format raster dont l'unité de travail et de rendu est le pixel. Or, il est vrai que de nombreux utilisateurs de données géographiques (directeurs de sites naturels, décideurs, etc.) sont habitués à l'utilisation de cartes composées de polygones « parfaitement et joliment » dessinés.

### **3.7. Est-ce-que les nouvelles technologies de la télédétection sont utilisables en contexte opérationnel ?**

Si les nouvelles technologies que sont le LIDAR ou les données hyperspectrales par exemple semblent offrir des possibilités intéressantes en termes de suivi et de surveillance des habitats naturels, leur utilisation est néanmoins complexe.

En effet, il s'agit de données très onéreuses. De plus, il existe un problème de disponibilité et de continuité de la donnée. Par exemple, il existe peu de capteurs hyperspectraux et LIDAR (la plupart aéroportés) et les futurs satellites qui seront lancés ne pourront couvrir l'ensemble de zones à l'échelle de l'Europe, et de par le fait, à une échelle régionale. Ils ne pourront donc pas fournir des données aussi spatialement détaillées que les actuels capteurs aéroportés. Enfin, un obstacle majeur concerne la taille des images qui ne permet qu'une analyse des habitats sur de faibles emprises. Par exemple, INBO (l'Institut de Recherche pour la Nature et la Forêt) et VITO (l'Institut Flamand de Recherche Technologique), deux acteurs flamands de l'habitat naturel, ont exploré les possibilités de l'hyperspectrale. Ainsi, la technologie n'offre de véritables promesses qu'à des échelles locales sur des habitats spécifiques. Elle ne peut être considérée comme opérationnelle à l'échelle régionale dans une optique de cartographie des habitats naturels.

Pour ce qui est de données LIDAR, beaucoup de pays ont conduit des missions sur leur territoire afin de réaliser un Modèle Numérique d'Elevation (MNE). Reste à savoir si ces missions seront répétées dans le futur. Il est fort probable que l'utilisation du Lidar se concentrera sur les zones urbaines, au détriment des habitats naturels. On peut alors se demander s'il est réaliste d'utiliser de telles données dans un contexte de projets opérationnels. Néanmoins, la prise en compte de telles données et de leurs utilisations réussies dans certains projets ne peut occulter leurs existences et leur possible intégration pour des besoins spécifiques.

### **3.8. La Très Haute Résolution comme unique solution ?**

L'un des idées reçues qu'il convient de réfuter est la donnée à Très Haute Résolution comme unique solution viable pour la cartographie.

Le constat selon lequel ce qui ne peut être détecté sur les images satellites ne peut être vu est ainsi faux. Ainsi, l'image satellite ne se limite pas à la THR, au contraire. En effet, comme il est dit précédemment, la couverture à large échelle est impossible pour ce type de données. En Europe occidentale, et donc a fortiori dans les régions Kent et Nord-Pas de Calais, la THR ne peut être compétitive face à l'aérien.

En réalité, l'apport de l'image satellite peut également être perçu dans les données à HR. Celles-ci présentent une résolution spatiale et temporelle beaucoup plus intéressante pour de tels projets; et notamment en termes de phénologie. La relative moins bonne résolution peut être compensée par une approche par modélisation, du type de celles présentées précédemment lors de la description des méthodes émergentes « Recherche et Développement ».

### 3.9. La multi-temporalité

Aujourd'hui, l'un des intérêts premiers de la télédétection satellitaire au regard de la photographie aérienne réside dans l'aspect multi-temporelle. En effet, l'approche multi-temporelle permet de tenir compte des variabilités saisonnières des communautés végétales. La classification des habitats s'en retrouve facilitée

L'une des demandes les plus fréquentes des équipes de production est l'accès à des images de dates et saisons différentes afin de déterminer les communautés et habitats présents sur l'image. L'acquisition d'images par campagnes aéroportées ne permet pas un tel accès.

Or, la télédétection spatiale permet des acquisitions d'images sur des dates et des saisons différentes. En effet, il existe des constellations de satellites (constellation DMC par exemple) permettant une couverture hebdomadaire. Dans le futur, la constellation Sentinel (confère 3.10) permettra également d'exploiter la multi-temporalité.

Ainsi, c'est par l'aspect multi-temporel que la télédétection spatiale peut faire la différence vis-à-vis de méthodes de PIAO plus classiques qui ne peuvent exploiter qu'une seule date.

### 3.10. Quid des initiatives européennes et nationales ?

Les différentes initiatives européennes et nationales qui arrivent à l'horizon laissent présager, pour le futur, d'une possibilité de suivi des habitats et des terres quasi-annuelle. Parmi ces initiatives, deux sont particulièrement intéressantes : GMES et GEOSUD.

#### 3.10.1. L'initiative européenne GMES

Le programme européen de surveillance de la Terre ou *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), est une initiative conjointe de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et de l'Union Européenne qui vise à doter l'Europe d'une capacité opérationnelle et autonome d'observation de la Terre.

L'objectif est de rationaliser l'utilisation de données relatives à l'environnement et à la sécurité issues de sources multiples, afin de disposer d'informations et de services fiables. En d'autres termes, GMES permettra de rassembler l'ensemble des données d'observation et de surveillance de la Terre obtenues à partir de satellites environnementaux et d'instruments de mesure, afin de produire une vue globale et complète de l'état de notre planète.

Ainsi, le programme GMES s'appuie sur quatre composantes :

- la composante spatiale constituée de satellites d'observation du sol, des océans et de l'atmosphère. Ces données issues des satellites (optique ou RADAR) seront mises à disposition gratuitement.
- la composante in-situ constituée d'instruments de mesure au sol ou aériens mesurant des paramètres relatifs à l'état des océans (flotteurs, instruments embarqués sur des navires, etc.), du sol (stations de mesure, sismographes, etc.) et de l'atmosphère (instruments aéroportés, ballons stratosphériques, etc.).
- la composante standardisation et harmonisation des données.

- la composante des services à l'utilisateur. Ces services du programme GMES doivent produire des informations finales sous forme de données et services thématiques :
  - Les *Services Core* qui correspondent à un premier niveau d'analyse à l'échelle pan-européenne.
  - Les *Services Downstream* qui fournissent les informations pour des besoins spécifiques à un échelon (trans-) national, régional ou local. L'information correspondante peut dériver des *services core* ou peut être directement dérivée de l'infrastructure d'observation qui collecte les données nécessaires aux services du programme GMES. Il peut s'agir de cartes d'occupation des sols (comme par exemple l'ATLAS Urbain, CORINE ou ARCH ?), de fichiers de données, des rapports, alertes ciblées (*Fast Track services*), etc... Les différents services de GMES peuvent être classés comme suit :
    - Les services terrestres, maritimes et atmosphériques. Ils assurent une surveillance et des prévisions systématiques de l'état des sous-systèmes terrestres aux niveaux régional et mondial.
    - Les services d'urgence et de sécurité. Ils fournissent une assistance en cas d'urgence et de crise humanitaire, notamment aux autorités de protection civile, mais également des données précises sur des aspects liés à la sécurité (par ex. surveillance maritime, contrôle des frontières, stabilité internationale, etc.).
    - Les services pour le changement climatique. Ils contribuent à la surveillance des effets du changement climatique et à l'évaluation des mesures d'atténuation.

Les différents services ont été officiellement lancés à l'occasion du forum GMES qui s'est déroulé à Lille en septembre 2008. Il est prévu que ces services, actuellement en phase pré-opérationnelle, entrent en phase opérationnelle en 2011 et qu'ils soient pleinement opérationnels pour 2014.

Dans le cadre de la composante spatiale, une série de satellites va être lancée dans les années qui viennent. Parmi ces satellites, Sentinel-2 et Sentinel-1 permettront d'obtenir des images dans les domaines optique et RADAR.

#### **3.10.1.1. La mission Sentinel-2**

La mission Sentinel-2 est dédiée à la surveillance des terres et des océans. Cette mission s'inscrit dans la continuité de celles liées au satellite ENVISAT.

Pour ce faire, la paire de satellites Sentinel-2 délivrera, régulièrement, des images HR dans le domaine optique.

Le capteur embarqué sur la plateforme satellitale permettra une acquisition des images dans les domaines du visible, du proche infrarouge et du moyen infrarouge, soit, 13 bandes spectrales : quatre bandes à une résolution spatiale de 10 m, six à une résolution de 20 m et trois à une résolution de 60 m avec une largeur de scène de 290 km. Ces 13 bandes garantissent une bonne résolution spectrale, ainsi que des séries temporelles consistantes, mettant en exergue les variabilités de surface terrestre et permettant de réduire les artefacts induits par la variabilité atmosphérique.

L'orbite de la mission, à une altitude moyenne de 800 km approximativement, couplée à la paire de satellites opérationnels, permettra un temps de revisite de 5 jours à l'équateur (dans des conditions atmosphériques sans nuages) et 2 à 3 jours aux latitudes moyennes.

Le premier satellite devrait être lancé en 2013 (pour une mission de sept ans, éventuellement prolongeable de cinq ans).

Une plus grande largeur de scène et une meilleure résolution temporelle permettront de suivre des changements rapides comme, par exemple, des changements de végétation durant la saison de croissance. Les données issues des satellites Sentinel-2 serviront dans les domaines de l'agriculture, la sylviculture, la maîtrise de catastrophes, les programmes de secours humanitaires, ainsi qu'à l'observation des catastrophes naturelles, comme les inondations, les éruptions volcaniques, les affaissements et les glissements de terrain.

La mission de Sentinel-2 permettra de générer de l'imagerie pour la mise à disposition de produits à haut niveau d'opérationnalité, tels que les cartes d'occupation des sols, des cartes de changements d'occupation des terres et des variables géophysiques qui utilisent, par exemple, l'indice foliaire, la teneur en chlorophylle et la teneur en eau des feuilles. Des images concernant les inondations, les éruptions volcaniques et les glissements de terrain seront également acquises par Sentinel-2.

En conclusion, Sentinel-2 devrait associer une large fauchée, une bonne fréquence de revisite et une acquisition systématique de tous les types de surface terrestre à une haute résolution spatiale et une haute résolution spectrale.

### **3.10.1.2. La mission Sentinel-1**

La mission Sentinel-1 doit assurer la continuité des données fournies par les RADAR SAR montés à bord des satellites ERS, ENVISAT ou Radarsat, systèmes mis en place par l'ESA ou le Canada.

Le satellite Sentinel-1 sera donc équipé d'un système par RADAR. Les données issues du satellite seront des images en bande C permettant de délivrer, quelles que soient les conditions atmosphériques, et, de jour comme de nuit, des images aux services utilisateur du programme GMES.

Le premier satellite doit être lancé en 2013 et sera suivi d'un deuxième satellite quelques années plus tard.

Le capteur SAR embarqué fonctionnera selon deux modes distincts (*Interferometric Wide Swath and Wave*).

Le premier permettra notamment d'acquérir les images suivant une largeur de fauchée de 250 km à une résolution au sol de 5 x 20 m. Le temps de revisite de Sentinel-1, la couverture géographique et la dissémination rapide des données sont des caractéristiques clés afin de fournir des données opérationnelles au programme GMES. Ainsi, la paire de satellite Sentinel-1 permettra une couverture de l'Europe, du Canada et des principales routes maritimes en 1 à 3 jours, indépendamment des conditions atmosphériques.

Les données RADAR pourront être livrées dans l'heure qui suit l'acquisition, ce qui présente une grande amélioration par rapport aux systèmes SAR existants.

La mission bénéficiera de nombreux services associés. Par exemple, elle permettra l'élaboration de services relatifs au suivi de l'extension des mers en Arctique, à la cartographie des glaciers, à la surveillance de l'environnement maritime dont le suivi des marées noires et la détection des bateaux pour la sécurité maritime, au suivi des surfaces terrestres lié aux risques de mouvements, la cartographie des forêts, à la gestion de l'eau et du sol et à la cartographie pour l'aide humanitaire et les situations de crise

### **3.10.2. L'initiative nationale GEOSUD**

Le projet *GEOInformation for Sustainable Development* (GEOSUD) ou Information spatiale et Développement Durable, porté par le Cemagref, le CIRAD, l'ENGREF et l'IRD (mais ouvert aux partenaires scientifiques et opérationnels intéressés) a pour objectif le développement d'un Centre international de recherche et de transfert en télédétection et information spatiale pour le Développement Durable. Ce projet vise à développer des stratégies qui impliquent de surveiller les évolutions de l'environnement et des territoires et de comprendre leurs dynamiques (croissance démographique, développement socio-économique, l'aménagement du territoire exerçant une pression croissante sur l'environnement, etc.).

Le projet doit permettre la mise à disposition d'une couverture satellitaire annuelle à Haute Résolution de la France toute entière à de nombreux acteurs publics et parapublics, d'en assurer la diffusion et l'administration et de soutenir activement les recherches méthodologiques sur le traitement de l'information spatiale.

La première couverture nationale se fera d'ici l'été 2011 avec des données du satellite allemand RapidEye à une résolution spatiale de 5 mètres.

Le projet GEOSUD cherche à établir un continuum de compétences des acteurs de la recherche aux acteurs économiques (publics et privés, collectivités territoriales et entreprises) dans le domaine de la géomatique, des observatoires de l'environnement et des territoires. Ce projet s'inscrit directement dans le cadre des initiatives GMES et GEO (*Group on Earth Observations*).

Le projet GEOSUD s'articule autour de quatre objectifs aux implications intéressantes :

#### **3.10.2.1. « Recherche sur les méthodes et outils de maîtrise de l'information spatiale pour la gestion de l'environnement et des territoires »**

Ces recherches méthodologiques concernent :

- l'acquisition et le traitement des données spatiales, notamment par les techniques satellitaires.
- l'analyse et la modélisation des structures et dynamiques spatiales de l'environnement et des territoires.
- l'ingénierie des systèmes d'information et la conception d'observatoires.
- les modes de mobilisation et de partage de l'information dans les démarches de gestion et de gouvernance.

Elles s'appliquent à divers domaines thématiques : foresterie, hydrologie, agriculture, environnement, territoires ruraux et urbains, littoral, risques, santé.

GEOSUD permettra l'accueil de chercheurs de différentes équipes méthodologiques et/ou thématiques autour d'une plateforme technologique comprenant des équipements, outils et méthodes de traitement d'image, analyse spatiale, systèmes d'information ; ainsi qu'une animation scientifique commune.

### **3.10.2.2. « Transfert des méthodes et savoir-faire vers les partenaires économiques publics et privés, collectivités territoriales et entreprises »**

Le projet GEOSUD vise le développement du partenariat avec les acteurs économiques par le transfert vers l'opérationnel de méthodes validées et adaptées aux enjeux de gestion des milieux, des ressources et des territoires. Ce transfert et ce partenariat pourront se faire par un accès à une plateforme technologique ou le montage de projets en commun par exemple.

### **3.10.2.3. « Formations et Ingénierie pédagogique dans le domaine de l'information spatiale appliquée à la gestion de l'environnement et au développement territorial »**

Le pôle GEOSUD développera une offre de formation diversifiée, adaptable et transférable à destination de partenaires et de publics variés dans le domaine de l'information spatiale appliquée à la gestion de l'environnement et au développement territorial. Il envisage notamment à terme l'élaboration d'une offre de formation diplômante, comparable au Mastère SILAT, en langue anglaise.

### **3.10.2.4. « Faciliter l'accès de la communauté scientifique à l'information spatiale »**

Cet objectif part du constat selon lequel les experts du domaine « Gestion des Ressources et des milieux » ne sont que très peu utilisateurs des données spatiales. Cette situation constitue donc un frein au développement de méthodes adaptées mobilisant la télédétection et à leur transfert vers les acteurs opérationnels.

Le projet GEOSUD établit trois facteurs qui semblent expliquer cette faible utilisation, à savoir :

- la difficulté d'accès aux images satellitaires et leur coût,
- le manque de formation à l'utilisation de ces techniques
- une capitalisation insuffisante des développements méthodologiques réalisés au sein de cette communauté.

Ce quatrième objectif du projet GEOSUD vise donc à favoriser un accès plus large aux informations spatiales par une fluidification de l'accès aux images ou un accompagnement dans les démarches de choix des images et dans les méthodes de traitement.

## Conclusion

A ce stade du projet, compte-tenu des premiers besoins exprimés par les différents utilisateurs (SIG ou finaux) lors des diverses réunions et par les questionnaires remplis, et compte-tenu des perspectives et potentialités d'utilisation de la technologie satellitaire mis en avant dans ce rapport, plusieurs grands axes de développement peuvent être suggérés aux régions Nord-Pas de Calais et Kent en vue de la mise en place des scénarii :

- En réponse à un besoin de détection de changement rapide et mise à jour globale (régionale) et annuelle de la base de données ARCH, l'exploration des données satellites, de type RapidEye (à 5 mètres de résolution spatiale), dans le cadre de l'initiative nationale GEOSUD, semble une bonne perspective. Une approche par classification automatique pour une première segmentation générale (premier niveau de nomenclature) couplée à de la PIAO peut être envisagée. Cette mise à jour annuelle permettrait, par exemple, de faciliter la détection des zones à visiter sur le terrain.
- En réponse à un besoin spécifique localisé ou éventuellement de mise à jour ponctuelle, l'utilisation des données THR, de type WorldView-2, semble être une excellente alternative aux photographies aériennes actuellement utilisées dans le cadre de ARCH. La HR spatiale, spectrale et l'existence de nouvelles bandes constituent un axe d'étude très intéressant pour le suivi d'habitats d'intérêt spécifique, là où la détection par photographies aériennes est soit difficile, soit chronophage. L'exemple de la bande du proche infrarouge *Red-Edge* offre des perspectives intéressantes en termes de caractérisation des communautés végétales.
- Une simulation d'utilisation des futures données Sentinel, données à Haute Résolution spatiale (10 mètres) et temporelle (quasi-hebdomadaire), semble être un axe important en vue de la mise à jour de bases de données ARCH. L'utilisation de telles données doit permettre d'intégrer la phénologie à la cartographie des habitats grâce à la haute fréquence temporelle et ainsi permettre une caractérisation plus fine des communautés. En effet, il s'agit d'un besoin exprimé par les équipes de production en photo-interprétation. Une proposition serait, sur la base de la cartographie ARCH actuelle, d'acquérir une série d'images satellites issues de la constellation DMC (images à 20 mètres de résolution spatiale) sur une zone test de 4/5 images. Puis, il s'agirait de procéder à des essais de cartographie ou mise à jour des habitats naturels, en explorant les approches automatiques (classification orientée objet par exemple). La constellation DMC permettrait de simuler le service Sentinel.
- Enfin, selon les futurs besoins qui seront exprimés et selon la disponibilité des données, l'exploration et l'intégration de nouvelles technologies de type LIDAR (mais aussi RADAR) à la base de données ARCH existante est une possibilité. Néanmoins, un tel axe est soumis à la disponibilité de telles données compte-tenu de l'investissement important que cela représente.

## Annexes

### 1) Annexe 1 : Satellites, et leurs caractéristiques, actuellement en orbite autour de la Terre (capteurs passifs).

Satellite en Orbite	Capteur	Type	Date de Lancement	Pays	Nombre de Bandes	Gamme Spectrale (nm) (min-max)		Gamme Spectrale Panchromatique (nm) (min-max)		Résolution Spatiale Multispectrale (m)	Résolution Spatiale Panchromatique (m)	Fauchée (km)	Revisite (jours)	Altitude (km)	Coût (€/Km2) (archive programmation)		Commande Minimale (€) (archive programmation)		Fournisseur
IRS Resourcesat-2	LISS4	THR	20/04/11	Inde	3	520	860	n/a	n/a	5,80	n/a	24	5	817					Euromap
IRS Cartosat-2B		THR	12/07/10	Inde	n/a	n/a	n/a	500	750	n/a	0,80	9,6	4	630					Euromap
WorldView-2		THR	08/10/09	Etats-Unis	8	400	1040	450	800	2,00	0,50	16,4	1,1 à 3,7	770					Digital Globe
GeoEye-1		THR	06/09/08	Etats-Unis	4	450	920	450	800	1,65	0,41	15,2	3	681					e-geos
RapidEye (5 satellites)	REIS	THR	29/08/08	Allemagne	5	440	850	n/a	n/a	6,50	n/a	77	1	630	0,95	0,95	950	4750	RapidEye
IRS Cartosat-2A		THR	28/04/08	Inde	n/a	n/a	n/a	500	750	n/a	0,80	9,6	5	635					Euromap
WorldView-1		THR	18/09/07	Etats-Unis	n/a	n/a	n/a	400	900	n/a	0,50	17,6	1,7 à 5,4	496	11,92	15,43	3241,96		Digital Globe
IRS Cartosat-2		THR	10/01/07	Inde	n/a	n/a	n/a	500	850	n/a	0,80	9,6	4	630	7,70	n/a	n/a	n/a	Euromap
KOMPSAT-2	MSC	THR	28/07/06	Corée du Sud	4	450	900	500	900	4,00	1,00	15	3	685	5,20	10,40			SPOT Image
EROS B		THR	25/04/06	Israël	n/a	n/a	n/a	500	900	n/a	0,7	7		500					ImageSat International
TopSat		THR	27/10/05	Royaume-Uni	3	450	700	500	700	5,70	2,90	17	4	686					Infoterra UK
IRS P5 (Cartosat 1)		THR	05/05/05	Inde	n/a	n/a	n/a	500	850	n/a	2,50	30	5	618	2,469	n/a	1800	n/a	Euromap
Formosat-2	RSI	THR	20/04/04	Taiwan	4	450	900	450	900	8,00	2,00	24	1	888	4,34	5,20	2500		SPOT Image
IRS P6 (ResourceSat-1)	LISS4	THR	17/10/03	Inde	4	520	860	620	680	5,80	5,80	24	5	817	0,510 à 0,918	n/a	2500 à 4500	n/a	Euromap
QuickBird-2	BGIS-2000	THR	18/10/01	Etats-Unis	4	430	918	405	1073	2,69	0,67	18,6	2,4 à 5,4	496	11,92	15,43	3241,96		Digital Globe
EROS A		THR	05/12/00	Israël	n/a	n/a	n/a	500	900	n/a	1,9	14		500					ImageSat International
KOMPSAT-1	EOC	THR	20/12/99	Corée du Sud	n/a	n/a	n/a	510	730	n/a	6,60	15	3	685					SPOT Image
IKONOS-2	OSA	THR	24/09/99	Etats-Unis	4	445	853	526	929	3,28	1,00	11,3	3	681	12,62	16,13	1262		EU SPacelImaging
DMC AISat-2A	NAOMI	HR	12/07/10	Algérie	4	450	890	450	900	10,00	2,5	17,5	1	690			n/a		DMCii
CBERS-2B	CCD	HR	19/09/07	Chine/Brésil	4	450	890	510	730	20,00	20,00	113	3	778					INPE
ALOS	AVNIR-2	HR	24/01/06	Japon	4	420	890	n/a	n/a	10,00	n/a	70	2	697	0,10	n/a	500	n/a	SPOT Image/Eurimage
ALOS	PRISM	HR	24/01/06	Japon	n/a	n/a	n/a	520	770	n/a	2,50	70	2	697					SPOT Image/Eurimage
CBERS-2	CCD	HR	21/10/03	Chine/Brésil	4	450	890	510	730	20,00	20,00	113	3	778					INPE
SPOT-5	HRG	HR	03/05/02	France	4	500	1750	480	710	10,00	2,50	60	26	822	0,75	0,97	2700	3500	SPOT Image
Terra	ASTER VNIR	HR	18/12/99	Etats-Unis/Japon	3	520	860	n/a	n/a	15,00	n/a	60	16	705	0,01	n/a	59,6	n/a	USGS
CBERS-1	CCD	HR	14/10/99	Chine/Brésil	4	450	890	510	730	20,00	20,00	113	3	778					INPE

				il										
<b>SPOT-4</b>	HRVIR	HR	23/03/98	France	4	500	1750	610	680	20,00	10,00	60	26	830
<b>IRS 1D</b>	PAN	HR	29/09/97	Inde	n/a	n/a	n/a	500	750	n/a	5,50	65	5	737 à 821
<b>SPOT-2</b>	HRV	HR	22/01/90	France	3	500	890	500	730	20,00	10,00	60	26	830
<b>SPOT-1</b>	HRV	HR	22/02/86	France	3	500	890	500	730	20,00	10,00	60	26	830
<b>IRS Resourcesat-2</b>	LISS3	MR	20/04/11	Inde	4	520	1700	n/a	n/a	23,50	n/a	140	24	817
<b>IRS Resourcesat-2</b>	AWIFS	MR	20/04/11	Inde	4	520	1700	n/a	n/a	56,00	n/a	740	5	817
<b>DMC Deimos-1</b>	SLIM-6-22	MR	29/07/09	Espagne	3	520	900	n/a	n/a	22,00	n/a	660	1	667
<b>UK-DMC2</b>	SLIM-6-22	MR	29/07/09	Royaume-Uni	3	520	900	n/a	n/a	22,00	n/a	660	1	659
<b>DMC Beijing-1</b>	SLIM-6	MR	27/10/05	Chine	3	520	900	n/a	n/a	32,00	n/a	600	1	686
<b>IRS P6 ResourceSat-1)</b>	LISS3	MR	17/10/03	Inde	4	520	1700	n/a	n/a	23,50	n/a	140	24	817
<b>IRS P6 (ResourceSat-1)</b>	AWIFS	MR	17/10/03	Inde	4	520	1700	n/a	n/a	56,00	n/a	740	5	817
<b>DMC NigeriaSat-1</b>	SLIM-6	MR	27/09/03	Nigéria	3	520	900	n/a	n/a	32,00	n/a	600	1	686
<b>UK-DMC</b>	SLIM-6	MR	27/09/03	Royaume-Uni	3	520	900	n/a	n/a	32,00	n/a	600	1	686
<b>DMC AISat-1</b>	SLIM-6	MR	28/11/02	Algérie	3	520	900	n/a	n/a	32,00	n/a	600	1	686
<b>Terra</b>	ASTER SWIR	MR	18/12/99	Etats-Unis/Japon	6	1600	2430	n/a	n/a	30,00	n/a	60	16	705
<b>Terra</b>	ASTER TIR	MR	18/12/99	Etats-Unis / Japon	5	8125	11650	n/a	n/a	90,00	n/a	60	16	705
<b>Landsat 7</b>	ETM+	MR	15/04/99	Etats-Unis	7	450	12500	520	900	30,00	15,00	185	16	705
<b>IRS 1D</b>	LISS3	MR	29/09/97	Inde	4	n/a	n/a	520	1700	23,80	n/a	148	25	737 à 821
<b>IRS 1D</b>	WIFS	MR	29/09/97	Inde	2	n/a	n/a	620	860	188,00	n/a	812	3	737 à 821
<b>Landsat 5</b>	TM	MR	01/03/84	Etats-Unis	7	450	12500	520	900	30,00	15,00	185	16	705
<b>Proba</b>	CHRIS	HS	22/10/01	Union Européenne (ESA)	19	415	1050	n/a	n/a	18,00	n/a	14	7	615
<b>EO-1</b>	Hyperion	HS	21/11/00	Etats-Unis	220	356	2577	n/a	n/a	30,00	n/a	7,5	16	

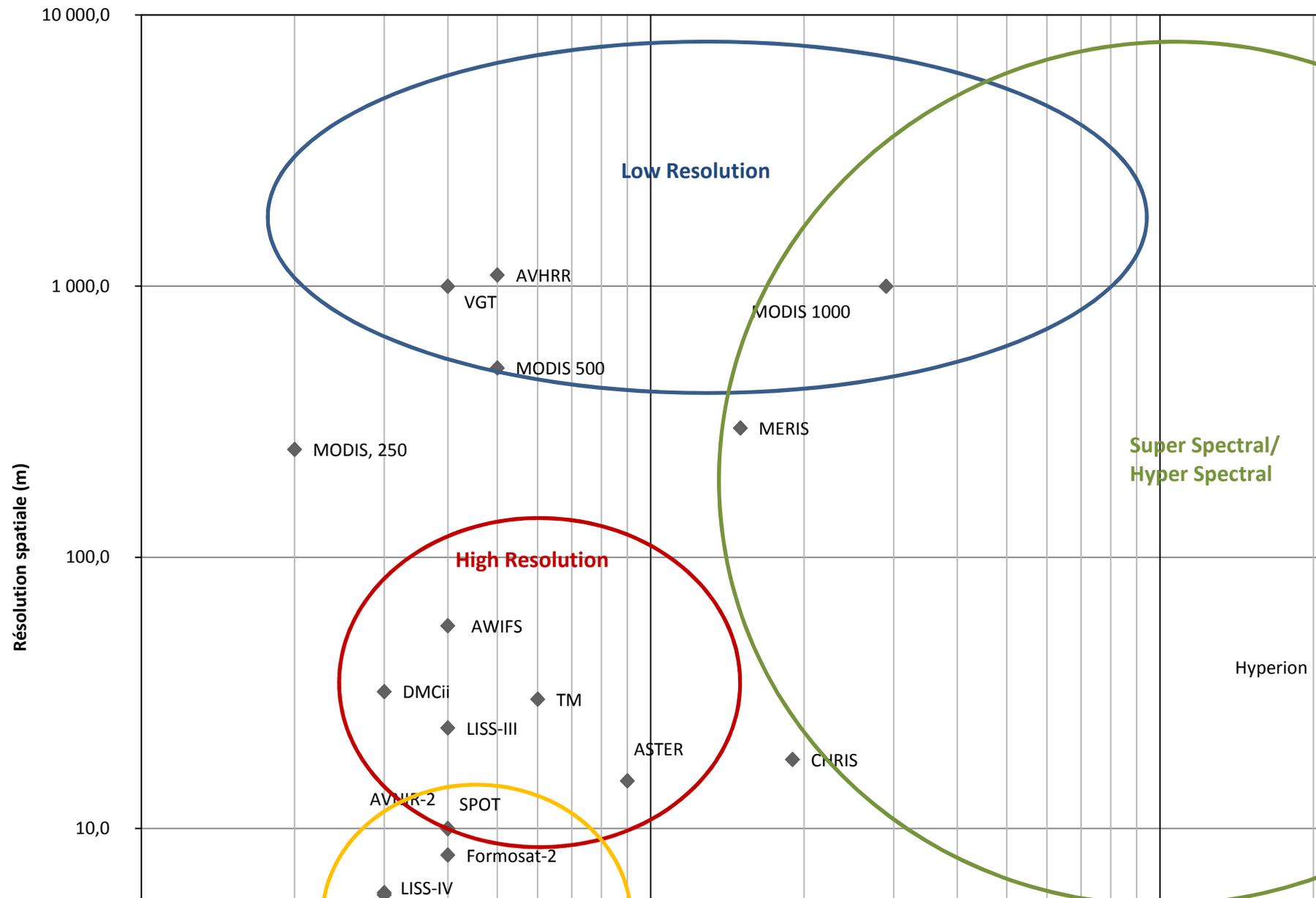
## 2) Annexe 2 : Satellites, et leurs caractéristiques, prochainement en orbite autour de la Terre (capteurs passifs).

Satellite à venir	Capteur	Type	Date de Lancement	Pays	Nombre de Bandes	Gamme Spectrale (nm)		Gamme Spectrale Panchromatique (nm)		Résolution Spatiale Multispectrale (m) (min-max)	Résolution Spatiale Panchromatique (m)	Fauchée (km)
						(min-max)	(min-max)	(m)	(m)			
Pléiades 1		THR	Fin 2011	France	4	430	950	480	830	2,00	0,50	20
Pléiades 2		THR	2012	France	4	430	950	480	830	2,00	0,50	20
SPOT-6		THR	2012	France	4	455	890	455	745	6,00	1,50	60
SPOT-7		THR	2013	France	4	455	890	455	745	6,00	1,50	60
DMC NigeriaSat-2		THR	01/05/11	Nigéria	4	n/a	n/a	n/a	n/a	5,00	2,5	20
DMC-3 (3 satellites)		THR	2013	Royaume-Uni	4	n/a	n/a	n/a	n/a	4,00	1	20
EROS C		THR	03/07/05	Israël	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	2,8	0,7	11
CBERS-3	PANMUX	HR	2011	Chine/Brésil	4	450	890	510	730	10,00	5,00	60
CBERS-4	PANMUX	HR	2014	Chine/Brésil	4	450	890	510	730	10,00	5,00	60
CBERS-3	MUXCAM	HR	2011	Chine/Brésil	4	450	890	n/a	n/a	20,00	n/a	120
CBERS-4	MUXCAM	HR	2014	Chine/Brésil	4	450	890	n/a	n/a	20,00	n/a	120
DMC AISat-2B		HR	n/a	Algérie	4	450	890	450	900	10,00	2,5	17,5
CBERS-3	IRMSS	MR	2011	Chine/Brésil	4	760	12500	n/a	n/a	40,00	n/a	120
CBERS-4	IRMSS	MR	2014	Chine/Brésil	4	760	12500	n/a	n/a	40,00	n/a	120
CBERS-3	WFI	MR	2011	Chine/Brésil	4	520	1750	n/a	n/a	73,00	n/a	866
CBERS-4	WFI	MR	2014	Chine/Brésil	4	520	1750	n/a	n/a	73,00	n/a	866
Landsat LDCM	OLI	MR	01/12/12	Etats-Unis	8	433	2300	500	680	30,00	15,00	185
Sentinel-2	MSI	MR	2013	Union Européenne (ESA)	13	433	2280	n/a	n/a	10,00 -20,00 – 60,00	n/a	290

### 3) Annexe 3 : Satellites RADAR, et leurs caractéristiques, actuellement et prochainement en orbite autour de la Terre (capteurs actifs).

Satellite	Capteur	Type	Date de Lancement	Pays	Polarisation	Fréquence (Bande)	Résolution Spatiale (m) (min-max)		Fauchée (km) (min-max)		Cycle Orbite (jours)	Altitude	Coût (archive-pro)
RadarSat-2		SAR	14/09/07	Canada	Full	C	3	100	20	500	24	800	1,44
RadarSat 1		SAR	04/11/95	Canada	HH	C	8	100	45	500		800	
TerraSAR-X		SAR	15/07/07	Allemagne	Full	X	1	16	10	100	11	514	67,5
TanDem-X		SAR	21/06/10	Allemagne	Full	X							
COSMO-SkyMed-1		SAR	08/06/07	Italie	Full	X	1	100	10	200	1	619	
COSMO-SkyMed-2		SAR	08/12/07	Italie	Full	X	1	100	10	200	1	619	
COSMO-SkyMed-3		SAR	25/10/08	Italie	Full	X	1	100	10	200	1	619	
COSMO-SkyMed-4		SAR	01/11/10	Italie	Full	X	1	100	10	200	1	619	
ALOS	PalSAR	SAR	24/01/06	Japon	Full	L	10	100	30	350	46	697	1,02
ERS-2		SAR	21/04/95	Union Européenne (ESA)	VV	C	30	150	100	400	35	785	
ENVISAT	ASAR	SAR	03/012002	Union Européenne (ESA)	Full	C	30	1000	100	400	35	790	0,06
RadarSat Constellation (3 satellites)		SAR	2014-2015	Canada	n/a	C	3	100	20	500	12	800	
Sentinel 1		SAR	2012	Union Européenne (ESA)	Full	C	5	40	80	400	12	693	

#### 4) Annexe 4 : Représentation graphique de satellites actuellement disponibles répartis en groupe selon les résolutions spectrales et spatiale



## Référence

CONDAL, A., Université Laval, Cours de télédétection : « Application de la Télédétection ».

DANIEL, S. et GOND, V., Université Laval, Cours de Télédétection : « Télédétection Fondamentale ».

ENVCAL – Suivi de l'environnement par télédétection, Cours, <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/index.html>

ESA, <http://www.esa.int/esaCP/index.html>

EUROPEAN COMMISSION, GMES, [http://ec.europa.eu/gmes/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/gmes/index_en.htm)

FARMER, Elizabeth , BREWER, Tim R. & SANNIER, Christophe A. D.(2010) 'Land cover attributes and their utility within land cover mapping: a practical example', Journal of Land Use Science,, First published on: 22 December 2010 (iFirst)

MACHAULT, V., Utilisation de données d'observation de la Terre par satellite pour l'évaluation des densités vectorielles et de la transmission du paludisme, Présentation en vue de l'obtention du diplôme de doctorat.

MAISON DE LA TELEDETECTION, Projet GEOSUD, <http://www.teledetection.fr/projet-geosud.html>

MEQUIGNON, L., CROISILLE, G. et LEJEUNE, V., documentation technique réalisée par SIRS pour l'Institut français de l'environnement – Office national de la chasse et de la faune sauvage, 2005, Application de la télédétection à l'étude des zones humides : identification des prairies, des roselières, des peupleraies et des gravières ».

PENNEC, A., 2009, Caractérisation de la phénologie des forêts tropicales de Guyane française à partir de séries temporelles d'images satellitaires, Mémoire de travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT.

PERONI, G., SIRS, 2010, New spectral data available for the controls in agriculture (CwRS) and for vegetation monitoring, CWRS 2010, Final Conference, Bergamo 24-26 Nov. 2010.

SIRS, 2010, Typologie et Cartographie d'habitats – Site Natura 2000 n° FR9400576 – « MASSIF MONTAGNEUX DU CINTO » – Partie « BONIFATU », 2010, Rapport d'étude.

STONE, W., E., NOBLIS INC. (anciennement MITRETEK), 2008, ASPRS Guide to land imaging satellites.

VANDEN BORRE, J., PAELINCKX, D., HOFFMANN, M. & SPANHOVE, T. (2010). Biodiversity monitoring beyond 2010 : what role of remote sensing ?, Minutes of the plenary discussion of the HABISTAT workshop "Monitoring Europe's biodiversity in a post 2010 era: the role of remote sensing for Natura 2000 reporting and ecosystem assessment". INBO.C.2010.4. Research Institute for Nature and Forest (INBO), Brussels, 9 pp. + annexes.

VANDEN BORRE, J., PAELINCKX, D., MUCHER, C.A., KOOISTRA, L., HAEST, B., DE BLUST, G. & SCHMIDT, A.M., Integrating remote sensing in Natura 2000 habitat monitoring : Prospects on the way forward. Journal for Nature Conservation (2011), doi:10.1016/j.jnc.2010.07.003

YALLOP, A.R., THOMAS, G., THACKER, J., BREWER, T. and SANNIER, C., 2004, Feasibility of remote sensing to inform site condition monitoring assessments on Scottish terrestrial SSSIs. Scottish Natural Heritage Commissioned Report No. 083 (ROAME No. F02LG15).