



# Table des matières

<b>1. Chapitre 1 : Généralités sur la géomatique .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Composantes de la géomatique.....</b>	<b>1</b>
1.2.1. Bases techniques de la géomatique.....	2
1.2.2. Fonctionnalités de la géomatique.....	2
1.2.3. Outils de la géomatique.....	3
<b>2. Chapitre 2 : Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Définition.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Historique .....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Composantes des SIG .....</b>	<b>5</b>
<b>2.4. Fonctionnalités des SIG .....</b>	<b>6</b>
2.4.1. Volets d'un SIG .....	6
2.4.1.1. Volet géodatabase .....	6
2.4.1.2. Volet géovisualisation.....	7
2.4.1.3. Volet géotraitement.....	7
2.4.2. Structures des bases de données géographiques .....	8
2.4.3. Notions de SGBD.....	9
2.4.4. Objectifs du SGBD .....	9
2.4.5. Avantage du SGBD.....	9
2.4.6. Langage <i>SQL</i> .....	9
<b>2.5. Organigramme des SIG.....</b>	<b>10</b>
2.5.1. Logiciels SIG .....	11
2.5.1.1. Logiciels source libre ( <i>QGIS</i> ) .....	11
2.5.1.2. Logiciel <i>ArcGIS</i> .....	12
<b>2.6. Mode de représentation des données géographiques.....</b>	<b>13</b>
2.6.1. Mode objet (structure vecteur).....	14
2.6.2. Mode image (structure raster).....	14
2.6.3. Approches image ou objet.....	15
2.6.4. Conversion des données.....	16
2.6.4.1. Vectorisation .....	16
2.6.4.2. Rastérisation.....	16
<b>2.7. Concepts généraux de base de données géographiques.....</b>	<b>16</b>
<b>2.8. Mode d'acquisition des données géographiques.....</b>	<b>17</b>
2.8.1. Import des fichiers .....	17
2.8.2. Levés topographiques .....	17
2.8.3. Photos aériennes.....	18
2.8.4. Images satellitaires .....	18
2.8.5. Scannage des documents cartographiques .....	18
2.8.6. Géo référencement des documents cartographiques.....	18
2.8.7. Numérisation et création des couches d'informations .....	19
<b>2.9. Outils d'analyse thématique.....</b>	<b>19</b>
2.9.1. Démarches d'analyse .....	19
<b>2.10. Notions de bases topographiques.....</b>	<b>20</b>
2.10.1. Angles verticaux et horizontaux .....	20
2.10.2. Modes opératoires en milieu marin.....	20

<b>2.11. Notions de bases géodésiques .....</b>	<b>27</b>
<b>2.12. Notions de bases cartographiques .....</b>	<b>28</b>
2.12.1. Systèmes de projections cartographiques .....	28
2.12.2. Systèmes de coordonnées cartographiques .....	32
<b>2.13. Orientation et direction de la carte .....</b>	<b>33</b>
2.13.1. Orienter la carte avec une boussole.....	33
2.13.2. Orienter la carte sans boussole.....	33
<b>2.14. Habillage des cartes .....</b>	<b>34</b>
2.14.1. Echelles cartographiques.....	34
2.14.2. Parties ou surfaces des cartes .....	37
2.14.2.1. Toponymie .....	37
2.14.3. Légende.....	37
2.14.3.1. Signes conventionnels.....	39
2.14.3.2. Variables visuelles .....	39
2.14.3.3. Expression des écritures cartographiques .....	40
2.14.4. Limites de perception visuelle .....	41
2.14.5. Catégories des cartes marines .....	41
<b>2.15. Notions d'altitudes (3D) et Modèle Numérique de Terrain (MNT) .....</b>	<b>43</b>
2.15.1. Propriétés des courbes de niveaux bathymétriques.....	43
Les courbes de niveaux bathymétriques indiquent la profondeur des eaux comme le montre la	
Fig. 35 suivante : .....	43
2.15.1.1. Densité des courbes de niveau .....	44
2.15.1.2. Élévation bathymétrique (fond marin).....	45
2.15.1.3. Vocabulaires employés par les marins.....	46
2.15.2. Les marques de balisage en mer .....	47
2.15.2.1. Les différentes sortes de phares maritimes : .....	47
2.15.2.2. Les différents rythmes de feux des phares maritimes : .....	47
<b>2.16. Spatiocartographie.....</b>	<b>48</b>
2.16.1. Utilité de la carte .....	49
2.16.2. Qualité de la carte .....	50
2.16.3. Méthodes de mise en page et exportation de la carte.....	50
<b>2.17. Utilités des SIG .....</b>	<b>51</b>
<b>2.18. Objectifs des SIG.....</b>	<b>51</b>
<b>2.19. Avantages des SIG .....</b>	<b>52</b>
<b>2.20. Domaines d'applications des SIG .....</b>	<b>52</b>
2.20.1. Cartographie marine.....	52
2.20.1.1. Cartes en mode « image » (« raster ») .....	52
2.20.1.2. Cartes en mode vecteur .....	53
2.20.2. Utilisation du SIG dans l'aquaculture et la pêche (Ressources marines) .....	53
2.20.2.1. Sélection et présentation d'une zone ou un site marin.....	53
2.20.2.2. Gestion de la pêche .....	54
<b>2.21. Conclusion.....</b>	<b>55</b>
<b>3. Chapitre 3 : Télédétection .....</b>	<b>56</b>
<b>3.1. Historique .....</b>	<b>56</b>
<b>3.2. Définition.....</b>	<b>57</b>
<b>3.3. Bases physiques et technologiques de la télédétection .....</b>	<b>58</b>
3.3.1. Formes de Télédétection .....	58
3.3.2. Rayonnement Electromagnétique (REM).....	58

3.3.3. Sources d'énergie électromagnétique .....	62
3.3.3.1. Sources naturelles .....	63
3.3.3.2. Sources artificielles .....	66
<b>3.4. Interaction du REM avec l'atmosphère.....</b>	<b>68</b>
<b>3.5. Interaction du REM avec la cible (Terre-mer-océan) .....</b>	<b>72</b>
<b>3.6. Capteurs de télédétection .....</b>	<b>73</b>
3.6.1. Capteurs passifs.....	73
3.6.2. Capteurs actifs.....	74
<b>3.7. Notions de résolution .....</b>	<b>75</b>
3.7.1. Résolution spatiale .....	75
3.7.2. Résolution spectrale .....	76
3.7.2.1. Exemple d'image multi-spectrale (MS) .....	78
3.7.3. Résolution radiométrique .....	79
3.7.4. Résolution temporelle .....	79
<b>3.8. Notions de réflectance.....</b>	<b>80</b>
3.8.1. Définition .....	80
3.8.2. Signification thématique des canaux.....	81
3.8.3. Comportement spectral des végétaux .....	81
3.8.3.1. Propriétés optiques des feuilles des végétaux chlorophylliens .....	81
3.8.4. Comportement spectral de l'eau .....	83
3.8.4.1. Propriétés optiques de l'eau de mer.....	85
<b>3.9. Aperçu sur quelques plates formes spatiales d'acquisition d'images satellites .....</b>	<b>86</b>
3.9.1. Satellites à faible résolution .....	86
3.9.2. Satellites à moyenne résolution.....	87
3.9.2.1. Satellite optique Sentinel .....	87
3.9.2.2. Satellites Algériens .....	88
3.9.3. Satellites à haute résolution.....	89
3.9.3.1. Satellites Radar .....	89
3.9.3.2. Satellite Radar franco-américain Topex Poséidon.....	91
3.9.3.3. Satellite Envisat.....	91
3.9.3.4. Satellite d'altimétrie Franco-Indien Saral .....	91
3.9.3.5. Satellite radar "Sentinel-1" .....	92
3.9.3.6. Satellite radar Sentinel -3 .....	92
<b>3.10. Traitement d'images satellites .....</b>	<b>93</b>
3.10.1. Définition .....	93
3.10.2. Prétraitement d'images .....	93
3.10.2.1. Correction atmosphérique .....	94
3.10.3. Traitement d'images .....	95
3.10.3.1. Amélioration de l'image .....	95
3.10.3.2. Correction géométrique.....	97
3.10.3.3. Correction radiométrique .....	98
3.10.3.4. Equilibrage de la dynamique.....	99
3.10.3.5. Composition colorée .....	99
3.10.4. Analyse de l'image .....	100
3.10.4.1. Détection de structures sur l'image.....	100
3.10.4.2. Segmentation.....	100
3.10.4.3. Classification thématique .....	102
3.10.4.4. Phase d'Extraction de Caractéristiques.....	103
3.10.4.5. Phase d'Entraînement .....	103
3.10.4.6. Classification non-supervisée .....	107
3.10.4.7. Classification supervisée.....	108

3.10.4.8. Evaluation de la qualité de classification .....	109
3.10.5. Calcul des indices spectraux .....	110
3.10.5.1. Indice de l'eau .....	110
3.10.5.2. Indice de Salinité.....	112
3.10.5.3. Température de surface .....	112
<b>3.11. Intégration des données télédétectées dans un environnement SIG.....</b>	<b>113</b>
<b>3.12. Buts et objectifs de la télédétection.....</b>	<b>114</b>
<b>3.13. Domaines d'application de la télédétection .....</b>	<b>116</b>
3.13.1. Secteur de l'hydrobiologie marine .....	116
3.13.1.1. Bathymétrie .....	118
3.13.1.2. Vents de surfaces .....	118
3.13.1.3. Courants marins .....	119
3.13.1.4. Couleur de l'océan.....	119
3.13.1.5. Déversements de pétrole .....	120
3.13.2. Exemple d'application de télédétection dans le secteur de la pêche en Algérie .....	120
3.13.2.1. Objectifs .....	121
3.13.2.2. Phases du projet .....	121
<b>3.14. Conclusion.....</b>	<b>125</b>

## Liste des tableaux

Tab. 1: Les périodes principales dans l'évolution des SIG .....	5
Tab. 2. Longueurs d'ondes et fréquences radar utilisées en télédétection (d'après Sabins, 1978). ....	67
Tab. 3. Caractéristiques générales de quelques capteurs optiques (d'après Faivre, 2018).....	74
Tab. 4. Caractéristiques générales des bandes de fréquences radar .....	74
Tab. 5. Liste des bandes spectrales du satellite Sentinel-2 (d'après Faivre, 2018) .....	78
Tab. 7. Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à faible résolution (d'après Ministere des ressources naturelles - Direction de l'information géographique - Québec, 2013). ..	87

## Liste des figures

Fig. 1. Structure de l'information géographique .....	2
Fig. 2. Composantes d'un SIG.....	6
Fig. 3. Trois (03) volets d'un SIG .....	7
Fig. 4. Fonctionnalités d'un SIG .....	8
Fig. 5. Couches d'informations prises en compte pour la sélection sous SIG des zones potentielles en vue de la culture en eau profonde (Sillage, 1997).....	9
Fig. 6. Architecture générale de l'ArcGIS .....	12
Fig. 7. Suite de produits ArcGIS d'ESRI (d'après Dubois, 2009). .....	13
Fig. 8. Informations géographiques en mode objet et raster (d'après Lhomme, 2008).....	13
Fig. 9. Exemple de compas de route embarqué sur les bateaux de navigation. ....	21
Fig. 10. Angles du Nord.....	21
Fig. 11. Angles des trois Caps.....	22
Fig. 12. Angles de base employés par les navigateurs.....	22
Fig. 13. Règle Cras.....	24
Fig. 14. Lecture d'angle sur un méridien (gauche) sur un parallèle (droite) .....	24
Fig. 15. Déclinaison négative (quand NM est à l'ouest (par rapport au méridien) du nord vrai (NV)) .....	25
Fig. 16. Déclinaison positive (quand le NM est à l'Est (par rapport au méridien) du nord vrai (NV)) .....	25
Fig. 17. Variation des angles de déviation à l'Ouest .....	25
Fig. 18. Variation des angles de déviation à l'Est .....	25
Fig. 19. Angle de gisement relevé à partir d'un bateau .....	26
Fig. 20. Angles des 3 relèvements .....	26
Fig. 21. Angle de gisement .....	26
Fig. 22. Outils employés dans l'exploitation des cartes marines (de navigation) .....	27
Fig. 23. Report de distances sur une carte.....	27
Fig. 24. Différents types de projection (d'après Charbonnel, 2005). .....	29
Fig. 25. Coordonnées (sur la carte) (d'après Charbonnel, 2005). .....	29
Fig. 26. Coordonnées (sur le globe terrestre) (d'après Charbonnel, 2005). .....	30
Fig. 27. Projection cylindrique conforme Mercator direct.....	31
Fig. 28. Coordonnées d'un point M.....	32
Fig. 29 : Exemple d'échelle graphique .....	36

Fig. 30. Nomenclature des codes de la classification Corine Land Cover (CLC) niveau 5 (CGDD, 2009) .....	38
Fig. 31. Codes de classification Corine Land Cover (CLC) appliqués aux surfaces d'eau (CGDD, 2009) .....	39
Fig. 32. Quelques variables visuelles .....	40
Fig. 33. Quelques symboles d'éléments marins cartographiés .....	40
Fig. 34. Limites et frontières maritimes .....	41
Fig. 35. Différentes catégories de cartes marines (d'après Charbonnel, 2005) .....	42
Fig. 36. Exemples de différentes catégories de cartes (encadrés en gras) (d'après Charbonnel, 2005) .....	42
Fig. 37. Courbes de niveau bathymétriques .....	43
Fig. 38. Représentation de quelques reliefs .....	45
Fig. 39. Carte bathymétrique en 2D et 3D (dimensions) .....	46
Fig. 40. Représentation et description cartographique d'un phare .....	47
Fig. 41. Quelques photos sur les phares .....	47
Fig. 42. Marques de balisage en mer .....	48
Fig. 43. Photo d'un modem acoustique .....	48
Fig. 44: Formats normalisés .....	51
Fig. 45. Principe général de la télédétection .....	57
Fig. 46. Spectre électromagnétique .....	59
Fig. 47. Schéma d'interaction du REM avec l'atmosphère et la cible (terre) .....	69
Fig. 48. Diffusion des ondes électromagnétiques .....	69
Fig. 49. Trajet optique au coucher et lever du Soleil .....	70
Fig. 50. Diffusion non-sélective .....	71
Fig. 51. Absorption des rayonnements dans l'atmosphère .....	71
Fig. 52. Télédétection passive et active .....	75
Fig. 53. Exemple de résolution spatiale (d'après Faivre, 2018) .....	76
Fig. 54. Exemple de résolution spectrale (d'après Faivre, 2018) .....	78
Fig. 55. Exemples de résolutions spectrales améliorées .....	78
Fig. 56. Interaction de l'énergie solaire avec la surface de la cible .....	81
Fig. 57. Exemple de réflectance des végétaux chlorophylliens dans le Proche Infrarouge .....	82
Fig. 58. Propriétés optiques de l'eau .....	85
Fig. 59. Exemple d'échantillonnage et incidence sur ma classification .....	108
Fig. 60. Image de la Chlorophylle-A au niveau de la Méditerranée orientale (2001) .....	124
Fig. 61. Image de la température de surface "SST" (NOAA, 1997) .....	124
Fig. 62. Les courants océaniques observés par les satellites d'océanographie (d'après CNES).....	125

# 1. Chapitre 1 : Généralités sur la géomatique

## 1.1. Introduction

La géomatique est une discipline qui repose sur un ensemble de connaissances théoriques et pratiques nécessaires pour comprendre la référence spatiale, l'implantation et l'analyse des bases de données relationnelles, les règles de cartographie thématique et les types de structures géométriques (vectorielles et matricielles). Notions sur l'acquisition de données (ex. GPS), la préparation et l'édition de données géospatiales. Expérimentation des opérations d'analyse spatiale métrique et topologique (Larrivée *et al.*, 2019).

Le mot géomatique regroupe l'ensemble des connaissances et technologies nécessaires à la production et la gestion des données numériques décrivant le territoire et ses ressources. Ses racines étymologiques sont "Géo", qui veut dire Terre, et "matique" vient de l'informatique, soit le traitement automatique de l'information.

C'est au début des années 70 qu'un ingénieur géographe employa pour la première fois le mot « géomatique » pour faire allusion au mariage des sciences de l'étude et des mesures de la Terre avec l'informatique (Laurencin, 2008).

C'est au Canada où le mot fait son apparition. Ainsi, en 1993, l'Office de la langue française du Québec adopte le terme géomatique comme « la discipline ayant pour objet la gestion des données à référence spatiale et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion ».

La géomatique est avant tout une activité à caractère opérationnel qui s'applique à de nombreux domaines énumérés comme suit :

- a. Les secteurs administratifs : agriculture et forêt, armée, équipement, environnement, etc.
- b. Les collectivités territoriales : gestion des réseaux techniques, aménagement et urbanisme, cadastre, gestion des déchets et des ressources naturelles, risque et environnement, transports, services d'urgence et de secours.
- c. Les secteurs commerciaux : géomarketing, immobilier, banques, assurances, etc.

## 1.2. Composantes de la géomatique

Deux composantes réparties comme suit :

- a. L'information relative à un objet décrit par sa nature, son aspect : c'est le niveau sémantique. L'ensemble des attributs de l'objet forme ses attributs (comme par exemple : le numéro d'un phare, nom de la mer, la zone de culture marine, le nom d'une route, le nom d'une rivière, le nom d'une île, le nombre d'habitants d'une localité riveraine,...etc.),

- b. La forme et la localisation de l'objet sur la surface terrestre, exprimés dans un système de coordonnées explicite : c'est le niveau géométrique. Un système de coordonnées peut être valable sur tout ou partie de la surface terrestre ou autre (comme par exemple le système géodésique mondial (WGS84)). On peut aussi définir un système de « coordonnées relatives » par rapport à un point d'origine quelconque, comme c'est souvent le cas pour les relevés topographiques. L'information géographique est répartie en deux (2) d'informations comme le montre la Fig. 1 suivante :

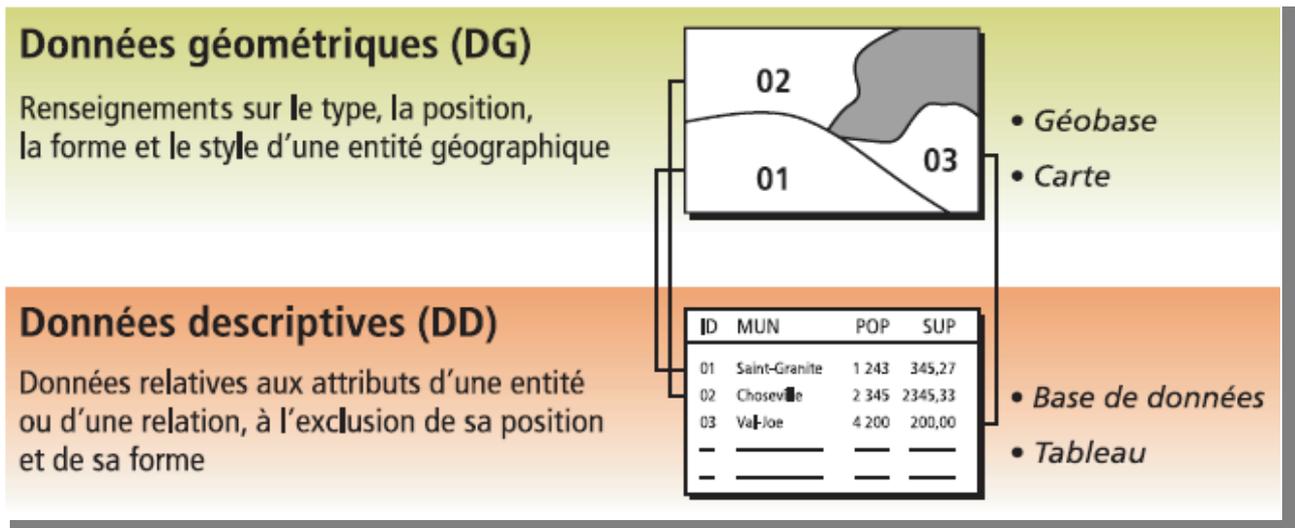


Fig. 1. Structure de l'information géographique

Il est possible d'associer à ces deux composantes une troisième composante qui concerne les relations d'un objet avec les autres. C'est le niveau topologique (comme par exemple : la contiguïté entre deux limites adjacentes, l'inclusion d'une sous zone dans une zone d'élevage, l'adjacence entre les différents nœuds des tronçons constituant des aires géographiques, quai, trait de cote, ..etc.).

### 1.2.1. Bases techniques de la géomatique

La géomatique couvre un ensemble de techniques telles que les levés cadastraux, la géodésie, la cartographie, la topographie, l'hydrologie, la télédétection et les systèmes d'informations géographiques (SIG).

La géomatique est donc un outil moderne, qui représente actuellement un défi d'intégration au moindre coût de l'ensemble de l'information géographique disponible. Elle permet de faciliter le travail des gestionnaires et aider à la prise de décision.

### 1.2.2. Fonctionnalités de la géomatique

La géomatique permet :

- De lier des données descriptives à leur localisation sur le territoire,
- D'intégrer une masse considérable d'information à l'intérieur d'une structure organisée,

- c. De localiser, mesurer et représenter sur des cartes et plans les divers éléments du territoire,
- d. De mettre au point et d'utiliser des systèmes d'information géographique pour faciliter le traitement, le stockage et la diffusion de l'information servant de support à la prise de décision,
- e. De faciliter l'accès et l'analyse des données pour les activités de gestion,
- f. De fournir aux élus et gestionnaires un outil de gestion efficace et fiable de consultation de l'information,
- g. De faciliter les activités de mise à jour de l'information,
- h. De favoriser l'échange d'information avec des partenaires externes,
- i. De faciliter la diffusion des données, de mettre à profit ces connaissances et technologies pour aider diverses catégories de professionnels à résoudre des problèmes reliés à leur domaine d'intervention.

### **1.2.3. Outils de la géomatique**

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection sont devenus des outils incontournables pour la compréhension et le suivi des phénomènes dynamiques et, une nécessité pour l'orientation d'investissement et disposer d'arguments valables pour la prise de décisions (Missoumi & Tadjerouni, 2003). Parmi les outils qu'on peut les utiliser en géomatique on cite en particulier :

- a. Le Système d'Information Géographique (SIG),
- b. Le Système de Positionnement Global (GPS),
- c. Couches d'informations multi sources référencées,
- d. Différents logiciels d'analyse et de traitement des données.

L'outil central et fédérateur de la géomatique est les SIG qui est, pour résumer, la « réunion » d'un Système de Gestion d'une Base de Donnée (SGBD) avec un logiciel de cartographie automatique.

## 2. Chapitre 2 : Systèmes d'Informations Géographiques (SIG)

Lier l'information à la localisation géographique est un processus qui s'applique à de très nombreux domaines d'activité. Choisir un site, gérer des ressources, planifier et déployer un réseau, cartographier une zone, ou gérer les espaces - tous ces problèmes impliquent des données d'ordre géographique. Les SIG, peuvent être d'une grande utilité en répondant rapidement à toutes ces questions, de manière fiable et efficace en permettant de visualiser ou analyser l'information géographique.

### 2.1. Définition

Des expressions proches du mot SIG sont utilisées dans d'autres langues ; c'est le cas de l'anglais avec l'expression « *Geographic Information System (GIS)* » qui est souvent traduite en français par « Système d'Information Géographique (SIG) » ou « Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS) » ou encore « Système d'Information sur le Territoire (SIT) (Laurencin, 2008).

Plusieurs définitions ont été adoptées, parmi les plus significatives nous citons ce qui suit :

- a. Définition française du Centre National d'Information Géographique (CNIG) "Système pour saisir, stocker, vérifier, intégrer, manipuler, analyser et visualiser des données qui sont référencées spatialement à la terre. Il comprend en principe une base de données localisées et les logiciels applicatifs appropriés. Une des premières fonctions d'un S.I.G. est sa capacité à intégrer des données de sources différentes." (Laurencin, 2008).

Le SIG est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace (Koehl, 2006). Un SIG est un ensemble de matériels et de logiciels autorisant le recueil, la saisie, la codification, la correction, la manipulation, l'analyse et l'édition graphique des données géographiques spatiales de types ponctuels, linéaires et surfaciques ou polygonales et pixels de différentes valeurs. La gestion des données est un des autres aspects du système, qui prend toute son importance lorsque la base de données se doit d'être en phase avec l'actualité (Dargone *et al.*, 1990).

### 2.2. Historique

Les premiers SIG opérationnels sont apparus dans les années 1960 au Canada et aux Etats Unis. Le pionnier est indiscutablement le Canadian Geographic Information System (1964) qui rassemble des informations relatives à l'usage du sol et des données concernant l'environnement, sur une grande partie du territoire canadien. Deux autres réalisations avant-gardistes méritent d'être mentionnées : le New York Land Use Information System (1967) et le Minnesota Information

System (1969). Depuis cette époque, les coûts et les difficultés techniques ont considérablement diminué (Chakroun, 2014). Les progrès récents réalisés dans le domaine des SIG ont permis d'emmagasiner, de compiler et de reproduire des données cartographiques à l'aide d'un ordinateur. Cette technique permet de fournir des données numériques sur le spatial et d'autres attributs du milieu en relation directe avec leur emplacement.

Tab. 1: Les périodes principales dans l'évolution des SIG

N°	Périodes	Evolution des SIG
1	Fin des années 1950 milieu des années 1970	début de l'informatique, premières cartographies automatiques.
2	Milieu des années 1970 début des années 1980	diffusion des outils de cartographie automatique / SIG dans les organismes d'État (armée, cadastre, services topographiques, ...)
3	Depuis les années 1980	croissance du marché des logiciels, développements des applications sur PC, mise en réseau (bases de données)
4	Depuis les années 1990	des applications sur Internet et une banalisation de l'usage de l'information géographique (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires routiers, utilisation d'outils embarqués liés au GPS...)

### 2.3. Composantes des SIG

Les SIG sont composés de quatre (4) composantes comme le montre la Fig. 2 suivante :

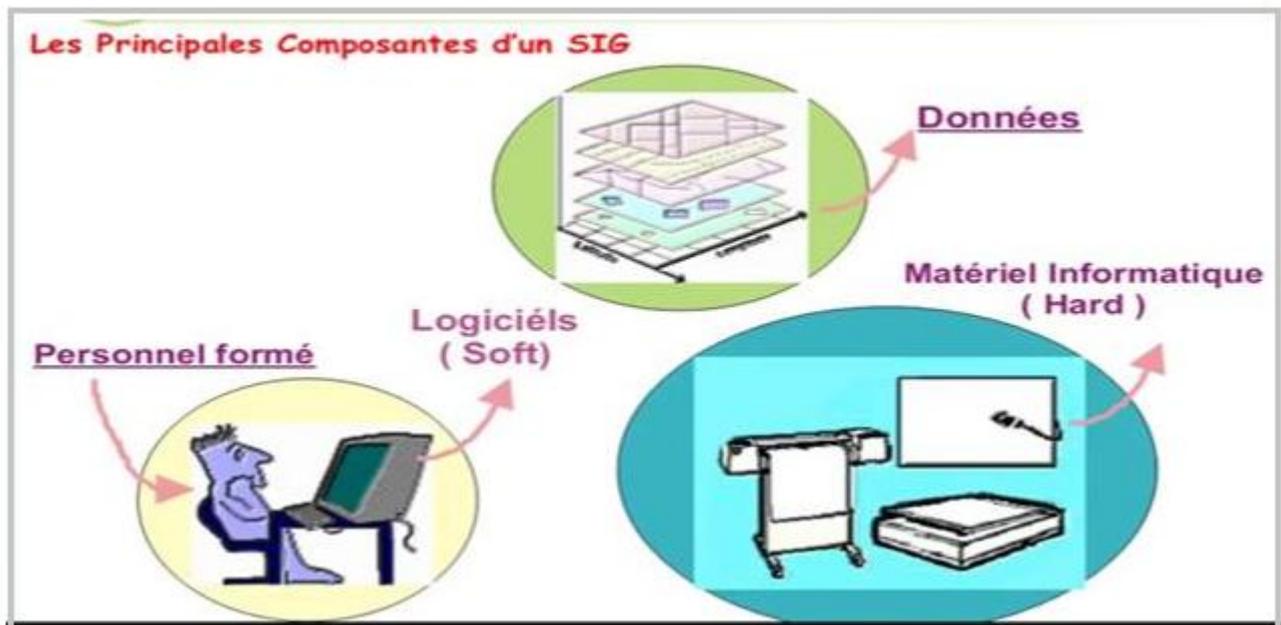


Fig. 2. Composantes d'un SIG

## 2.4. Fonctionnalités des SIG

Selon ESRI (2004), un SIG doit répondre à cinq questions, quel que soit le domaine d'application :

- **Où** : où se situe le domaine d'étude et quelle est son étendue géographique ?
- **Quoi** : quels objets peut-on trouver sur l'espace étudié ?
- **Comment** : comment les objets sont-ils répartis dans l'espace étudié, et quelles sont leurs relations ? C'est l'analyse spatiale.
- **Quand** : quel est l'âge d'un objet ou d'un phénomène ? C'est l'analyse temporelle.
- **Et si** : que se passerait-il s'il se produisait tel événement ?

Les fonctions de gestion de données d'un SIG sont fondamentalement celles d'un système de gestion de la base des données (SGBD). Elles comprennent le stockage, l'édition, l'extraction des données et la mise à jour.

En outre, les utilisateurs disposent de plusieurs volets pour afficher et manipuler les informations géographiques (ESRI, 2004).

### 2.4.1. Volets d'un SIG

#### 2.4.1.1. Volet géodatabase

Un SIG correspond à une base de données spatiales contenant des jeux de données qui représentent des informations géographiques selon un modèle de données SIG générique (entités, rasters, topologies, réseaux, etc.).

### 2.4.1.2. Volet géovisualisation

Un SIG est un ensemble de cartes intelligentes et de vues qui montrent des entités et leurs relations à la surface de la terre.

### 2.4.1.3. Volet géotraitement

Un SIG comprend des outils de transformation des informations qui produisent des jeux de données géographiques à partir des jeux de données existant.

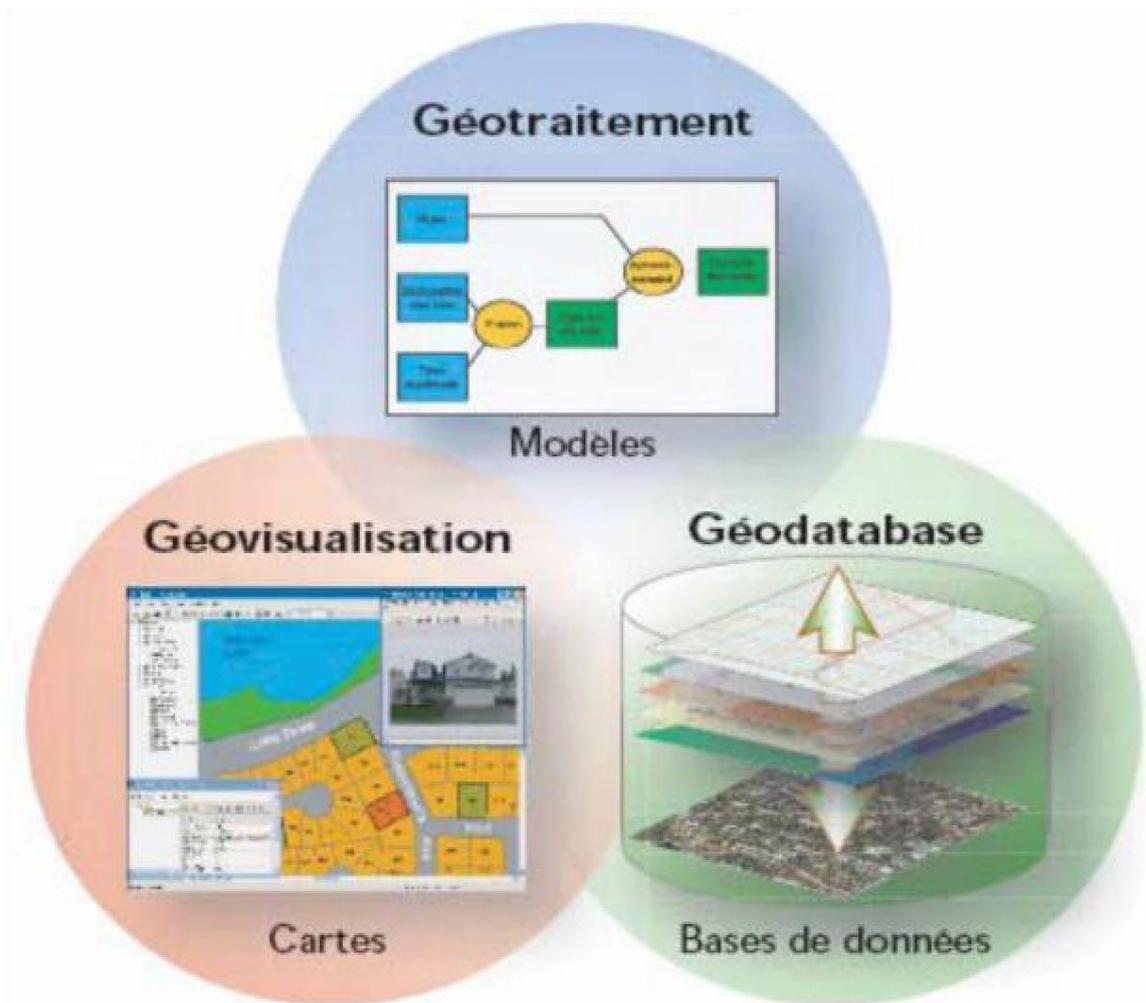


Fig. 3. Trois (03) volets d'un SIG

La gestion de la base de données est assurée par un Système de Gestion de Base de Données (SGBD). Le SGBD doit assurer ce qui suit :

- Des fonctionnalités de gestion responsables du maintien et de l'exploitation d'une base de données (saisie, correction, suppression, extraction, interpolation...),
- Des tâches liées à la topologie (recherche sur la localisation, sur l'inclusion ...) mais aussi la gestion des droits d'accès.

Il y'a cinq (5) fonctionnalités « on les appelle les 5A » que tous les SIG doivent assurer (Kouba, 2018). Les fonctionnalités sont résumées comme suit :

- a. **Abstraire** ; concevoir un modèle qui arrange les données par constituants géométriques et par attributs descriptifs, et qui permet aussi d'établir des relations entre les objets.
- b. **Acquérir** ; le logiciel doit posséder des fonctionnalités de digitalisation et d'importation de données.
- c. **Archiver** ; le logiciel doit avoir une grande capacité de stockage des données.
- d. **Analyser** ; capacité d'analyser les données géographiques (méthodes quantitatives et statistiques, opérateurs topologiques, etc.).
- e. **Afficher** ; capacité d'affichage de l'information géographique sous forme de Cartes, tables, graphes, etc.
- f. **Acquisition** de la base de données : la Base de Donnée Géographique (BDG) est constituée d'un ensemble numérique composé de cartes et d'informations associées. Cette dernière décrit les objets à la surface de la terre. Elle est formée de deux éléments : Une base de données décrivant les objets spatiaux (localisation, forme) par exemple, un groupe ou ensemble de parcelles ou sous parcelles.

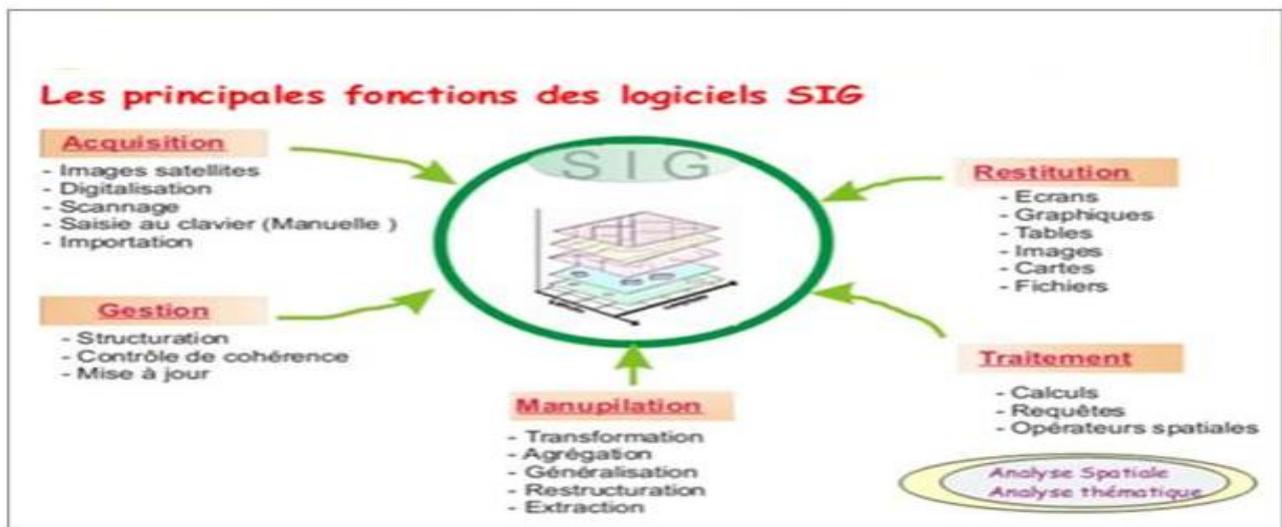


Fig. 4. Fonctionnalités d'un SIG

#### 2.4.2. Structures des bases de données géographiques

Les SIG stockent les données spatiales et les données attributaires sous forme d'une base de données géographique. Cette dernière est composée d'une série de couches d'information géographique ordonnées de manière efficace pour être utilisées par une ou plusieurs applications. Il faut noter que les données doivent être rendues « superposables » comme le montre la Fig. 4 ci-dessous, c'est-à-dire dans le même système de coordonnées ou dans des systèmes compatibles (une transformation géographique permettant de passer d'un système à l'autre) (Kouba, 2018).

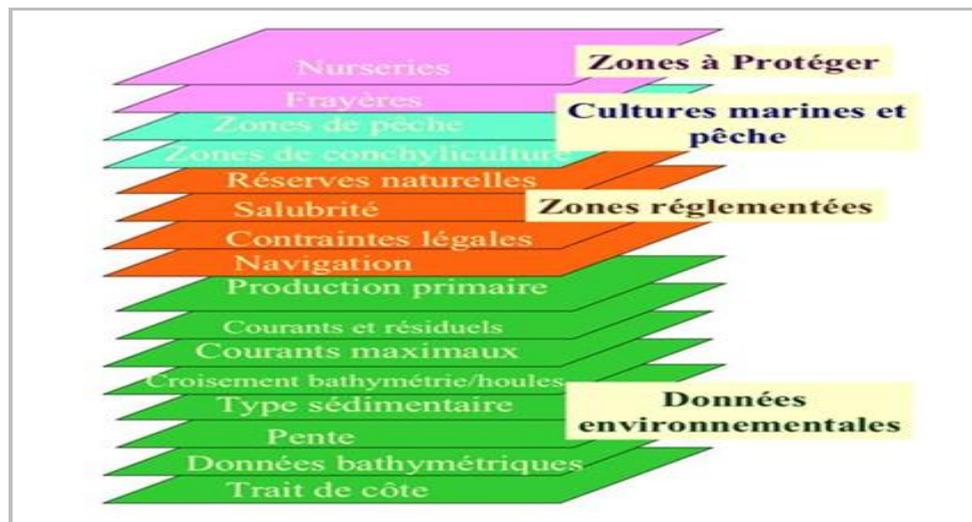


Fig. 5. Couches d'informations prises en compte pour la sélection sous SIG des zones potentielles en vue de la culture en eau profonde (Sillage, 1997)

#### 2.4.3. Notions de SGBD

Le Système de gestion de la BDG ; les SIG contiennent non seulement un SGBD traditionnel, mais aussi une variété d'outils capables de gérer à la fois les dimensions thématiques et spatiales de l'information.

A l'aide d'un SGBD, il est possible d'introduire des informations thématiques, sous forme de tables ou de statistiques et subséquemment pour extraire des éléments spécifiques sous les deux formes. Ce SGBD permet l'analyse du contenu thématique. Le produit final, la carte, sera certes spatiales, mais l'analyse elle-même n'a pas de caractéristique spatiale. Ainsi, la flèche bidirectionnelle qui lie le SGBD à la composante thématique de la base de données géographique (BDG) met en évidence ce caractère spatial de l'analyse.

#### 2.4.4. Objectifs du SGBD

- Indépendance physique,
- Accès aux données,
- Non redondance des données,
- Partage des données,
- Sécurité des données.

#### 2.4.5. Avantage du SGBD

- Meilleure prise en charge des données volumineuses,
- Exploitation de modèle de données complexes,
- Gestion des relations entre données géographiques et données attributives,
- Possible de disposer de "vues" lien fort avec logiciels SIG et fonctions spatiales.

#### 2.4.6. Langage SQL

Le *Structure Query Langage (SQL)* est un langage informatique normalisé servant à exploiter des bases de données relationnelles.

Le *SQL* est caractérisé de :

- Un langage de définition de données : Create, Drop Alter,
- Un langage de manipulation de données : Insert info, Update, Set...where. Delete,
- Un langage d'interrogation de données : Select...from ....where.

L'utilisation de la photogrammétrie (photographies aériennes ou d'images satellitaires) peut être une aide précieuse dans le maintien d'une base de données fiable et actualisée.

Le système d'analyse spatiale : l'analyse spatiale de l'information est une extension des capacités d'interrogation des bases de données traditionnelles, prenant en compte la localisation des observations.

Le système d'analyse spatiale a une liaison bidirectionnelle avec la BDG pour effectuer un traitement de type analytique. Ainsi, il prélève à la fois l'information de la BDG et la complète à l'aide des résultats de l'analyse. Les capacités analytiques d'un système d'analyse spatiale et du SGBD jouent un rôle essentiel dans l'extension de la base de données, à travers les connaissances sur les relations qui existent entre les objets.

Les techniques de traitement d'images telles que les procédures de classification permettent de transformer les données optiques de télédétection en une information au contenu thématique exploitable.

## 2.5. Organigramme des SIG

L'aspect informatique est représenté d'une part par l'équipement qui comprend en général une unité centrale de traitement et les périphériques (instruments de numérisation, unité d'affichage de haute qualité, unités de sortie telles que les imprimantes et les tables traçantes). Chakroun (2014) a montré que le logiciel SIG comprend cinq (5) modules suivants :

1. Module de saisie et vérification de données,
2. Module de stockage et de gestion de la base de données,
3. Module de sortie et de représentation des données,
4. Module de transformation des données,
5. Module d'interaction avec l'utilisateur.

L'organigramme d'un SIG repose sur quatre (4) principales parties réparties comme suit :

1. Documents cartographiques,
2. Télédétection spatiale,

3. Photographie aérienne,
4. Mesures sur le terrain.

L'organigramme repose sur les principales parties réparties comme suit :

Selon le thème de recherche, l'opérateur devra rassembler toutes les données dont il a besoin à partir des données optiques (images satellitaires), de photographies aériennes, de mesures sur le terrain, des données topographiques, cartographiques et statistiques. Les données peuvent être analogiques et / ou numériques.

Les données traitées ne sont pas toutes de même nature, tant du point de vue sémantique, que du point de vue géométrique. C'est ainsi que le contenu et le contenant ne sont pas les mêmes selon qu'il s'agisse d'objet appartenant au milieu naturel ou relevant du comportement humain. Mais dans les deux cas, c'est en fonction de l'objectif de l'étude et de la problématique qui y est associée, qu'il faut choisir les variables les plus utiles et les contenants associés selon le thème cartographié, l'échelle de la carte, le système de projection et la date de réalisation.

Certaines cartes sont simplement la transcription d'un tableau de chiffres (cartes statistiques).

Lorsque les données sont stockées en couches homogènes ou homogénéisées, le traitement consiste à extraire de la mémoire centrale, les fichiers ou les éléments qui intéressent la question posée par le décideur.

### **2.5.1. Logiciels SIG**

Les logiciels SIG sont conçus d'une manière à assurer leurs principales fonctions (acquisition, manipulation, création et la gestion de la donnée géographique, cartographie, ...etc. Parmi les logiciels SIG les plus populaires on peut citer celui du *Map Info*, *Qgis* et *ArcGis*. Le nombre de logiciels SIG existant sur le marché est important ; on les divise en logiciels libres, propriétaires à accès gratuits et propriétaires commerciaux (*ArcGIS*, *MapInfo*, *GeoConcept*, ...).

#### **2.5.1.1. Logiciels source libre (QGIS)**

Saga GIS (Logiciels source libre). Depuis 2001, Saga GIS est en continuel développement par le professeur Böhner et ses collègues en Allemagne. Ce logiciel peut être utilisé en ligne de commande ou à l'aide d'une interface graphique. Il s'agit d'une collection de modules permettant l'ouverture de différents types de fichiers reliés au SIG tout en offrant quelques capacités de traitement d'images. Il possède aussi une interface de programmation (API) permettant l'utilisation dans un logiciel externe (Dubois, 2009).

Le logiciel SIG open source Quantum GIS (<http://www.osgeo.org/qgis>) a été démarré en 2002. Parmi ses fonctionnalités, nous citons ceux qui suivent : Support de couches *PostGis/PostgreSQL* en lecture / écriture, *QGIS* permet d'interfacer GRASS et notamment d'accéder à différents modules

intéressants de GRASS, Possibilités d'import/export très larges, le *QGIS* possède un vrai moteur de scripts basé sur python.

Le *QGIS* peut utiliser une carte de base, obtenue sous tous les formats connus (raster, vectoriel, les données spatiales et les tables de données SGBD). Il permet de juxtaposer aux cartes de base, des couches selon une stratification fonctionnelle déduite ou saisie (Tamali, 2013). Le *QGIS* est un logiciel open-source spécialisé dans le traitement de l'information géographique et qui consiste à la numérisation des cartes (Faiza *et al.*, 2017).

### 2.5.1.2. Logiciel *ArcGIS*

Le logiciel *ArcGIS* est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine *Environmental Systems Research* (Esri). *ArcGIS* Desktop comprend une suite d'applications intégrées : *ArcMap*, *ArcCatalog* et *ArcToolbox*.

- a. *ArcCatalog* assure l'organisation et la gestion des données SIG ;
- b. *ArcMap* c'est l'application centrale d'*ArcGIS*, dont elle assure à la fois la visualisation et le traitement (analyse, édition, ...) des données dans la fenêtre « data view ». La mise en page des cartes est réalisée dans la fenêtre « layout view ». A noter qu'il existe l'*ArcGlobe*, qui est comparable à *ArcMap* mais permet une visualisation 3D de la donnée ;
- c. *ArcToolbox* « **boîte à outils** », c'est là où ils sont regroupés l'ensemble des outils de géotraitements. Il est disponible à trois niveaux progressifs de perfectionnement à savoir : *ArcView*, *ArcEditor*, *ArcInfo* (le niveau le plus complet et le plus sophistiqué).

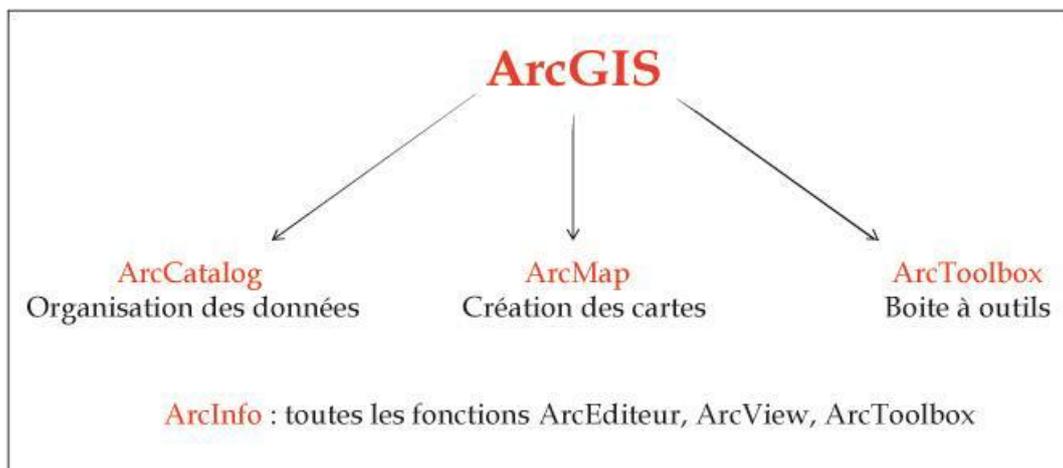


Fig. 6. Architecture générale de l'*ArcGIS*

A l'aide de ces trois applications, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données et le géo traitement,.....etc.



Fig. 7. Suite de produits *ArcGIS* d'*ESRI* (d'après Dubois, 2009).

## 2.6. Mode de représentation des données géographiques

Les objets spatiaux peuvent être définis par :

1. Leur position à la surface de la terre,
2. Les relations spatiales qu'ils entretiennent avec d'autres objets,
3. Leurs attributs (caractères descriptifs non graphiques).

Ces trois propriétés peuvent avoir lieu quelle que soit la structure de données adoptée dans le SIG. Comme les attributs d'un objet peuvent changer dans le temps sans qu'il y ait modification de la position ou de la forme de l'objet.

Deux (2) sources essentielles de données spatiales alimentent les SIG : les images numériques (ou raster) et les structures vectorielles cartographiques avec pour corollaire l'émergence de SIG dit raster ou vecteur (Balent *et al.*, 1991).

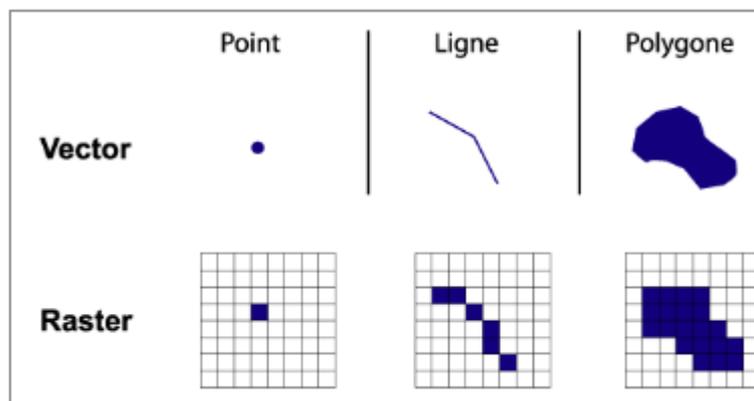


Fig. 8. Informations géographiques en mode objet et raster (d'après Lhomme, 2008).

### 2.6.1. Mode objet (structure vecteur)

Les données vectorielles sont un ensemble d'objets géographique représentés chacun par des primitives graphiques : le point, ligne, polygone (Kouba, 2018) et volumique.

D'après Laurencin (2008), il y a quatre types d'objets élémentaires suivants :

- a. Objets ponctuels : pour des éléments localisés dont la représentation détaillée est illisible aux échelles demandées (les phares sur des cartes à petite échelle) ou pour des informations symbolisées (les puits sur la commune, les équipements),
- b. Objets linéaires : ils serviront pour les différents réseaux de communication, d'énergie. Elle peut être fictive en représentant un trajet ou même virtuelle en modélisant des flux, monétaires ou d'information. Ces objets seront constitués de segments de droite et d'arcs géométriques.
- c. Objets surfaciques : ceux sont des polygones si le modèle du SIG est de type "spaghetti" ou des régions s'il est du type topologique. Un modèle topologique ne duplique pas les côtés communs à deux régions alors qu'un modèle "spaghetti" traite indépendamment chaque polygone. Elle matérialise une entité abstraite comme la surface d'une zone ou des entités ayant une existence géographique comme une mer, un lac, ...etc,
- d. Objets volumiques : des objets ayant une représentation dans les 3 dimensions sont aujourd'hui pris en compte dans certaines applications SIG visualisant et exploitant les notions d'altimétrie et de hauteur. Au-delà de l'information inscrite dans les coordonnées X, Y et Z de la forme décrivant l'objet, la 3<sup>ème</sup> dimension peut être une information attributaire dans la table de la forme de l'objet.

Les données vectorielles sont utilisées préférentiellement pour représenter des objets géographiques discrets et des localisations précises.

Les SIG de type vecteur permettent de représenter un objet de manière exacte que possible. Dans une représentation en mode objet, les limites ou les contours des objets sont décrits comme une séquence de points (ex : une roche isolée, un phare, une balise, une borne,), des lignes (ex : réseaux hydrographiques, voies de communications, une jetée, un quai,) ou des polygones (ex : zone de pêche, zone de pollution marine, zones humides...etc.).

### 2.6.2. Mode image (structure raster)

Les données Raster sont utilisées pour représenter des variables continues dans l'espace. Ces données fournissent l'information spatiale dans une grille (*Grid*) régulière, caractérisée par un certain nombre de lignes et de colonnes. Chaque cellule (*Cell* ou *pixel* en anglais) de cette grille possède une valeur représentant un attribut géographique particulier.

Une image matricielle est définie par une grille de points ou pixels auxquels on attribue une couleur. En fonction de la taille de l'image et du nombre de couleurs utilisées, le fichier

correspondant peut devenir important. En cas d'agrandissement, l'image se dégrade (la pixélisation devient visible).

Dans ce mode image, la description des objets et celles de leurs caractéristiques thématiques constituent des fichiers à structure unique. En fait, Les entités spatiales décrites ne sont pas à proprement parlé des objets spatiaux, mais des unités d'observation qui résultent de la subdivision de la zone d'étude en un maillage de cellules rectangulaires. Les informations de type raster sont issues de traitements élaborés d'images satellitaires (télédétection), de photographies numériques aériennes ou du processus de scannérisation de documents cartographiques. Une image raster prend la forme d'une matrice à deux dimensions où le pas de la maille (cellule) représente l'indicateur de résolution spatiale (ex. résolution = 20 m pour les images Spot HRV, 30 m pour les images Landsat TM et 10 m pour images Sentinel 2). Chaque cellule (pixel) est répertoriée en ligne et en colonne. Le mode raster reproduit de manière satisfaisante une variable à distribution continue (Caloz, 1990). Cette variable est en général numérique et entière. Chaque cellule contient une valeur numérique qui peut représenter soit un identificateur d'appartenance à un objet spatial, soit une catégorie, classe ou valeur thématique. Bien que l'information stockée dans cette structure en maille (raster) ne soit pas nécessairement visible dans le paysage. Elle est appelée image et les éléments qui la constituent (les cellules) sont appelés pixels. Pour visualiser ces images à l'écran ou sur support papier, les valeurs de leurs pixels sont simplement remplacées par les symboles graphiques tels que des couleurs, des tons de gris ou des textures.

La valeur numérique attribuée à chaque cellule dans l'image correspond à la valeur d'attribut (Kouba, 2018). Il y a deux types de données raster :

- a. Les images (ex. photo aérienne), l'information contenue dans la matrice de pixel concerne la couleur de représentation de l'information. Cette information n'est pas directement accessible.
- b. Les grilles (ou *grid*) utilisés pour le calcul et la modélisation de l'information contenue dans la matrice de pixel concerne une valeur quantitative (ex. altitude dans un Modèle Numérique de bathymétrie). Cette information peut être vue et modifiée dans la table attributaire.

### 2.6.3. Approches image ou objet

Les systèmes d'approche image gèrent de grandes quantités d'information (bien que des techniques efficaces de compression existent). Ils stockent l'information de toutes les cellules des images, quel que soit son intérêt. Par contre, l'avantage est que la zone d'étude est découpée de manière régulière et uniforme en unités d'observations arbitraires. De ce fait, ces systèmes sont plus performants que l'approche alternative objet ; pour des tâches d'analyse, et particulièrement pour l'analyse de distributions spatialement continues telles que l'altitude, la distribution de quantité de précipitation ou de biomasse. Le second avantage de la structure raster est sa similitude avec l'architecture interne des ordinateurs ; ainsi l'évaluation de problèmes faisant appel à la combinaison

mathématique de plusieurs grilles (images) est rapide. Cette approche est efficace pour l'application de modèles numériques environnementaux tels que l'aptitude à la gestion du fond topographique ou bathymétrique (fond marin). De plus, comme les données de télédétection ont cette structure raster, elles peuvent être directement traitées par un tel système.

Les systèmes en mode objet offrent une plus grande efficacité dans la gestion de cette information spatiale.

Ces derniers stockent l'information de manière compacte car ils ne retiennent que la description des contours des objets et non celle de leur intérieur. Comme la représentation cartographique des objets est directement liée à leurs contenus thématiques stockés dans la base de données, les systèmes vecteurs permettent d'interroger chaque objet spatial de manière interactive à l'écran en pointant dessus pour connaître ses caractéristiques spatiales et thématiques. Ils produisent des cartes thématiques simples à partir d'interrogations.

On voit que ces deux systèmes ont des points forts inhérents à leur manière de représenter et de gérer l'information spatiale.

#### **2.6.4. Conversion des données**

##### **2.6.4.1. Vectorisation**

La conversion de raster à vecteur (ou vectorisation) est beaucoup plus délicate, complexe et coûteuse. Il existe des algorithmes qui permettent de lisser les contours crénelés obtenus après vectorisation.

##### **2.6.4.2. Rastérisation**

La conversion de vecteur à raster (ou rastérisation) est très facile et fait appel à des algorithmes simples. Il en résulte une modification des contours des polygones qui peut conduire à une perte d'information.

### **2.7. Concepts généraux de base de données géographiques**

On observe qu'une base de données géographique ou données complètes sur une région d'étude, est organisée de façon comparable à un ensemble de cartes. Les systèmes en mode objet s'approchent encore plus de cette logique avec le concept de couvertures (couches) correspondant à un ensemble de cartes qui contiennent la description d'objets spatiaux et leurs tables d'attributs associés. Ces couvertures se différencient cependant des cartes de deux manières, d'abord parce qu'elles ne contiennent généralement qu'un seul type d'objets spatiaux (ex. courbes de niveau, courbes bathymétriques, voies d'accès, ...etc. Ensuite, parce qu'à chaque objet peut être associée une série d'attributs décrivant les différentes caractéristiques thématiques (ex. valeur d'altitude, valeur de profondeur, numéro de la voie, ...etc.).

Les systèmes en mode image utilisent eux aussi cette logique des cartes, mais subdivisent l'information en une série de couches. Chaque couche contient les variations spatiales d'un seul phénomène - une seule variable. Ainsi, on aura une couche (ex. occupation du sol, une autre pour le nom des catégories thématiques, leurs caractéristiques, ...etc.), (ex. fond marin, une autre pour la surface d'eau, et une autre pour sa qualité biologique, physico-chimique et environnementale). Dans certains cas, les systèmes raster peuvent associer une couche identifiant les objets spatiaux à une table d'attributs (chaque cellule aura la valeur correspondante à l'objet spatial auquel elle appartient). Habituellement, on a une couche par variable et la représentation cartographique fait appel à une combinaison de ces couches.

Au-delà des différences qui existent entre l'approche image par couches et celle objet par couverture, on retrouve une organisation de la base donnée en carte thématiques élémentaires.

Les structures en couches ou en couvertures se distinguent des cartes traditionnelles par un aspect important : lorsque des cartes sont codées numériquement (dans l'étape de numérisation), les différences d'échelle de projection sont éliminées et les données font référence à l'unité de terrain. Les couches peuvent être combinées aisément, sans problèmes pour l'impression sur papier. Le problème de la résolution de l'information reste cependant entier et de ce fait les résultats obtenus par un SIG sont sensibles aux erreurs et leurs combinaisons ainsi qu'à la précision de l'information dans chaque couche.

## **2.8. Mode d'acquisition des données géographiques**

L'opération d'acquisition des données consiste à réunir les différentes sources d'information aux fins d'intégration dans un environnement SIG. Parmi les méthodes d'acquisition nous citons ceux qui suivent :

### **2.8.1. Import des fichiers**

Kouba (2018), définit qu'il y a généralement trois manières pour importer les données spatiales lesquelles sont énumérées comme suit :

- a. Importer une base de données arrangée dans un format interne à un SIG,
- b. Importer un fichier texte (txt) contenant tous les renseignements structurés de manière primitive,
- c. Passer par une des normes d'échange disponible sur le marché. Ce troisième moyen est le plus économique à long terme.

### **2.8.2. Levés topographiques**

Prise de mesure de distances et d'angles sur le terrain à l'aide des appareils topographiques (ex. théodolite, ...etc.). L'outil GPS permet le calcul à l'aide des satellites la position géographique de l'objet (coordonnées avec une précision de quelques centimètres voire même quelques millimètres).

### **2.8.3. Photos aériennes**

Les clichés photographiques obtenus après leur fusion nous permettent de déterminer les coordonnées et l'altimétrie des points présents sur la photographie aérienne.

### **2.8.4. Images satellitaires**

Les données résultantes des traitements d'images satellitaires (correction, segmentation et classification automatique) peuvent être intégrées dans un environnement SIG.

### **2.8.5. Scannage des documents cartographiques**

Convient parfaitement à la représentation raster. Ce mode de saisie est rapide et peu coûteux. Si la donnée est scannée et géo référencée c'est de la donnée « raster ». Le seul problème de cette méthode est la réécriture des erreurs dues au support d'origine.

### **2.8.6. Géoréférencement des documents cartographiques**

- a. Le géo-référencement consiste en l'attribution de coordonnées X et Y (notées en Degré Minutes Secondes (DMS) "dd mm ss.ss", DD "dd.dd" ou en coordonnées projetées (mmmm.mm) qui correspondent au point sélectionné sur le support pris comme base, deux procédures peuvent être suivies. Par l'image raster saisies manuellement (ex., les graticules - latitude et longitude).
- b. Relativement à des données déjà géo-référencées. Il peut s'agir de données vecteur ou raster où figurent les mêmes objets / entités que sur le support à géo-référencer et dans le même système de projection. Dans ce cas, vous pouvez renseigner les coordonnées en cliquant sur les données de référence chargées dans la carte principale du logiciel SIG.

La procédure standard pour le géoréférencement d'une image implique la sélection de plusieurs points sur le raster, en spécifiant leurs coordonnées et en choisissant la transformation appropriée. En se basant sur les paramètres et les données, l'extension calculera les paramètres du fichier "world" (Espace de référence). Plus il y a de coordonnées fournies, meilleurs seront les résultats (Tamali, 2013). Dans un SIG, tous les fichiers d'information spatiale doivent être géo référencés. Le géo référencement est la définition du lien qui existe entre une couche et sa position à la terre définie par un système de coordonnées de référence. Pour des images, dans un système raster, le géo référencement s'effectue habituellement en définissant le système de référence (ex. Latitude/longitude), l'unité de référence (ex. degrés, minute et seconde) et les coordonnées des quatre coins bien répartis sur l'image. Il en est de même pour les fichiers à structure vecteur, avec la précision que les quatre coins font référence au rectangle inscrivant tous les objets de la couverture

(appelé aussi zone rectangulaire de saisie). Cette zone de saisie est habituellement commune à toutes les couvertures et correspond à la région d'étude.

L'information sur la géo référencement est vitale dans le cadre d'un SIG intégré car il garantit l'intégration et le passage d'une information d'un mode à l'autre de façon cohérente. Elle est aussi importante pour établir la relation entre les données et leur localisation sur le terrain.

Les outils les plus fondamentaux d'un SIG sont certainement ceux qui permettent l'interrogation de la base de données géographiques. Cela consiste à récupérer une information déjà existante. L'interrogation peut se faire sur des critères spatiaux ou sur des critères thématiques (ex. Quel est la nature du relief du fond marin à cet endroit ?), (ex. Quelles zones ont les plus grands potentiels halieutiques ?). (Ex. Quel est le type de sol sous ce peuplement de résineux ?). Ces critères d'interrogation peuvent être simples comme dans les exemples précédents ou alors composés de conditions plus complexes (ex. Quelles sont les zones riches dont la superficie est supérieure à un hectare et qui sont adjacentes aux zones côtières ?).

### **2.8.7. Numérisation et création des couches d'informations**

La digitalisation est adaptée à la représentation vectorielle. Cette technique assure la préservation des informations présentées dans le document de base. Un traitement préalable sur les documents de base peut s'avérer nécessaire si ceux-ci sont trop chargés.

## **2.9. Outils d'analyse thématique**

Le deuxième type d'outils est celui qui permet de combiner des couches d'information avec des opérateurs mathématique.

Opérateur de distance ; est un groupe d'outils constitué par les opérateurs de distance. C'est l'ensemble des techniques capables d'intégrer la notion de distance dans l'analyse de l'information. Opérateurs contextuels ; à l'aide de ces opérateurs contextuels on crée une nouvelle couche d'information sur la base d'une couche existante et du contexte spatiale de chacune des unités d'observation (cellule) ou chacun des objets spatiaux.

### **2.9.1. Démarches d'analyse**

L'interrogation de la BDG consiste simplement à sélectionner différentes combinaisons de variables et de zones pour examen.

Dans la plupart des systèmes, les opérations d'interrogation sont réalisées en deux étapes. La première appelée classification, consiste à constituer une nouvelle couche d'information pour chacune des conditions de la requête. Par exemple, si on recherche les zones géographiques (parcelle agricole, forestière ou de pêche) situées sur des fonds topographiques ou bathymétriques accessibles, il faudra dans un premier temps créer une couche des zones riches en reclassant tous les milieux en deux catégories, en assignant 1 à la zone riche et 0 aux autres. La couche résultante est

appelée couche booléenne, car elle ne retient que les zones qui satisfont au critère mentionné (1 = vrai ou zones riches) et assigne les autres à 0 (0 = faux nulles ou dangereuses).

Ces couches booléennes sont aussi appelées couches logiques ou couches binaires. Ce dernier terme est à éviter car il décrit aussi une forme de stockage particulière de l'information (format binaire) ; on conservera le terme booléen. Une fois la couche des zones riches et celles pauvres ou dangereuses réalisées, il est possible de les combiner en utilisant l'opération de superposition.

La superposition est un des points forts des SIG dans la mesure où ils sont les seuls à permettre la combinaison de deux informations à caractère spatial. Cette combinaison fait appel à des opérateurs logiques ou mathématiques appliqués sur deux ou plusieurs couches, dans le cas d'interrogation respectivement l'intersection et la réunion de deux conditions. Dans l'exemple abordé ici, nous nous sommes intéressés aux zones qui sont à la fois riches et situées sur fonds accessibles, c'est-à-dire l'intersection logique des deux couches booléennes.

## **2.10. Notions de bases topographiques**

### **2.10.1. Angles verticaux et horizontaux**

Du grec « topos » : lieu, endroit et « graphein » : écrire, tracer, dessiner. La topographie est une technique qui a pour objet la représentation graphique sur plan des caractéristiques des terrains (Calsat, 1993), et plus précisément, l'exécution et l'exploitation des observations concernant la position (planimétrique et altimétrique), la forme, les dimensions, et l'identification des éléments concrets fixes et durables existant à la surface du plan à un moment donné (George, 1993). De manière générale, la topographie a pour objet l'établissement et l'emploi de cartes (Calsat, 1993). On distingue alors la topographie à petite échelle (géodésie et cartographie) et de la topographie à grande échelle (plans, documents d'étude, parcellaire).

### **2.10.2. Modes opératoires en milieu marin**

Le vrai nord ou Nord Vrai (NV) est un terme de navigation se référant à la direction du pôle Nord géographique par rapport à la position du navigateur. Le vrai Nord est comparé au pôle Nord magnétique et la grille nord qui est la direction vers le nord le long des lignes d'une projection cartographique. Pour plus de précision, nous rappelons les angles utilisés dans la navigation.

Le Nord Compas (NC), c'est l'indication du nord par le compas magnétique.



Fig. 9. Exemple de compas de route embarqué sur les bateaux de navigation.

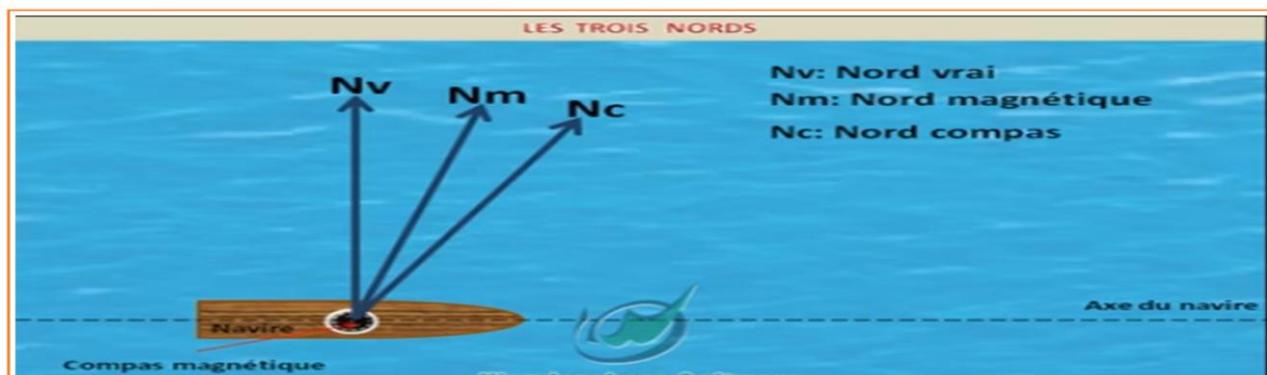


Fig. 10. Angles du Nord

L'azimute est l'angle formé entre le NM et la direction visée d'un objet.

L'azimute géographique est l'angle entre la direction d'un point avec la direction du NG.

L'azimute magnétique est l'angle formé par la direction du point (A) sur le NM donné par la boussole.

Le Cap d'un mobile est la direction vers laquelle il est orienté (ou dans le cas d'un navire, la direction où pointe son étrave). C'est l'angle exprimé en degrés (de 0 à 360°), dans le sens des aiguilles d'une montre, entre sa ligne de foi (son axe longitudinal) et le nord. Cet angle se mesure à l'aide d'une boussole, d'un compas magnétique ou gyroscopique.

Le cap ne doit pas être confondu avec la route suivie, qui diffère du Cap en raison des influences du vent et/ou du courant (la dérive, voir vent relatif).

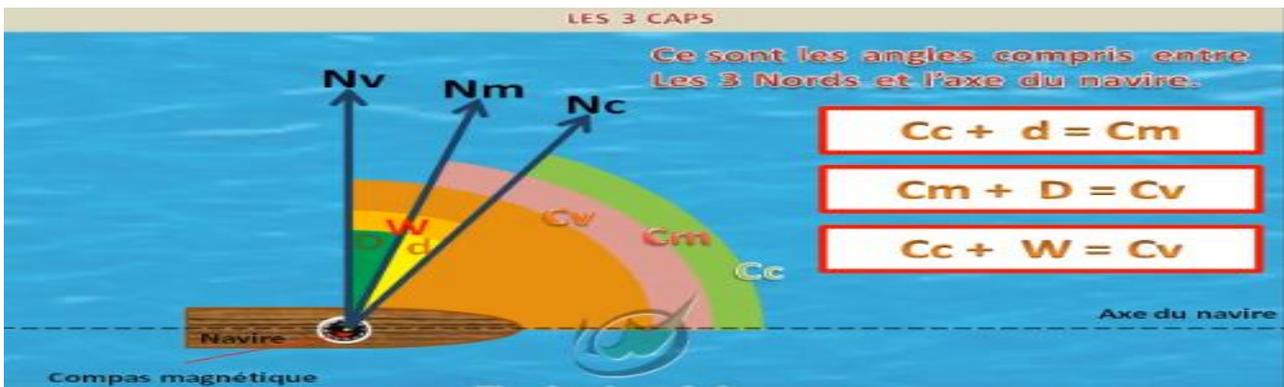


Fig. 11. Angles des trois Caps

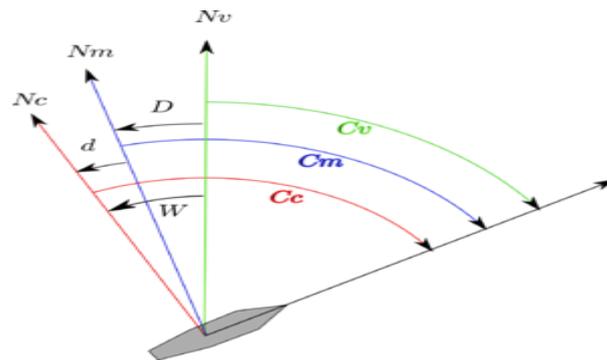


Fig. 12. Angles de base employés par les navigateurs

$$Cv = Cc + (D + d)$$

D et d + vers l'est, - vers l'ouest

On distingue :

Le Cap compas (Cc) : c'est le cap indiqué par le compas, c'est-à-dire l'angle entre le Nord du Compas (NC) et la ligne de foi.

Le Cap Magnétique (CM) : c'est l'angle entre le NM et la ligne de foi, une fois corrigé de la déviation (du défaut du compas magnétique inhérent à lui-même et à son environnement). Cette différence angulaire entre le NC et le NM est appelée déviation ( $\delta$  ou encore d). La déviation (propre à chaque compas et à son emplacement à bord en raison de l'influence des masses magnétiques du bateau et de son chargement) varie en fonction du Cap et se mesure en faisant route sur des alignements connus. Elle est minimisée par une opération appelée compensation et mesurée par une autre opération appelée régulation. La compensation est une affaire de spécialistes qui utilisent pour le faire des sphères de fers doux et des aimants permanents.

Le Cap vrai (Cv) : c'est l'angle entre le nord géographique (ou nord vrai) (Nv) et la ligne de foi. La différence angulaire entre le nord vrai et le nord magnétique est appelée déclinaison (D). Le nord magnétique est la direction du pôle nord magnétique qui, se déplace dans le temps plus ou moins autour du pôle nord géographique. Les cartes marines, quel que soit le type de leur projection,

indiquent toujours le nord géographique ainsi que la déclinaison locale à une date donnée, accompagnée de sa variation annuelle (en sens et en valeur). Il existe des zones où les compas magnétiques sont fortement déviés par les masses géologiques environnantes, ces variations locales sont également indiquées sur les cartes.

L'utilisation de compas gyroscopiques permet de s'affranchir des difficultés dues au magnétisme terrestre. Les compas gyroscopiques ne donnent pas en permanence la direction du nord vrai, donc le cap vrai du mobile. La différence angulaire entre le cap vrai ( $C_v$ ) et le cap compas gyroscopique ( $C_g$ ) est appelée variation gyro ( $W_g$ ). Cette variation se mesure (ou se vérifie) régulièrement en visant des astres connus au lever ou au coucher, et en navigation côtière en relevant des alignements connus. Cette variation gyro reste relativement faible ( $\pm 2^\circ$  d'une manière générale).

Pour résumer, on a donc les relations algébriques suivantes :

- ✓  $C_v = C_c + W$  dans le cas d'un compas magnétique avec  $W = D + \delta$
- ✓  $C_v = C_g + W_g$  dans le cas d'un compas gyroscopique.

Les corrections  $W$ ,  $D$  et  $\delta$  se mesurent toujours négativement vers l'ouest et positivement vers l'est (sens trigonométrique inverse, ou sens des aiguilles d'une montre). La plupart des montres (comprenant l'option boussole) affiche le nord magnétique ainsi il convient de prendre en compte la déclinaison ( $D$ ) pour en déduire la distance angulaire entre le nord vrai et le nord magnétique, ainsi que la déviation ( $d$ ) modification faussant la mesure causée par des masses magnétiques (chargement du bateau par exemple.).

Exemple de lecture d'angle (utilisation de la règle Cras)

- a. Poser la règle à l'endroit : vérifier que vous pouvez lire les inscriptions imprimées sur la règle,
- b. Diriger la flèche dans le sens de la route suivi ou vers le point à relever dont on veut connaître la direction ; on fait tangenter le bord de la règle Cras le long de cette direction,
- c. Placer le centre du demi rapporteur le plus bas sur la règle (ie le plus au sud) sur un méridien ou un parallèle, en faisant glisser la règle Cras le long de la direction à mesurer.
- d. Lire la graduation directe que coupe le méridien ou le parallèle choisi ; attention à bien lire sur le demi rapporteur dont vous avez placé le centre et non sur l'autre.

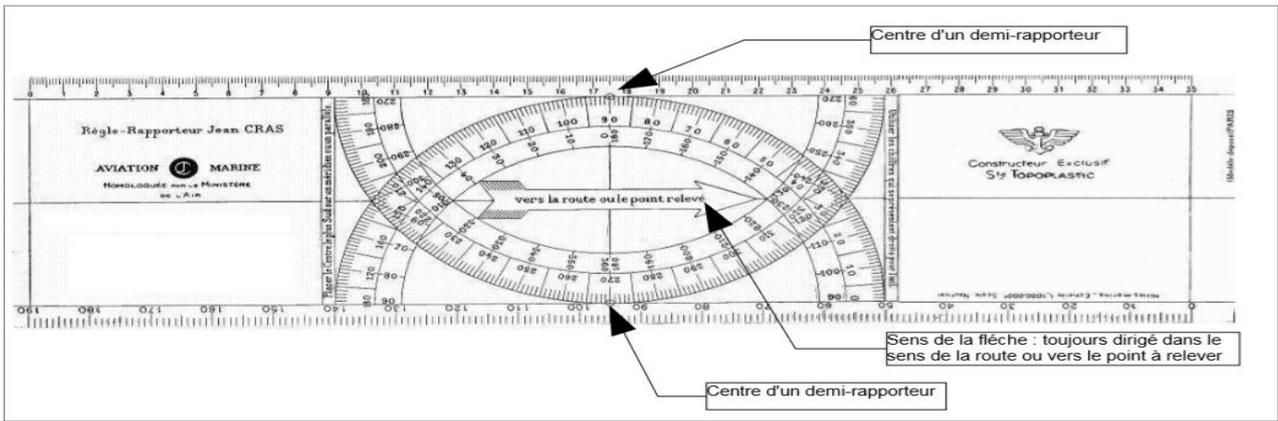


Fig. 13. Règle Cras

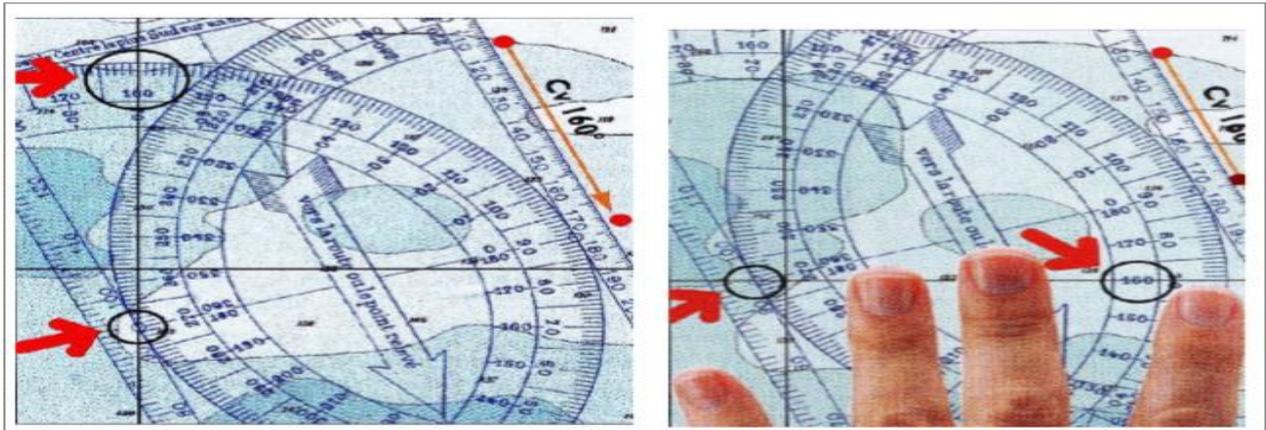


Fig. 14. Lecture d'angle sur un méridien (gauche) sur un parallèle (droite)

Déclinaison magnétique

L'angle entre la direction du NM et la direction du NG est appelé déclinaison magnétique. Elle n'est donc pas constante dans le temps (le nord magnétique se déplaçant) et dépend du lieu où la mesure est effectuée. Pour être utilisées sans erreurs, les valeurs de déclinaison indiquées sur les cartes doivent être actualisées afin de tenir compte de la variation séculaire (période).

Exemple sur les cartes topographiques les cartographes mentionnent la déclinaison magnétique diminue chaque année de 15 mn Centésimales.

Unités des angles

Unités centésimales ; c'est le grade :  $Gr = 100'$

$$1' C = 100''$$

Unités sexagésimales ; c'est les degrés :  $1^\circ = 60' s = 0^\circ 60'$

$$0^\circ 1' = 0^\circ 60''$$

$$0^\circ 1' = 100/100 \text{ de la seconde sexagésimale.}$$

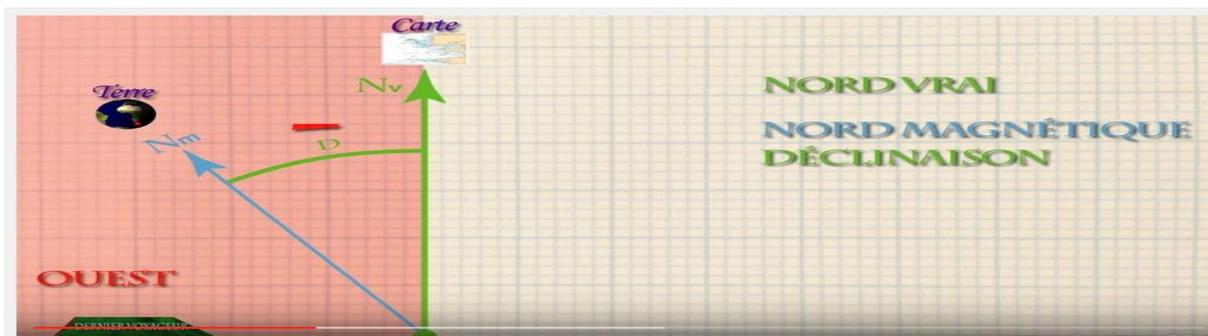


Fig. 15. Déclinaison négative (quand NM est à l'ouest (par rapport au méridien) du nord vrai (NV))

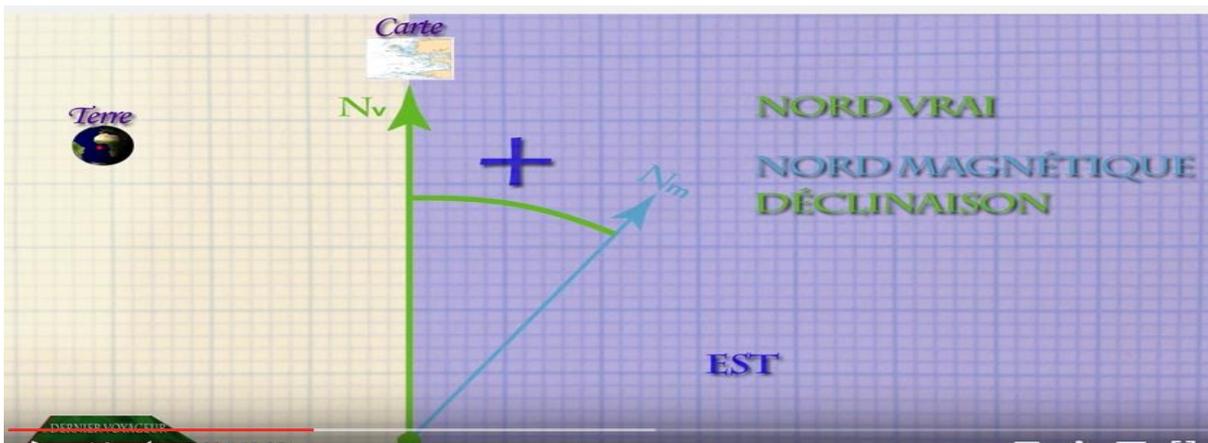


Fig. 16. Déclinaison positive (quand le NM est à l'Est (par rapport au méridien) du nord vrai (NV))



Fig. 17. Variation des angles de déviation à l'Ouest

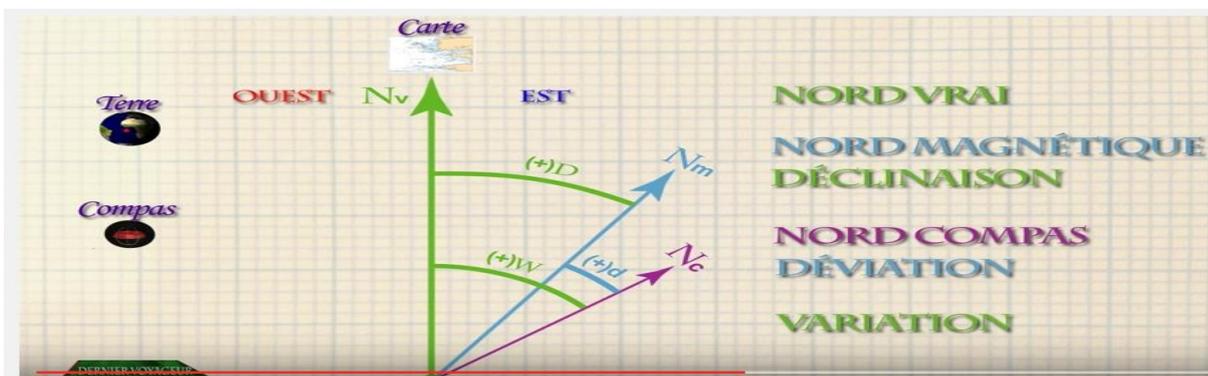


Fig. 18. Variation des angles de déviation à l'Est

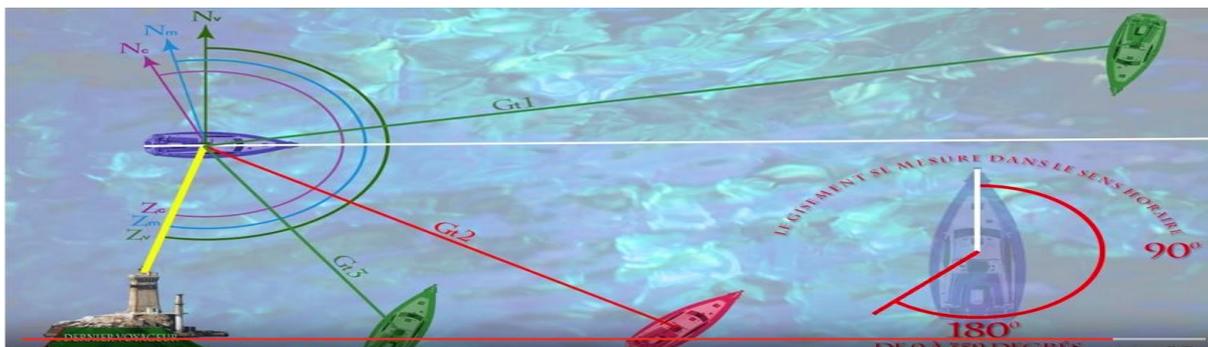


Fig. 19. Angle de gisement relevé à partir d'un bateau

Il se mesure dans le sens horaire (c'est pour éviter le risque de collision avec un autre bateau)

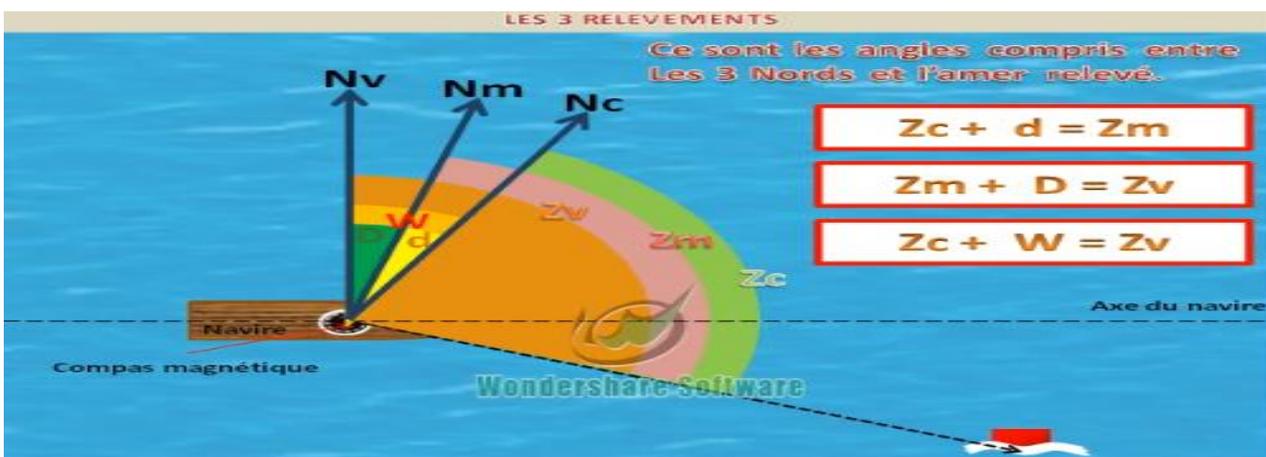


Fig. 20. Angles des 3 relèvements

Le gisement est l'angle qui est fait avec un système.

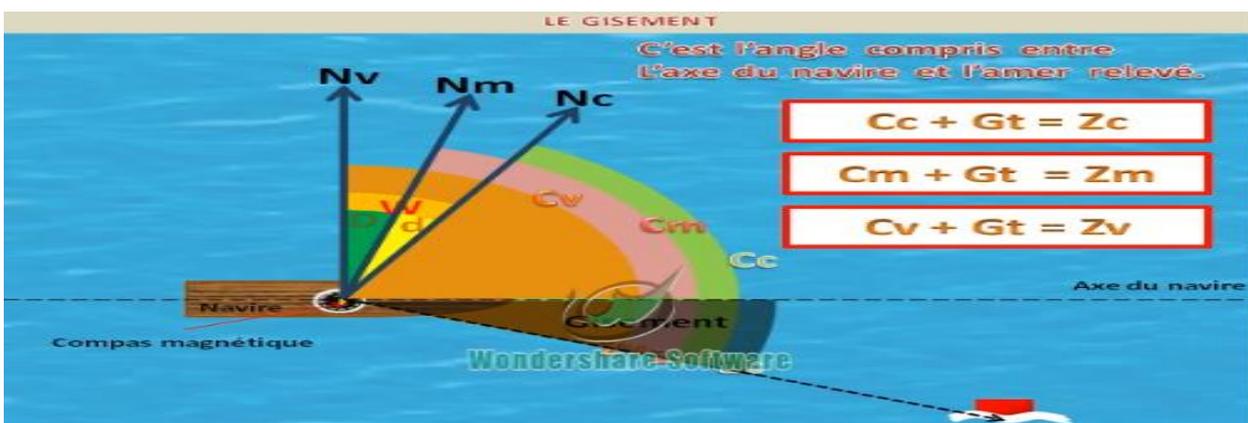


Fig. 21. Angle de gisement



système géodésique ; est un système de référence permettant d'exprimer les positions au voisinage de la Terre.

Le système cartographique en Afrique est basé sur l'ellipsoïde de Clarke 1880 (recommandé à la conférence de Bukavu en 1953). Les cartes sahariennes sont établies sur un canevas astronomique.

Le système de coordonnées qui répond à ces conditions est le système géodésique Nord-Sahara.

Le système de référence géodésique utilisé en Algérie est donc le Nord Sahara 1959 basé sur l'ellipsoïde de Clarke 1880 Anglais ( $a = 6378249.145$  m,  $b=6356514.870$  m,  $e = 0.082483400$ ).

## **2.12. Notions de bases cartographiques**

Les géodésiens effectuaient les observations détaillées et les calculs qui définissaient la forme fondamentale de la Terre et celles des pays. À partir de ces informations, les topographes mesuraient les détails au sol ou des photogrammètres analysaient des photographies aériennes ou images satellitaires. Ces mesures permettaient aux cartographes d'établir des cartes alliant une grande élégance graphique à une présentation efficace. Chacun trouvait ensuite lui-même dans la carte ce qu'il cherchait.

La cartographie désigne la réalisation et l'étude des cartes géographiques. Le principe majeur de la cartographie est la représentation des données sur un support réduit représentant un espace généralement réel. La cartographie ; c'est l'ensemble des études et opérations scientifiques et techniques intervenant à partir d'observations directes ou de l'exploitation d'un document en vue d'élaborer des cartes, plans et autres moyens d'expression. La cartographie proprement dite est l'art d'élaborer, de dessiner les cartes, et ne doit pas être confondue avec la topographie.

La cartographie numérique est un outil puissant pour illustrer des projets, présenter des hypothèses, communiquer et informer.

La représentation d'événement à travers la cartographie permet une visualisation d'ensemble circonstancielle et donne des informations rapidement interprétables. Une carte ou une feuille est désignée par ses coordonnées dans son système adapté.

Exemple de carte topographique terrestre ; on attribue un numéro de 1 à n à chaque coupure de carte en effectuant une numérotation de l'ouest à l'Est et du nord au sud (ex. feuille n° 200 (B-10, c-24) c.-à-d. n° de la feuille c'est 200, (B-10, c-24) c'est la référence d'emplacement sur la carte mondiale.

### **2.12.1. Systèmes de projections cartographiques**

Pour passer de la représentation en 3D de la terre (globe terrestre) à une représentation en 2D (la carte), on utilise des projections de différents types. Dans les projections cartographiques les plus simples, la terre est projetée sur un plan, un cylindre ou un cône. Une fois la projection réalisée, le cône et le cylindre sont développés et mis à plat. Néanmoins toute projection génère de manière

inévitables des distorsions. Le type de projection est donc choisi en fonction de ses qualités géométriques et de la future utilisation de la carte (Charbonnel, 2005).

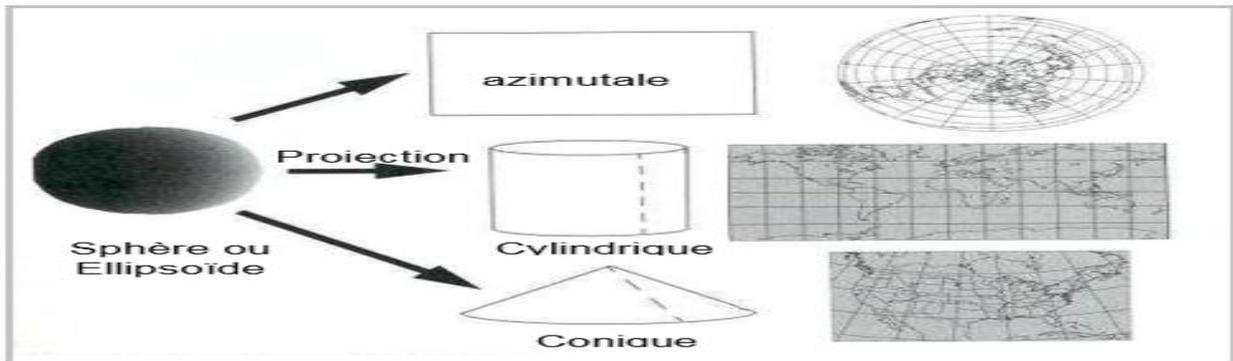


Fig. 24. Différents types de projection (d'après Charbonnel, 2005).

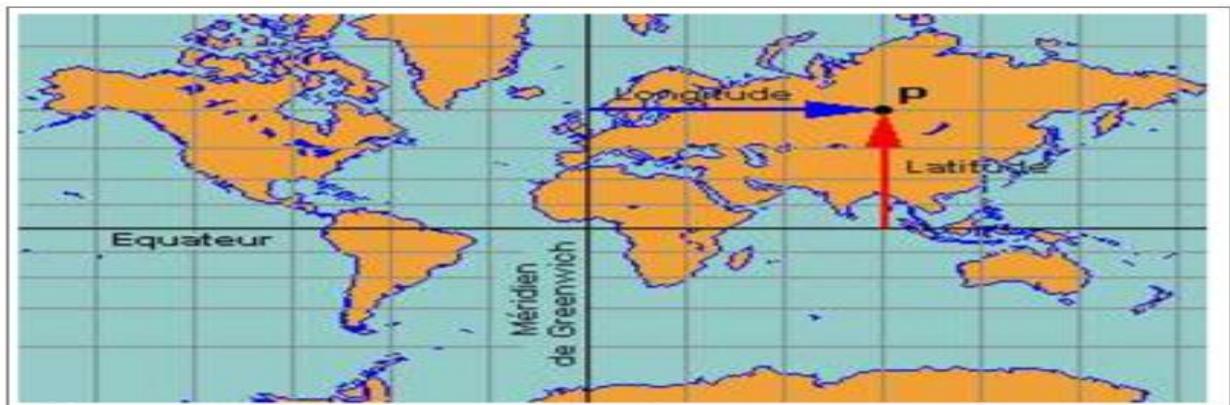


Fig. 25. Coordonnées (sur la carte) (d'après Charbonnel, 2005).

La position d'un mobile sur le globe terrestre est repérée par un système de coordonnées en latitude ( $\phi$ ) et longitude ( $G$ ).

Ligne des pôles : ligne qui matérialise l'axe de rotation de la terre ; c'est la ligne qui passe par le pôle Nord et le pôle Sud.

Equateur ; grand cercle perpendiculaire à la ligne des pôles et partageant le globe en deux hémisphères égaux.

Méridien ; demi-cercle joignant le pôle Nord et le pôle Sud.

Parrallèle; petit cercle parallèle à l'équateur.

Latitude ; angle que fait la verticale d'un point de la surface terrestre avec le plan de l'équateur, compté de 0 à 90° vers le Nord ou le Sud.

Longitude ; angle dièdre formé par le plan méridien d'un lieu avec le plan méridien de Greenwich, compté généralement de 0 à 180 degrés Est ou Ouest.

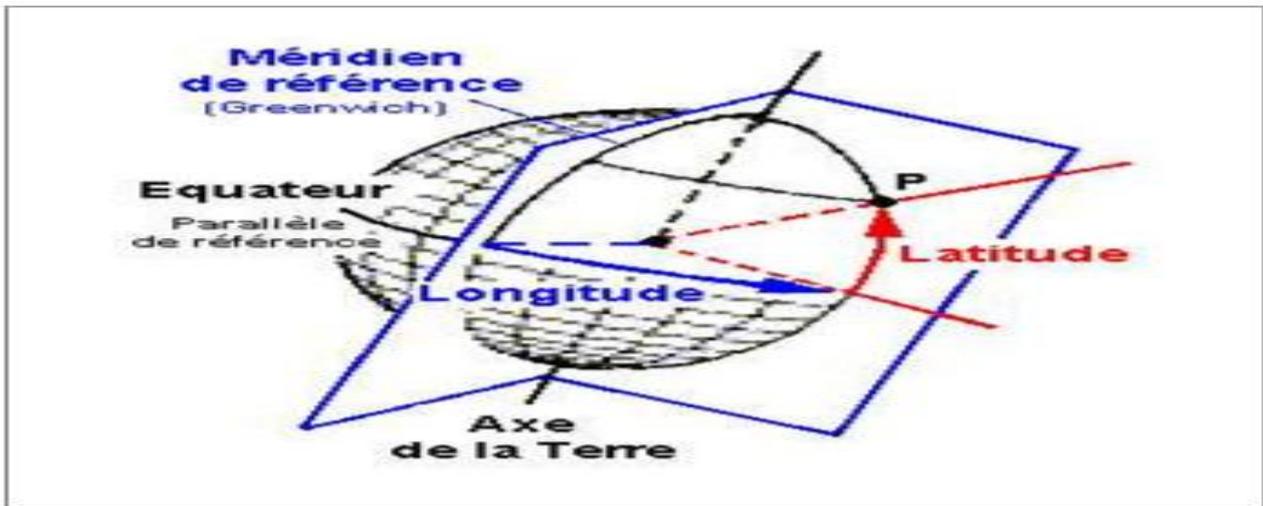


Fig. 26. Coordonnées (sur le globe terrestre) (d'après Charbonnel, 2005).

La majorité des cartes marines aux basses latitudes (c'est à dire à nos latitudes) est réalisée à partir de la projection de Mercator: la projection de Mercator correspond à une projection du globe terrestre sur un cylindre tangent à l'équateur et que l'on déroulerait pour obtenir la carte (Charbonnel, 2005). Dans ce type de projection :

- a. Les méridiens apparaissent parallèles (verticaux) entre eux (ce qui n'est pas le cas dans la réalité), l'échelle des longitudes ne doit donc pas être utilisée pour des mesures de distances.
- b. Les parallèles apparaissent parallèles (horizontaux) entre eux (comme dans la réalité) mais avec des espacements variables : la minute de latitude (un mille marins soit 1,852m) est d'autant plus grande que l'on s'approche des pôles. On utilisera l'échelle des latitudes pour la détermination des distances.
- c. Les angles sont conservés.

La projection cartographique est un ensemble de techniques géodésiques permettant de représenter la surface de la Terre dans son ensemble ou en partie sur la surface plane d'une carte. C'est une transformation mathématique faisant correspondre un point de l'ellipsoïde à un point d'un plan : représentation de l'ellipsoïde sur un plan.



Fig. 27. Projection cylindrique conforme Mercator direct

Les représentations dites *Universel Transverse Mercator* (U.T.M.) forment un ensemble de 120 représentations transverses de Mercator de l'ellipsoïde conçues par l'armée américaine dans les années 1940. Le système UTM est le système de représentations utilisé par l'OTAN, et, entre autres, par l'armée française en France métropolitaine. C'est pourquoi le canevas UTM apparaît en surcharge sur les cartes de base à 1 /50 000. L'UTM est une projection Mercator transverse de l'ellipsoïde développée par le service géographique de l'US Armée dans le but de fournir une projection unique utilisable en tout point du globe à partir de « tables de la représentation UTM » préalablement calculées pour chaque ellipsoïde.

En pratique ; il faut toujours mentionner la projection utilisée.

Exemple en Algérie :

- L'Algérie s'étend sur les fuseaux 30, 31 et 32. Exemple la localité de Mostaganem est située dans la zone géographique n°31.
- La carte topographique de l'Algérie établie avec l'échelle 1/25 000 est dressée avec une projection conforme cylindrique (*Mercator Transverse Universel "MTU" 1880*). La projection *MTU* a été réalisée à 80° Nord et 80° Sud, c'est une projection conforme cylindrique.
- La carte topographique de l'Algérie établie avec l'échelle 1/50 000 est dressée avec une projection conique Lambert Nord Algérie.

Le système d'origine spatial, est défini par le traitement de mesures de géodésie spatiale suivant une méthode dynamique en considérant le champ de pesanteur terrestre.

Le *World Geodetic System* (WGS) 1984, est développé par le DOD-US. Depuis WGS 60, l'approximation de la figure de la terre et de son champ de gravité a évolué pour aboutir à la définition actuelle du WGS 84 qui est le système de référence pour les éphémérides GPS

radiodiffusées et précises. Ce système est une version améliorée du WGS 72 qu'il doit remplacer dans toutes les applications.

Le WGS 84, est employée par défaut dans tous les matériels courants de positionnement.

Les systèmes issus de mesures spatiales, de par la nature même du mouvement des satellites, fournissent des coordonnées dans un repère centré précisément au centre de gravité de la Terre. En outre, la géodésie spatiale permet d'obtenir les coordonnées dans l'espace (X, Y, Z) ou (i,j,h). De tels réseaux déterminés par mesures spatiales sont dits tridimensionnels.

Les systèmes de coordonnées ; toute carte topographique présente les informations sur les différents systèmes de coordonnées, qui permettent de définir la position d'un point. La localisation exacte des objets topographiques dans l'espace se fait à l'aide de ces coordonnées.

### 2.12.2. Systèmes de coordonnées cartographiques

Les coordonnées d'un point peuvent être exprimées de différentes façons :

Les coordonnées géographiques (sur la terre) ce sont des valeurs angulaires (latitude et longitude) exprimées en degrés, minutes, secondes et se rapportent au méridien de Greenwich ainsi qu'à l'équateur. Elles sont définies à partir d'un ellipsoïde de référence,

Les coordonnées cartésiennes ou coordonnées du plan (sur plan) ou représentation cartographique plane sont exprimées dans un référentiel géocentrique (valeurs métriques).

Généralement, les coordonnées géocentriques ne servent que d'étapes de calcul pour les changements de système géodésique.

Pour résumer ; plusieurs surfaces sont accessibles au topographe pour déterminer les coordonnées d'un point, qui peuvent être exprimées de façon différente selon le type d'application. Le lien entre le type de coordonnées et la surface de référence est primordial. Connaître ces deux éléments constitue une obligation pour exploiter la localisation des points.

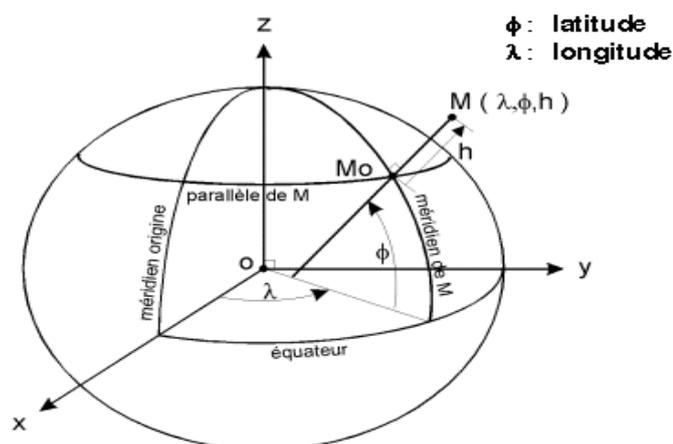


Fig. 28. Coordonnées d'un point M

Pour pouvoir confectionner une carte ou un plan à partir des données mesurées, on calcule une projection mathématique. Les projections Mercator introduisit les premières projections sur globe et par ainsi les corrections de courbure de la terre sur les plans.

Couture en 1994 définit la carte comme étant une représentation plane d'une partie ou de l'ensemble de la terre ou d'un corps céleste. Les cartes sont des représentations du monde et de l'espace. Utilisée par le géographe, la carte lui permet de situer son objet d'étude et de le représenter (Le Clech, 2017).

La première question que doit se poser le cartographe ou le topographe est la suivante : quelles sont les informations que l'on souhaite obtenir du terrain ?

Ceci doit permettre de définir le plus petit objet qui devra être visible sur la carte ou le plan, conditionnant ainsi l'échelle du document. On en détermine ainsi la teneur en information.

### **2.13. Orientation et direction de la carte**

Il s'agit d'effectuer une correspondance entre le lieu où l'on se trouve et un point sur la carte. Cette démarche est nécessaire pour se rendre en un point repéré sur la carte, retrouver son chemin, sa direction ou identifier les éléments caractéristiques du milieu.

Orienter la carte en direction du Nord ; cela revient à faire coïncider la direction du Nord de la carte avec la direction du Nord sur le terrain. Sur une carte on distingue deux Nord :

- a. Nord Géographique (NG) ; il correspond à la direction des méridiens,
- b. Nord Magnétique (NM) ; il correspond à la direction donnée par la boussole.

Ce dernier est légèrement différent du NG, l'écart entre les deux s'appelle la déclinaison magnétique dont la valeur peut figurer (graphiquement) en marge de la carte topographique.

#### **2.13.1. Orienter la carte avec une boussole**

Pour orienter approximativement la carte, on peut simplement aligner l'aiguille de la boussole avec le bord de la carte. Pour une meilleure précision, il faut alors superposer la boussole avec le schéma de la déclinaison magnétique et faire pivoter l'ensemble jusqu'à coïncidence de l'aiguille Nord de la boussole avec le NM du schéma.

#### **2.13.2. Orienter la carte sans boussole**

On peut trouver approximativement le Nord (sans boussole). Pendant le jour avec une montre, en orientant la petite aiguille de la montre vers le soleil, le sud sera repéré par la bissectrice de l'angle formé par la petite aiguille et par la direction de 13 h 00 en hiver et de 14 h00 en été. Le nord est donc l'opposé du sud. Si la montre ne possède pas d'aiguille, il vous suffit de dessiner un cadran et des aiguilles sur une feuille de papier. Pendant le soir (nuit) à l'aide de l'étoile polaire, l'étoile

polaire ne s'écarte pas plus de 1 degré de la direction du pôle nord, et sa position par rapport à la constellation de la grande Ourse est facilement reconnaissable la nuit, lorsque le temps est clair. En reportant 5 fois la distance entre les deux étoiles a et b de la grande Ourse, vous trouverez l'étoile polaire.

Le Nord est l'un des quatre points cardinaux. Si l'on considère le globe terrestre comme une sphère de centre O, le nord est l'une des deux extrémités de l'axe de rotation de la terre, l'autre étant le sud. Ce sont les pôles géographiques.

Le NG ; la direction du Nord géographique c'est la direction du pôle nord à partir d'un point donné ; du moment que le pôle nord est un point fixe, cette direction ne change pas. Le NG c'est la direction vers le pôle nord. (Y ou NG : Nord linéaire. Y : c'est le nord qui est donné par le cartographe à sa carte.)

Le NM ; est une direction qui est donnée par l'aiguille de la boussole sous l'influence de la masse magnétique qui existe au sein de la terre qui est attirée par le pôle (aimant) qui attire cette aiguille de la boussole. Cette direction qui est donnée par la boussole s'appelle le Nord magnétique (NM).

Le NM change dans le temps et dans l'espace à cause du mouvement ou de la rotation de la terre ainsi que plusieurs facteurs atmosphériques.

## 2.14. Habillage des cartes

### 2.14.1. Echelles cartographiques

L'échelle est un rapport entre les dimensions représentées sur une carte et les dimensions dans la réalité. L'échelle sert à la représentation graphique. L'échelle d'une carte exprime le rapport de réduction entre la réalité et la représentation sur la carte. L'échelle est le rapport de la longueur entre deux points sur la carte et la longueur couplée horizontalement entre les deux points correspondants sur le terrain. Agrandir l'échelle veut dire diminuer le dénominateur.

L'échelle d'un plan est le rapport constant entre la longueur graphique sur le plan et la même longueur horizontale sur le terrain, dans la même unité. Plus l'échelle sera petite, c'est à dire plus le dénominateur sera grand, plus le dessin sera petit. L'échelle est définie par la formule suivante :

$$E = Lc / Lt$$

Avec ;

E : Echelle

Lc: Longueur sur carte

Lt: Longueur sur terrain

Les unités employées doivent être les mêmes au numérateur et au dénominateur.

Une carte à grande échelle permet de représenter beaucoup de détails, tandis qu'une carte à petite échelle nous donne un meilleur aperçu général sur toute une région.

Une petite échelle permet de représenter les grands territoires mais avec pas beaucoup de détails.

Une grande échelle permet de représenter les petits territoires mais avec beaucoup de détails.

On parle de grande échelle (ex. 1/5 000), si on dispose d'une grande surface pour représenter une partie définie du territoire.

Echelle au 1/20 000, signifie que 1 cm sur la carte est égale à 20 000 cm ou 200 m sur le terrain.

Echelle au 1/50 000 signifie que 1 cm sur la carte représente 50 000 cm ou 500 m sur le terrain.

Les échelles les plus courantes sont : le 1/25 000, 1/50 000, 1/100 000 et au-delà.

En Algérie ; les échelles utilisées par ordre décroissant par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) sont 1/1 000 000, 1/500 000, 1/100 000, 1/50 000, 1/25 000.

(10-100-1000), (20-200-2000), (25-250-2500), (50-500-5000).

L'échelle est d'autant plus grande que le dénominateur est plus petit.

Les grandes échelles sont de l'ordre de : 1/25 000

Les moyennes échelles sont de l'ordre de : 1/50 000, 1/100 000 et même 1/200 000

Les petites échelles sont de l'ordre de : 1/250 000 Jusqu'au 1/1000 000.

Il existe plusieurs séries de cartes de l'Inventaire Général National (IGN) sur l'Algérie, à différentes échelles :

1/25 000 ; ces cartes sont en projection *Mercator Transverse Universel (MTU)* sur l'ellipsoïde de Clarke 1880.

1/50 000 ; ces cartes sont dressées sur l'ellipsoïde de Clarke 1880, en projection de Bonne jusqu'en 1942, puis en projection conique conforme de Lambert 2 zones, Lambert Nord Algérie ou Lambert Sud Algérie.

1/100 000 ; ces cartes sont basées sur le système de référence géodésique Voirol 1875, l'ellipsoïde associé étant Clarke 1880 IGN. Les cartes sont de type 1956 sauf les 5 coupures de la région de Colomb-Béchar, qui sont de type 1922. Les projections utilisées sont Lambert Nord Algérie ou Lambert Sud Algérie.

1/200 000 ; lorsqu'elles sont accompagnées de l'indication type 1960, ces cartes sont basées sur le système de référence géodésique Nord Sahara 1959, auquel est associé l'ellipsoïde Clarke 1880 Anglais.

1/500 000 ; ces cartes utilisent l'ellipsoïde et la projection de la carte internationale du monde sur l'ellipsoïde international (Hayford, 1909). A cette échelle et avec un GPS de navigation, leurs coordonnées peuvent être assimilées à du WGS84.

1/500 000 Afrique ; ces cartes d'Afrique utilisent la projection Lambert à petit champ.

Types d'échelles

Représentation de l'échelle sur la carte : trois formes possibles, verbale, numérique ou graphique, d'où il y a trois types d'échelles :

- a. Echelle verbale,
- b. Echelle linéaire ou graphique,
- c. Echelle numérique (aussi appelé échelle fractionnaire)

L'échelle verbale ; énoncé très simple ; un centimètre équivaut à dix kilomètres. Il peut être abrégé : 1cm = 10 km, Ex. 1Cm= 500 mètres (échelle verbale),

L'échelle graphique : c'est une ligne graduée. Elle indique le rapport entre la distance séparant deux points sur la carte. Échelle graphique (droite subdivisée en segments).

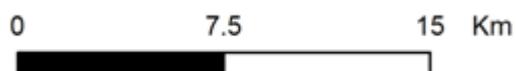


Fig. 29 : Exemple d'échelle graphique

L'échelle numérique ; elle est inscrite en chiffres et apparaît sous forme de fraction (ex. 1 :100 000 ou 1/100 000). Cela signifie que la longueur sur la carte est égale à cette longueur 100 000 fois plus grande dans la réalité, c'est-à-dire que chaque centimètre mesuré sur la carte équivaut à 100 000 cm sur le terrain (ou 10 km).

Les cartes topographiques sont une représentation géométrique, en général plane, d'une partie de la Terre. Elles sont une représentation aussi fidèle que possible de la réalité. Pour y arriver, le cartographe transforme les informations en une image cartographique lisible et compréhensible. Ses instruments sont des symboles, des signatures, des couleurs et des textes.

Les cartes à plus grande échelle sont les plans du cadastre.

Nous obtenons les relations suivantes entre les échelles classiques des documents et le type de détails représentés :

1. Exemple d'un plan de localisation d'équipements (poste de vigie, point d'eau, phare, quai, jetée...) au 1/200 à 1/500.
2. Exemple de plan de morcellement, d'occupation des sols, cadastre au 1/1.000 à 1/2.000.

La notion d'échelle n'a plus grand sens quand on utilise les SIG. Il faut la remplacer par plusieurs notions (INRA, 1991).

Niveau de précision des données : type et nature des données, quantité de données signification spatiale et sémantique de chaque donnée.

Champ d'étude : étendue sur laquelle portent les données acquises, ou sur laquelle porte l'étude.

Résolution spatiale : surface sur laquelle on dispose d'une donnée. C'est aussi l'inverse de la densité d'observations.

### 2.14.2. Parties ou surfaces des cartes

Deux parties constituent la carte :

- a. Une partie qui représente le relief (ou surface utile). Dans cette partie en plus des objets graphiques, on peut trouver des écritures cartographiques telles que la toponymie, termes génériques (noms des oueds, sommets des versants, noms des lieux de proximité côtière, des phares, réseaux hydrographiques, port mixte, ...etc.), désignations, abréviation (ex. balise, borne, quai, jetée, ...etc.) et renseignements complémentaires (ex. altitude du terrain (valeur des courbes de niveau), distance nautique (Mille marin), élévation bathymétrique, ...).
- b. Une partie (ou hors surface utile) qui représente les marges qui contiennent des informations qui nous aident à lire la carte telles que le titre de la carte, référence de la carte, sous-titre, la légende, l'échelle, la projection, date d'édition, déclinaison magnétique, l'auteur, le Nord et autres informations jugées utiles.

Les détails géographiques sont représentés sur la carte comme suit :

- a. Détails naturels (surfaces de bois, vergers, d'eau, cours d'eau, relief terrestre, fond marin ou courbes isobathes, faune et flore terrestres et marines, substrats géologiques et sédimentaires, activités biologiques.), détails rapportés (phares, jetées, quais, balises, bornes, voies d'accès, ...),
- b. Détails abstraits (détails imaginaires, limites géographiques et administratives).

#### 2.14.2.1. Toponymie

Sont les noms des lieux, ils sont faits à partir de la carte 1/200.000 en 1932. L'ajout de toponymes ainsi que la variation des types d'écritures permet de différencier les objets suivant leur importance.

#### 2.14.3. Légende

La légende est en fait la clé de lecture d'une carte. Elle doit donner tous les renseignements nécessaires à la bonne compréhension de l'information de la carte, et ne pas induire en erreur le lecteur par des informations incomplètes ou ambiguës. Les éléments graphiques utilisés dans la carte sont regroupés et expliqués dans la légende de la carte.

Une légende doit donc comporter :

Un titre précisant l'unité dans laquelle est exprimée la variable.

Une présentation graphique de la liaison variable / surface de symbole pour quelques valeurs représentatives de la variable, si possible comprenant le minimum et le maximum.

Le choix des symboles et des couleurs est guidé par le principe de rapprocher au mieux la représentation graphique à la réalité ; On adopte en générale les conventions suivantes :

- a. Le bleu est pour l'humidité (courbes isobathes (bathymétrie),

- b. Le noir est attribué à tout ce qui résulte de l'activité humaine, ainsi qu'à la toponymie (noms des lieux de proximité),
- c. Le vert à la végétation,

La représentation graphique reflète donc la réalité comme suit :

Utilisation du bleu pour l'eau du vert pour la végétation marine de symboles pour les objets isolés (ex. phare, borne, balise, quai, point d'eau, ...etc.)

Différents objets d'une même catégorie sont représentés par différentes couleurs (suivant leur utilisation).

Les symboles et pictogrammes permettent d'enrichir la carte par des informations descriptives ou thématiques.

La bonne lisibilité de la carte résulte d'une combinaison adéquate des outils cartographiques.

En effet, une carte scientifique se doit d'être simple et claire, donnant toutes les clés de lecture dans le titre et dans la légende, sans commentaires superflus.

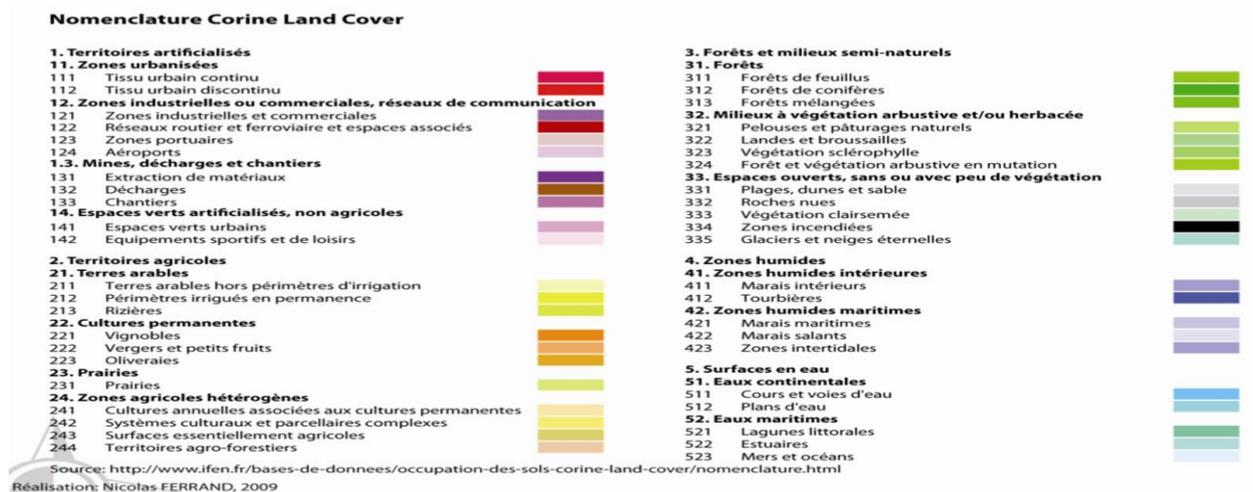


Fig. 30. Nomenclature des codes de la classification *Corine Land Cover* (CLC) niveau 5 (CGDD, 2009)

40	5	5	Surfaces en eau	Surfaces en eau
40	5	51	Surfaces en eau	Eaux continentales
40	5	511	Surfaces en eau	Cours d'eau et voies d'eau
40	5	5111	Surfaces en eau	Deltas intérieurs permanents
40	5	5112	Surfaces en eau	Rivières/cours d'eau/ruisseaux permanents; y compris cascades
40	5	5113	Surfaces en eau	Rivières/cours d'eau/ruisseaux saisonniers/intermittents/irréguliers
42	5	5114	Surfaces en eau	Canaux et fossés de drainage, rigoles
40	5	512	Surfaces en eau	Plans d'eau
40	5	5121	Surfaces en eau	Lacs d'eau douce permanents (plus de 8 hectares); y compris grands lacs de méandres
40	5	5122	Surfaces en eau	Lacs d'eau douce saisonniers/intermittents (plus de 8 hectares); y compris lacs des plaines d'inondation
40	5	5123	Surfaces en eau	Lacs salés/saumâtres/alkalins permanents
40	5	5124	Surfaces en eau	Lacs salés et étendues/saumâtres/alkalins saisonniers/intermittents
40	5	5125	Surfaces en eau	Lacs d'eau douce permanents (plus de 8 hectares); avec végétation benthique; y compris grands lacs de méandres avec végétation benthique
40	5	5126	Surfaces en eau	Lacs d'eau douce saisonniers/intermittents (plus de 8 hectares); avec végétation benthique; y compris lacs des plaines d'inondation avec végétation benthique
40	5	5127	Surfaces en eau	Lacs salés/saumâtres/alkalins permanents avec végétation benthique
40	5	5128	Surfaces en eau	Lacs salés et étendues/saumâtres/alkalins saisonniers/intermittents avec végétation benthique
42	5	5129	Surfaces en eau	Étangs d'aquaculture (par ex. poissons, crevettes)
42	5	5130	Surfaces en eau	Étangs; y compris étangs agricoles, étangs pour le bétail, petits réservoirs; (généralement moins de 8 hectares)
42	5	5131	Surfaces en eau	Zones de stockage de l'eau; réservoirs/barrages/retenues de barrages/retenues d'eau; (généralement plus de 8 hectares)
42	5	5132	Surfaces en eau	Sites de traitement des eaux usées; y compris champs d'épandage, étangs de sédimentation, bassins d'oxydation, etc
40	5	52	Surfaces en eau	Eaux maritimes
40	5	521	Surfaces en eau	Lagunes littorales
40	5	5211	Surfaces en eau	Lagunes côtières saumâtres/salées; y compris lagunes saumâtres à salées reliées à la mer par un chenal relativement étroit au moins
40	5	5212	Surfaces en eau	Lagunes côtières d'eau douce; y compris lagunes deltaïques d'eau douce
40	5	522	Surfaces en eau	Estuaire
40	5	523	Surfaces en eau	Mers et océans
40	5	5231	Surfaces en eau	Eaux marines peu profondes et permanentes, dans la plupart des cas d'une profondeur inférieure à six mètres à marée basse; y compris baies marines et détroits
40	5	5232	Surfaces en eau	Lits marins aquatiques subtidaux; y compris lits de varech, herbiers marins, prairies marines tropicales

Fig. 31. Codes de classification *Corine Land Cover* (CLC) appliqués aux surfaces d'eau (CGDD, 2009)

#### 2.14.3.1. Signes conventionnels

Mode d'implantation : Il y a trois modes d'implantation résumés comme suit :

Mode ponctuel ; un point connu par ses coordonnées (x,y) (ex. un arbre, un pylône, un phare, une balise, une borne,...etc.),

Mode vectoriel ; on a besoin d'un axe (ex. structure d'une route, piste, voirie, quai, ...etc.)

Mode zonal ; une zone donnée (parcelle agricole, forestière, zone de culture marine, zone aquacole, zone de pêche).

#### 2.14.3.2. Variables visuelles

La forme ; est une variable géométrique (carrée, triangle, cercle) élémentaire symbolique idéogramme (ex. symbole d'un arbre, un sol, un poste de vigie, ferme, maison, phare, borne, balise, etc.) ou figurative ou pictogramme (ex. route, voirie, piste, sentier, quai, jetée, ...etc.).

La couleur ; il faut que la tonalité soit nettement différente.

La valeur ; ou nuance de couleur, du foncé au moins foncé.

Le grain ; niveau de gris entre le noir et le blanc. Le grain a une limite inférieure à 0,1 mm.

La taille ; elle ne dépasse pas la taille de surface de l'objet.

Orientation ; pas de grands cercles, car il y a plusieurs orientations même le carré a plusieurs orientations,

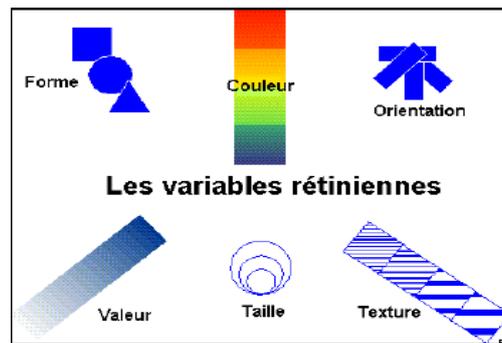


Fig. 32. Quelques variables visuelles



Fig. 33. Quelques symboles d'éléments marins cartographiés

### 2.14.3.3. Expression des écritures cartographiques

Tous les détails naturels (relief, le substrat géologique ou sédimentaire, l'hydrographie) sont représentés par les caractères Italiques. Les autres non naturels sont exprimés en caractères Romain. La couleur est associée à la nature des objets (verte pour la végétation, bleu pour l'eau, ...etc.). La taille exprime la grandeur des phénomènes.

Exemple de pratiques

Objets linéaires (oueds, cours d'eau permanent ou temporaire, conduite et canalisation, ...etc.).

Objets surfaciques (forêt, sol, mer, zones humides (lacs, sebkha, chotts, lagunes, estuaire, embouchures, ... etc.).

Objets ponctuels (arbre, borne fontaine, phare, balise, pylône, poteaux télégraphique, roches, glacis, ...etc.).

Limites administratives (limites d'état, de wilaya, de commune, de lignes de base, des eaux sous juridiction nationale et internationale, de zone économique exclusive (ZEE), ...etc.).

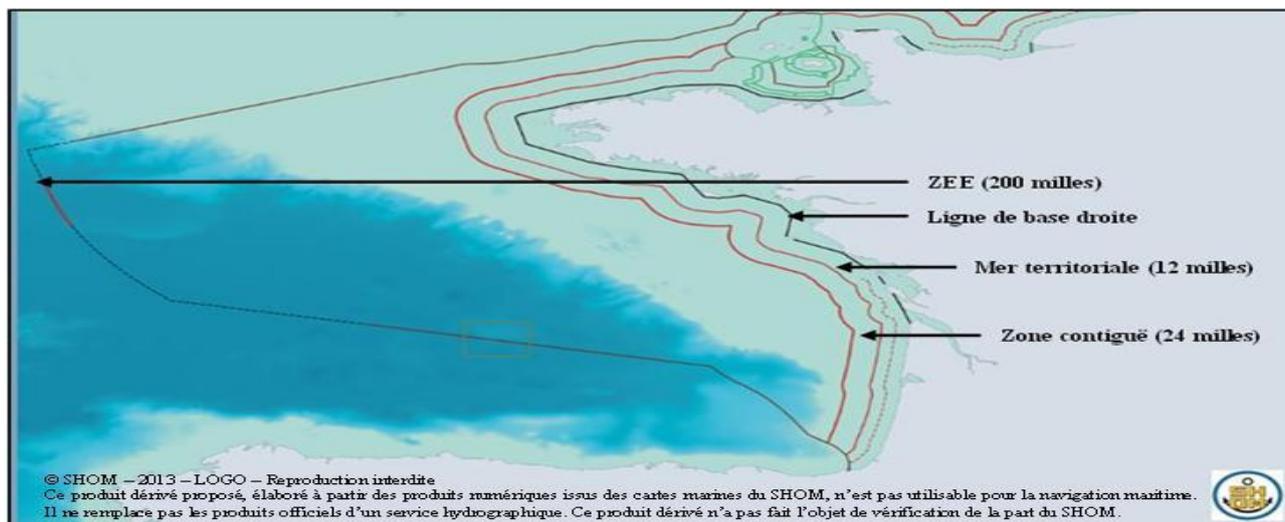


Fig. 34. Limites et frontières maritimes

#### 2.14.4. Limites de perception visuelle

La carte doit être lue sans effort, il y a 3 niveaux qui définissent les règles de visibilité :

- ✓ Le seuil de perception : c'est la dimension des éléments graphiques permettant leur vision à l'œil nu dans les conditions normales d'observation ; exemple : un point quelconque sur la carte.
  - a. Point : son seuil de perception égal à  $2/10$  mm (erreur graphique) , pour que l'objet soit visible.
  - b. Ligne : un seuil de perception à  $1/10$  mm.
  - c. Un carré : un seuil de perception à  $6/10$  mm.
  - d. Un carré plein : un seuil de perception à  $4/10$  mm.
- ✓ Le seuil de séparation ; c'est la distance minimale entre 2 éléments graphiques permettant de les distinguer à l'œil nu dans les conditions normales d'observation, c'est-à-dire le pouvoir séparateur de l'œil normal est de l'ordre de  $2/10$  mm c'est-à-dire quand on trace une voirie on doit respecter l'écart entre les 2 lignes qui est de  $2/10$  mm (0,2 mm). En résumé pour voir et distinguer entre les petits objets sur carte il faut que ces derniers soient séparés entre eux de + de  $2/10$  mm.
- ✓ Le seuil de différenciation ; il y a un lien avec le seuil de perception ; c'est l'écart minimum permettant d'apprécier à l'œil nu, dans les conditions normales d'observation. Les différences existantes entre deux éléments graphiques des figures voisines.

Toute carte marine est caractérisée par son numéro, son format, son titre et son échelle.

#### 2.14.5. Catégories des cartes marines

Appellations /Catégories	Usages :	Echelles:
<b>Cartes de pilotage côtier (catégorie 1)</b>	Entrées dans les ports, mouillages, navigation en eaux resserrées. <i>ex : n°6911 : Baie de Porto Vecchio</i>	1 : 10 000 à 1 : 25 000
<b>Cartes de pilotage hauturier (catégorie 2)</b>	Navigation locale. Approches des ports, passages délicats couvrant <b>jusqu'à 5 M</b> environ des dangers. <i>ex : n°7033 : Du Croisic à Quiberon</i>	1 : 40 000 à 1 : 60 000
<b>Cartes de cabotage (catégorie 3)</b>	Navigation côtière, à plus de 3M des dangers, en suivant des routes parallèles à la côte entre <b>10 et 20 milles</b> : - localisation possible en vue de terre ; - localisation précise à la sonde. navigation délicate : zone encombrée, dispositif de séparation de trafic. <i>n° 7066 De l'île Vierge à la pointe de Penmarc'h</i>	1 : 100 000 à 1 : 200 000
<b>Cartes d'atterrissage (catégorie 4)</b>	- Identification le plus tôt possible de la côte au radar ou à la vue, avec éventuellement le concours de la sonde. - Navigation qui suit des routes parallèles à la côte entre <b>20 et 50 milles</b> des dangers. <i>ex : n° 6990 De la pointe de Penmarc'h à la Gironde</i>	1 : 300 000 à 1 : 500 000
<b>Cartes de traversée (catégorie 5)</b>	Traversée durant laquelle le navire reste le plus souvent à des distances de terre comprises entre <b>50 et 200 milles</b> <i>n° 7211 Golfe de Gascogne. De Brest à Cabo Finisterre</i>	1 : 800 000 à 1 : 1 100 000
<b>Cartes océaniques (catégorie 6)</b>	Navigation au cours de grandes traversées <i>ex : n° 6623 De La Manche au détroit de Gibraltar</i>	1 : 1 500 000 à 1 : 4 000 000
<b>Routiers et planisphères (catégorie 7)</b>	Préparation des grandes traversées (tracé des routes, loxodromiques ou orthodromiques). <i>ex : n° 5417 Océan Atlantique nord et mers boréales</i>	1 : 5 000 000 à 1 : 15 000 000

Fig. 35. Différentes catégories de cartes marines (d'après Charbonnel, 2005)

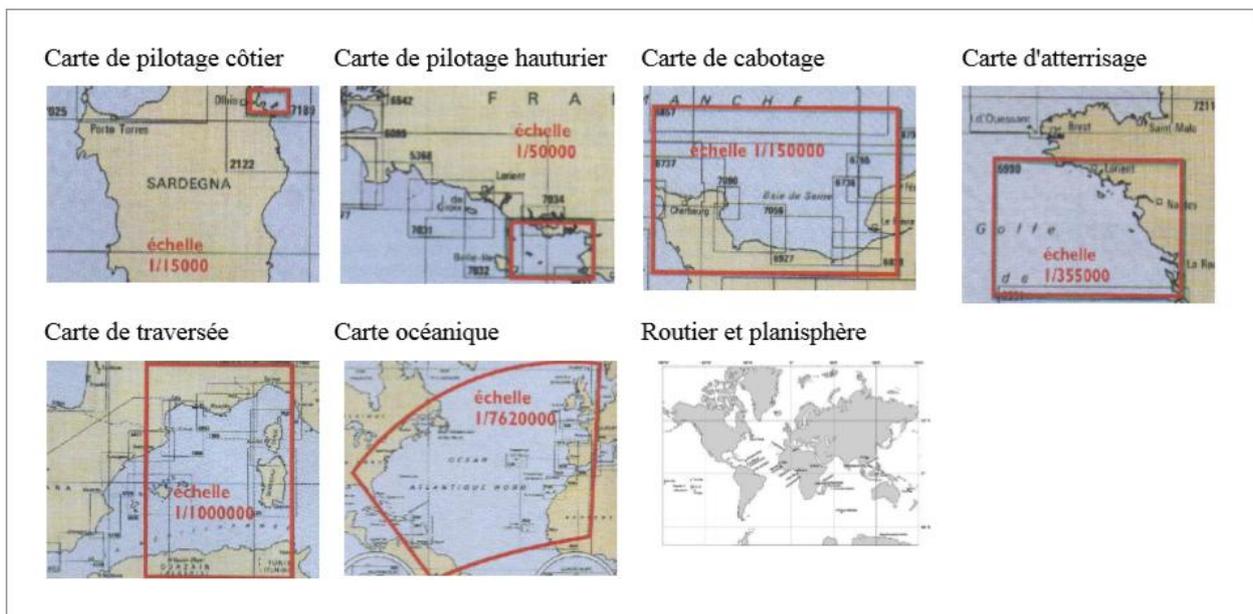


Fig. 36. Exemples de différentes catégories de cartes (encadrés en gras) (d'après Charbonnel, 2005)

## 2.15. Notions d'altitudes (3D) et Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Pour établir la cartographie numérique, on doit intégrer les données contenant l'information de relief (altitude), aussi appelées Modèle Numérique de Terrain (MNT) « Représentation de valeurs d'altitudes continues sur une surface topographique à l'aide d'un tableau de valeurs Z référencées par rapport à un datum commun ; il est généralement utilisé pour représenter le relief d'un terrain » (*ArcGIS User's guide*, 2006).

Certains logiciels SIG (ex. Mapinfo, Arcgis) ont des modules dédiés à la construction de MNT à partir des courbes de niveaux des cartes topographiques, de couples images stéréoscopiques (SPOT, RADARSAT ou photographie aérienne).

Les informations de la carte marine accessibles en mode vecteur sont insuffisantes pour de nombreuses applications pour deux raisons : d'une part, comme déjà dit, elles sont simplifiées pour ne retenir que l'information utile pour la sécurité de la navigation, et d'autre part la sécurité implique que les points représentés soient surtout des points hauts, ce qui déforme la topographie du fond de la mer. Cela est gênant pour des modèles physiques, de courant par exemple, ou pour l'ingénierie de travaux maritimes. On établit donc des grilles de points très serrées où l'on donne la profondeur pour chaque point.

### 2.15.1. Propriétés des courbes de niveaux bathymétriques

Les courbes de niveaux bathymétriques indiquent la profondeur des eaux comme le montre la Fig. 35 suivante :

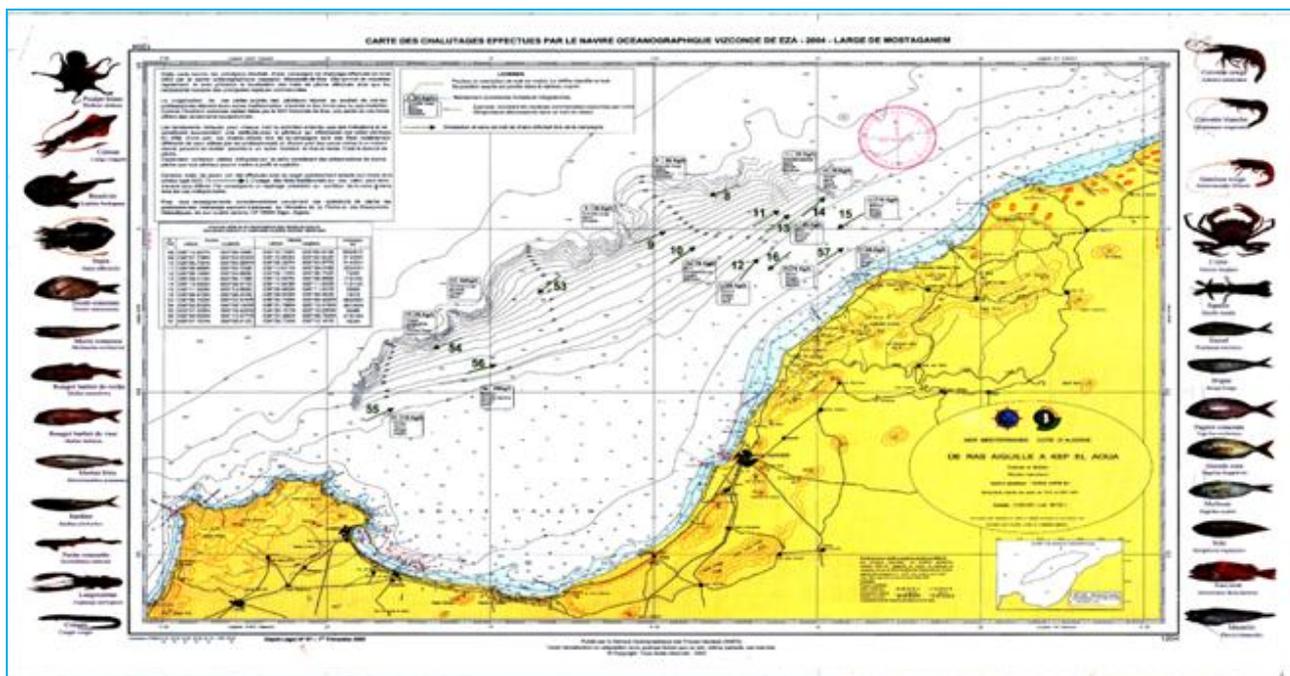


Fig. 37. Courbes de niveau bathymétriques

Les cartes marines doivent porter les informations réparties comme suit :

1. Notes explicatives sur la construction de la carte (niveaux de références, systèmes utilisés...) à lire impérativement avant toute utilisation de la carte,
2. Ecussons ; dans l'exemple, l'écusson national et celui de l'OHI accolés indiquent que cette carte nationale est également une carte internationale. Une carte nationale ne comporte que l'écusson national. Les reproductions en fac-similé des cartes étrangères internationales comportent l'écusson du pays producteur (à gauche), du pays reproducteur (grand modèle au centre) et celui de l'OHI (à droite) - cf illustration 17,
3. Échelle de la carte à la latitude indiquée. L'échelle n'est exacte qu'à cette latitude. 14.Échelle graphique sur les cartes à grande échelle,
4. Échelle graphique en marge, sur les cartes à grande échelle. Sur les cartes à plus petite échelle, utiliser les graduations en latitude : 1 mille = 1' de latitude,
5. Notes d'avertissement (si elles existent). Les informations sur les particularités locales doivent être lues avant d'utiliser la carte,
6. Diagramme des sources (s'il existe). Les navigateurs doivent être très prudents dans les zones où les levés ne sont pas adéquats,
7. Référence à une carte (ou à un cartouche) à plus grande échelle (ici un cartouche). 19.Référence à une carte adjacente à échelle équivalente,
8. Mention des documents nautiques complémentaires qui doivent être consultés,
9. Avertissement (s'il existe) relatif au système géodésique WGS 84,
10. Informations relatives aux Groupes hebdomadaires d'Avis aux Navigateurs.

#### **2.15.1.1. Densité des courbes de niveau**

Rend compte du relief : les pentes fortes sont caractérisées par des courbes nombreuses et serrées ; à des courbes espacées et peu nombreuses correspond une région plate ou à faible pente. La disposition des courbes de niveau sur la carte renseigne sur la forme du relief. Si les flancs d'une colline sont plus raides, les courbes de niveau sont plus rapprochées. Une pente plus douce est représentée par des lignes plus espacées. La distance entre les courbes de niveau est définie par une différence de niveau fixe et est choisie en fonction de l'échelle de la carte.

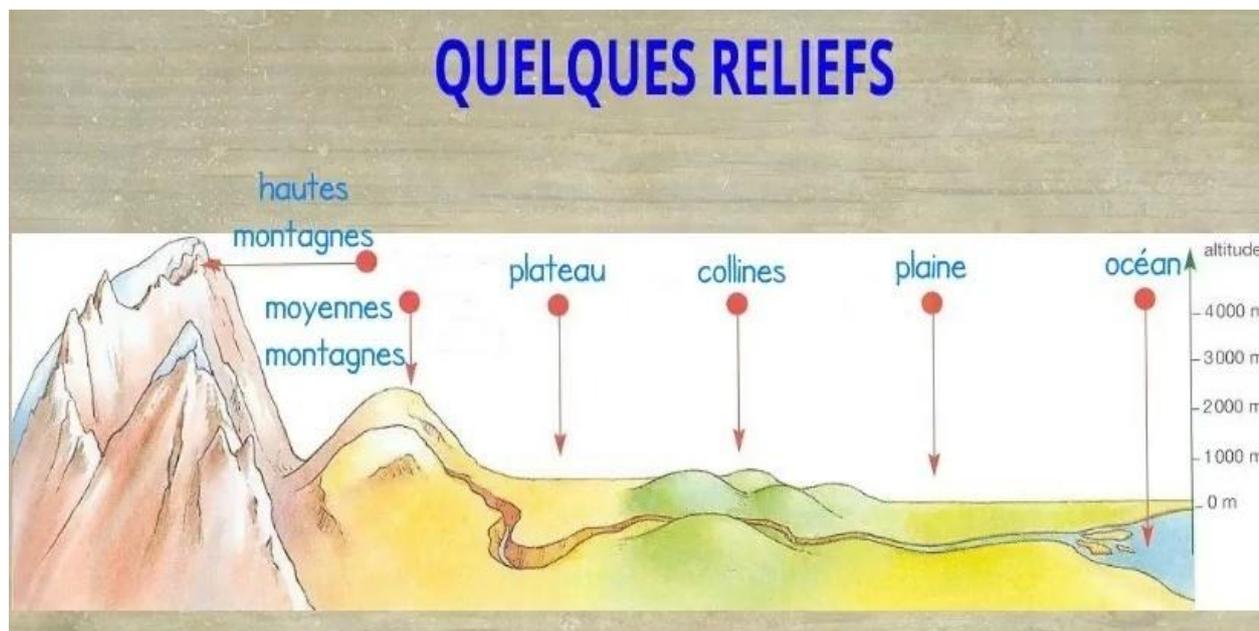


Fig. 38. Représentation de quelques reliefs

Le MNT est un ensemble de points 3D comprenant uniquement les éléments du terrain naturel. C'est le référentiel altimétrique de base en géomatique. Il est possible, grâce à des MNT, d'obtenir des données plus précises sur le relief. Un MNT se définit comme une représentation numérique du relief sous forme d'une grille régulière sur laquelle une altitude est donnée pour chaque nœud de la grille. La technique la plus répandue pour le calcul des altitudes se base sur la notion de stéréoscopie ; photographies aériennes, images SPOT, images radar peuvent être utilisées pour la production des MNT.

#### 2.15.1.2. Elévation bathymétrique (fond marin)

Les courbes de niveau bathymétrique ; on appelle courbe de niveau le lieu des points de la surface topographique ayant même élévation bathymétrique, c'est-à-dire l'intersection de la surface topographique avec un plan horizontal. Les courbes de niveau sont tracées à partir d'une opération de nivellement qui consiste à mesurer l'élévation bathymétrique des points par rapport au géoïde.

Répartition bathymétrique : Ligne de rivage, plateau continental (-150 à -200 m) / pente douce, Talus continental (-200 à -3000 m) / pente plus accentuée et plaine abyssale (-3000 à - 6500 m de profondeur).

Chaînes de montagnes sous-marines (surface / îles), dorsales océaniques, fosses ou ravins (-11500 m / Fosse de Guam). Les fonds sous-marins < 4000 m de profondeur occupent 77% de la surface océanique. Les hauts sommets > 4000 m de profondeur occupent 1,1 % de la surface terrestre.

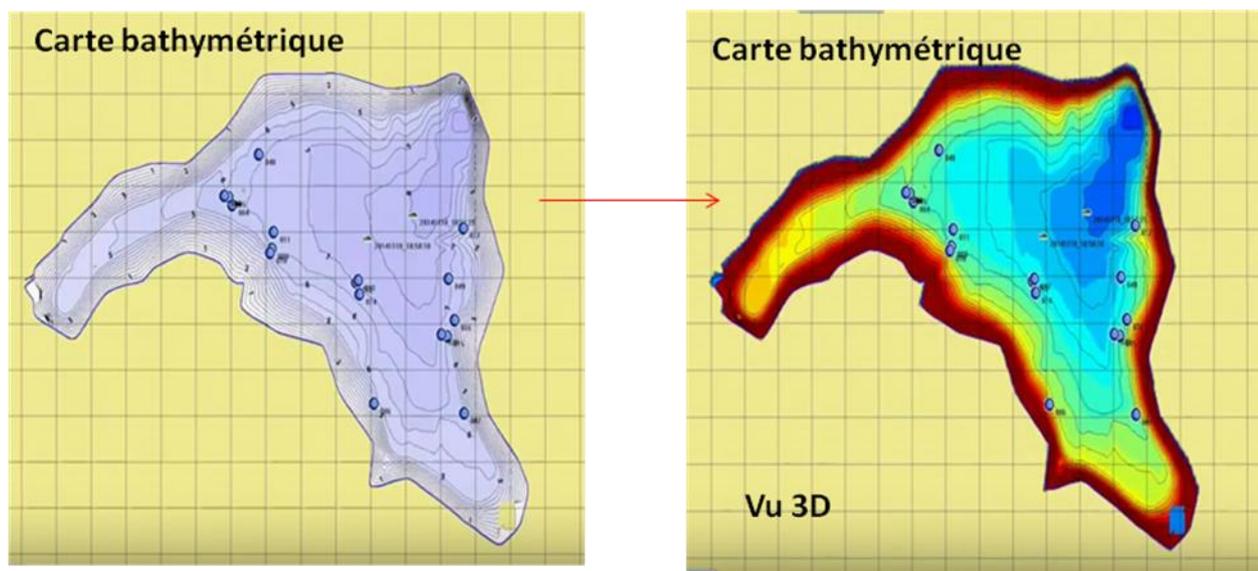


Fig. 39. Carte bathymétrique en 2D et 3D (dimensions).

### 2.15.1.3. Vocabulaires employés par les marins

Pour mesurer une distance on utilise le Mille marin ou nautique.

1 minute d'angle à l'équateur c'est-à-dire  $1^\circ / 60 \text{ mn} = 1 \text{ Mille marin} = 1 \text{ Nautique} = 1852 \text{ mètres}$ .

La vitesse est exprimée en nœud.

1 nœud = 1000 mille marin ou 8 nœuds = 60 mn = 8 Mille (m) soit 15 km/heure

Parmi les calculs à faire on cite :

- a. Calculer la déclinaison,
- b. Faire valoir les routes,
- c. Cerner la route de nuit,
- d. Anticiper les amers,

Parmi les tâches principales on cite :

- a. Tracer la route,
- b. Mesurer les distances,
- c. Estimer le temps,
- d. Estimer l'heure d'arrivée.

Pour tracer une route ou relever un cap sur la carte marine on doit utiliser les outils suivants :

- a. La règle Cras : règle rectangulaire
- b. Le compas de relèvement

c. La boussole.

### 2.15.2. Les marques de balisage en mer

#### 2.15.2.1. Les différentes sortes de phares maritimes :

- Phare d'atterrissage,
- Phare de jalonnement (îles, ou autres configurations particulières, ...etc.),
- Phare d'entrée aux ports.

#### 2.15.2.2. Les différents rythmes de feux des phares maritimes :

- À éclats : le temps de lumières plus courts que l'obscurité,
- À occultation : le temps de lumières plus long que l'obscurité,
- Isophase : le temps de lumières égale au temps de l'obscurité,
- Scintillant : suite d'éclats très rapides

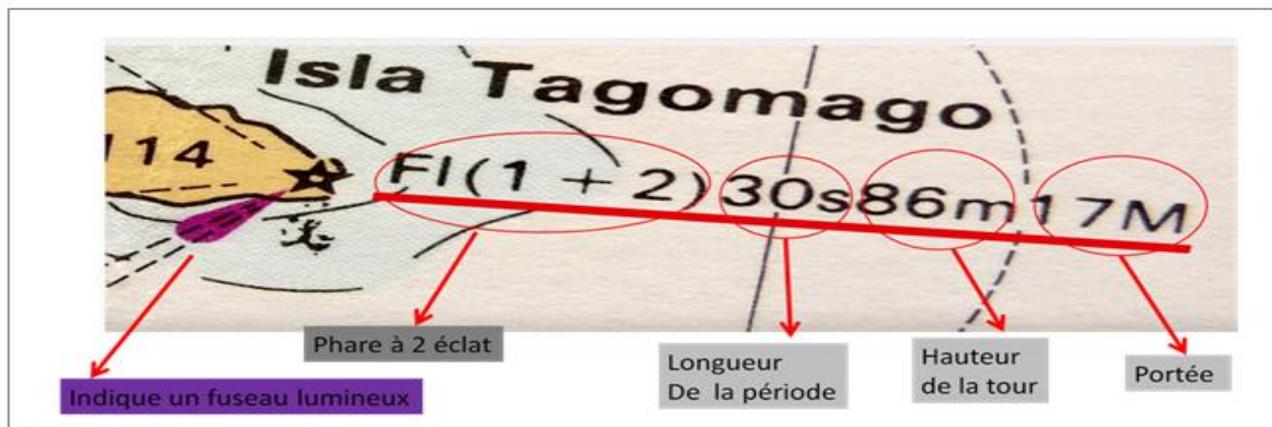


Fig. 40. Représentation et description cartographique d'un phare



Fig. 41. Quelques photos sur les phares



Fig. 42. Marques de balisage en mer

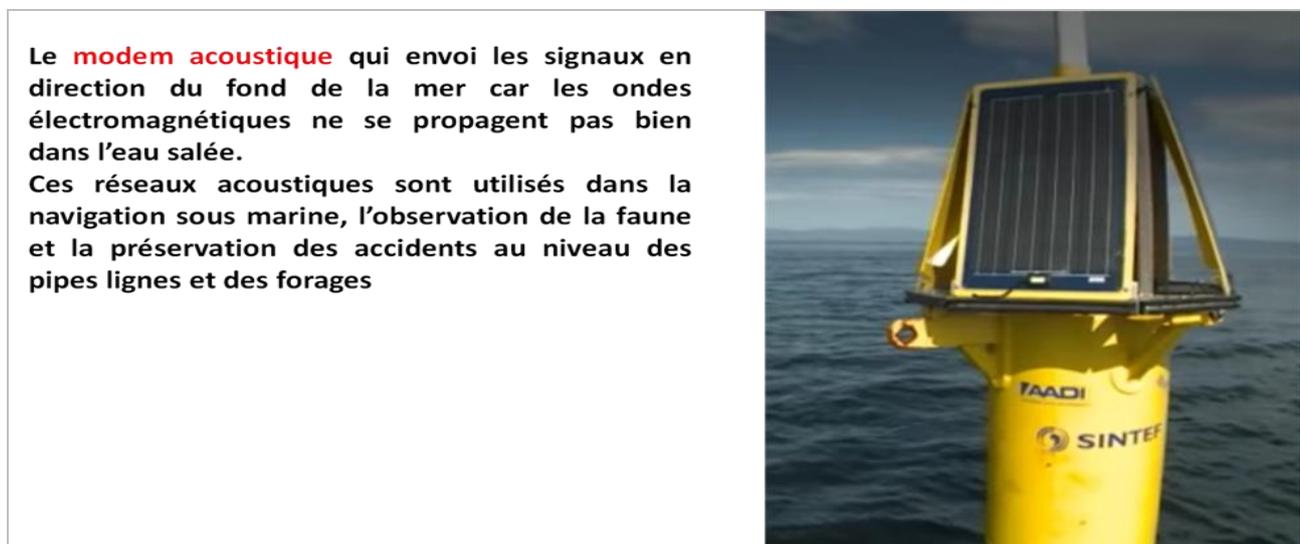


Fig. 43. Photo d'un modem acoustique

## 2.16. Spatiocartographie

Pour se rapprocher encore plus de la carte, il est possible de se procurer des documents cartographiques géo référencés, appelés spatiocartes, sur lesquels l'information planimétrique classique est remplacée par l'image satellitaire.

Les cartes thématiques représentent sur un fond de repère des phénomènes quantitatifs ou qualitatifs concrets ou abstraits (sur carte par exemple limites des eaux, courbes isobathes...etc.). Généralement dans la carte thématique on trouve les classes suivantes :

- a. Physique ; c'est l'aspect physique du sol (cartes géophysiques, géologiques, bathymétriques, météorologiques et climatologiques),
- b. Biogéographiques ; c'est la biologie, surface des eaux marines (carte phytogéographique, zoogéographiques, écologiques et environnementales),

- c. Géohumaine; activités humaines (carte démographique, structure sociale, culturelle, politique, administrative et historique),
- d. Economique ; carte industrielle, de transport et de commerce,
- e. Technique, aéronautique, marine et tactique.
- f. Géomarketing ; commerce, produit commercialisé et suivi par GPS.

Une classification des cartes peut être établie par la nature des phénomènes cartographiés. Voici des exemples de cartes thématiques:

- a. Carte géologique et sédimentaire (type de fonds),
- b. Carte de circulation des masses d'eau,
- c. Carte météorologique : phénomènes météorologiques,
- d. Carte de déplacement migratoire de la faune marine,
- e. Carte des réseaux (hydrographiques, de communications,...etc)
- f. Plan de prévention des risques : phénomènes prévisibles présentant des risques.
- g. Carte marine; tout objet (bathymétrique, amer, marques de balisage, phares, côte, etc.) utile à la navigation,

### 2.16.1. Utilité de la carte

Le but de la carte c'est de situer, localiser et de faire des mesures sur les objets topographiques.

La carte sert à :

- Recueil d'informations,
- Effectuer des mesures,
- Repérage,

Localisation statistique (objet fixe) ou dynamique (ex. migration des poissons vers les hautes latitudes, pollution et invasion,...).

#### *Recueil des données*

Les informations traitées selon un plan de classement géographique ; cet inventaire est selon peut être exhaustif (beaucoup de données à) ou non.

#### *Instruments de mesures*

Détermination de coordonnées rectangulaires ou géographiques des objets, des lieux, des longueurs, des surfaces, des élévations altimétriques ou bathymétriques, mesures d'angles, d'orientation, de densités, de statistiques, etc.

#### *Localisation*

Appréhendé ou immédiatement ou globalement les positions des phénomènes. La localisation absolue ou relative (ex. le phare s'éloigne à pas plus de 12 Mille de la cote ou le phare de Capivi ou Wilis se trouve à 25 km de Mostaganem).

C'est l'étude, le suivi et variation des phénomènes dans le temps (facteurs de mouvement et de déplacement).

Support ; le plan, la carte, la photographie aérienne, les orthophotoaériens (ce sont des photographies redressées) et les images satellitales.

### **2.16.2. Qualité de la carte**

La carte est un produit, elle a deux qualités :

- a. Qualité fondamentale ; précision, fidélité (elle diminue avec le temps surtout dans la région de forte activité), exactitude (objet du terrain correspond réellement à ceux de la carte),
- b. Qualité esthétique ; lisibilité (bonne perception), sélectivité (distinction entre les objets) et sémiologie graphique c'est le langage entre l'émetteur et le récepteur.

Cette qualité est donnée comme base de données à la carte, exprimée en pourcentage (%). Par exemple la carte à 99% de précision (80% de fidélité et 75% de sélectivité).

### **2.16.3. Méthodes de mise en page et exportation de la carte**

Cette session finale présente l'apprentissage, la création et l'exportation des cartes thématiques ; On apprendra comment :

- a. Sélectionner le format et la dimension de la mise en page,
- b. Préparer le contenu de la carte,
- c. Préparer la légende et le titre de la carte,
- d. Créer la localisation de la zone géographique illustrée.

Les deux formats utilisés sont le Paysage et le Portrait.

Le format de base est le A0. Il est défini de manière à délimiter une surface de un mètre carré. Ses dimensions exactes sont de 841 mm par 1190 mm.

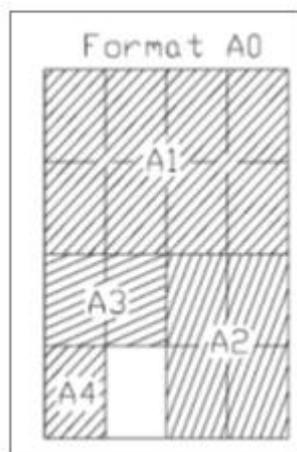


Fig. 44: Formats normalisés

Les dimensions des cartes couvrent le format de :

- A3 (297mm x 420mm),
- A2 (420mm x 594mm),
- A1 (594mm x 841mm),
- A0 (841mm x 1189mm).

Choisir l'échelle de sortie pour mieux représenter la carte (ex. fixer l'échelle à 1/50 000).

## 2.17. Utilités des SIG

Les SIG peuvent y contribuer soit par la production de produits finalisés (cartes, statistiques, simulations, etc.) soit en tant que support d'information dans des systèmes opérationnels de décision (Gourmelon, 2003). Un bon SIG est capable de transformer les données interpolées d'une structure dans une autre, et de visualiser ces données sous forme de cartes en iso contours ou de vues en trois dimensions. Le SIG permet d'inventorier les constituants d'un écosystème (faune et flore) et de comparer leur répartition avec des paramètres géo référencés (géomorphologie, nature et qualité du sol, présence d'espèces, nature de l'essence, nature du substrat géologique, activité biologique, qualité physico-chimique de l'eau, présence d'espèces, nature et qualité de l'environnement, etc.). Les recensements de populations animales ou végétales ont toujours nécessité une représentation cartographique, l'utilisation d'un SIG apporte une souplesse d'utilisation et une évolution que ne permettent pas les représentations sur papier. Les SIG permettent d'intégrer les données de télédétection à des données provenant d'autres sources pour obtenir plus facilement les informations pertinentes dont on a besoin. Ils aident à l'analyse spatiale et permettent de gérer un grand nombre de données. Il aide à la prise de décision.

## 2.18. Objectifs des SIG

Chakroun (2014), a défini et hiérarchisé les objectifs du SIG comme suit:

- a. Définir les bases de la référence spatiale,

- b. Développer et utiliser des outils pour localiser les différents éléments du territoire, existants ou à mettre en place,
- c. Intégrer ou rendre intégrables les données obtenues en fonction des systèmes de référence choisis,
- d. Offrir des données et information de qualité,
- e. Améliorer leur traitement, stockage et diffusion grâce à l'informatique,
- f. Analyser différents scénarios décisionnels à partir des informations obtenues.

## 2.19. Avantages des SIG

Chakroun (2014) cite les avantages du SIG comme suit :

- a. Les données sont gardées sous forme physique (support magnétique),
- b. Les données peuvent être stockées et extraites à un faible coût,
- c. L'accès aux données est facile,
- d. Mesures sur les cartes, les superpositions, les transformations, la conception graphique,
- e. Des tests analytiques de modèles à caractère géographique peuvent être réalisés et répétés facilement,
- f. L'étude des changements (études diachroniques) intervenues entre plusieurs dates peuvent être facilement réalisés,
- g. La conception graphique interactive et les traceurs automatisés peuvent être utilisés pour la conception et la production cartographiques.

## 2.20. Domaines d'applications des SIG

Les domaines d'application des SIG sont aussi nombreux que variés.

### 2.20.1. Cartographie marine

La cartographie marine est indispensable à toute activité maritime, parmi lesquelles la navigation et la protection de l'environnement sont particulièrement critiques pour la gouvernance des océans.

#### 2.20.1.1. Cartes en mode « image » (« raster »)

Elles sont identiques aux cartes papier et donc relativement faciles à produire à partir de celles-ci. Elles permettent notamment d'automatiser les mises à jour et de reporter automatiquement la position du navire, mais elles ne permettent pas d'accéder à l'information géo référencée (c'est-à-dire avec sa position) pour s'en servir et ne permettent donc aucune intelligence au système qui ne pourra pas, par exemple, détecter une situation dangereuse et avertir le navigateur. Elles ne

permettent pas non plus d'utiliser l'information contenue sur la carte pour d'autres applications que leur présentation à l'utilisateur.

### **2.20.1.2. Cartes en mode vecteur**

Ce sont de véritables bases de données qui ne souffrent pas des limitations que je viens d'évoquer et qui présentent de multiples avantages.

- a. Elles permettent de n'afficher que l'information utile à un instant donné, ce qui soulage le navigateur et augmente sa sécurité,
- b. Elles permettent d'adapter la présentation à l'environnement, selon l'éclairage par exemple,
- c. Elles permettent d'accéder facilement à des informations détaillées sur les objets représentés,
- d. Elles permettent d'aider le navigateur à tracer une route sûre et à détecter en temps réel des obstacles qu'il n'aurait pas remarqués,
- e. Elles permettent enfin d'accéder à l'information quantifiée et positionnée qui peut servir à d'autres systèmes d'information que ceux utilisés pour la navigation.

### **2.20.2. Utilisation du SIG dans l'aquaculture et la pêche (Ressources marines)**

L'écosystème est sous l'influence de plusieurs facteurs externes tels que l'ensoleillement, l'apport en eau douce, les eaux de ruissellement, le lessivage des champs agricoles et les eaux usées urbaines. L'utilisation des SIG combinant les données satellitaires et les données in situ a permis de modéliser des scénarios d'exploitation et d'aménagement. Donc Le développement rapide des SIG est en relation directe avec les besoins nouveaux apparus en télédétection des milieux physiques et aménagés à toutes échelles, à partir de bases de données géographiques (BDG) intégrées aux cycles d'enregistrements dans la lumière visible, le proche ...Les SIG sont des outils d'analyse spatiale et d'aide à la décision relativement incontournables. Leur capacité à agréger, présenter, et analyser des données de sources très variables (satellites, photos, réglementation, résultats de modélisation...) permet une meilleure accessibilité et un meilleur partage de l'information spatialisée. La dimension spatiale est essentielle dans les projets aquacoles, notamment au regard des questions liées à l'accessibilité et le choix des sites, comme la compétition entre les différents usagers. Les difficultés d'accession aux espaces sont considérées comme un des principaux freins au développement de l'aquaculture.

#### **2.20.2.1. Sélection et présentation d'une zone ou un site marin**

Cadre régional : la position (géographique) et sa morphologie

Cadre environnemental : hydrologie, hydrodynamisme, la bathymétrie et sa sédimentologie.

Peuplements phytoplanctoniques : la répartition du peuplement phytoplanctoniques dans cette zone (la biomasse).

Peuplements benthiques : la macroflore et la macrofaune (La macrofaune est en relation avec les types d'herbiers).

### **2.20.2.2. Gestion de la pêche**

La gestion des pêches est basée principalement sur l'évaluation scientifique de l'état des stocks réalisée par le CIEM et le CSTEP pour les stocks européens, par les comités scientifiques propres à chaque organisation régionale de gestion des pêches (ORGP) pour les stocks qu'elles gèrent. L'évaluation de l'état des stocks procède par plusieurs étapes :

1. Première étape : le recueil des données de captures par l'intermédiaire des journaux de pêche et par échantillonnage, notamment pour la composition des captures par âge/taille des poissons,
2. Seconde étape : le recueil des données biologiques par l'intermédiaire de campagnes scientifiques en mer et d'échantillonnages à bord des navires de pêche ou en halle à marée,
3. Troisième étape : la modélisation de la dynamique de chaque stock et simulation de l'évolution du stock en fonction de plusieurs paramètres (le recrutement, la croissance individuelle, la mortalité naturelle, la mortalité par pêche).

La gestion des pêches peut donc se découper en 4 étapes faisant intervenir différents acteurs :

- a. La collecte des données d'évaluation (pêcheurs professionnels et scientifiques),
- b. L'évaluation des stocks (scientifiques),
- c. L'élaboration des règles de gestion (pouvoirs publics et pêcheurs professionnels),
- d. Le contrôle de l'application et du respect des règles de gestion (administration)

La gestion des pêches peut se faire sous différentes formes. Elle peut consister en la fixation de règles d'accès aux eaux, souvent par le biais d'instauration d'autorisations de pêche spécifiques à certaines zones de pêche. Elle peut se traduire par un encadrement de l'effort de pêche. Par ce biais, il s'agit par exemple de limiter le nombre de navires sur une zone ou de limiter les captures des navires. La modalité de gestion la plus connue est probablement la fixation de TAC et quotas.

Enfin, la définition de mesures techniques fait aussi partie de la panoplie des outils à disposition des gestionnaires pour encadrer les pêcheries. Les mesures techniques consistent en l'instauration, par exemple, de règles d'utilisation des engins de pêche, de tailles minimales de captures ou de fermeture de zones de pêche. Toutes ces mesures peuvent se combiner entre elles, et faire partie

d'un plan de gestion. On retrouve par ailleurs ces différentes modalités de gestion des pêches dans les « licences » ou « autorisations de pêche » que délivrent l'Etat, les comités des pêches et les OP.

## **2.21. Conclusion**

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont une des manières les plus utilisées pour la compréhension des complexités des systèmes qui nous entourent. Ces systèmes font généralement allure de collection à gros volume de données, relatifs à un domaine (ancien / nouveaux) sinon déduits d'une résolution résultat d'une approche thématique. L'outil SIG reste jusqu'à lors, un outil préféré pour la conception des idées et des simulations des situations selon des stratégies locales ou globales (Tamali, 2013). Les SIG sont devenu donc de plus en plus utilisés, en particulier comme support à la prise de décision dans des problèmes où la dimension spatiale revêt une importance (Sobrie & Joerin, 2013).

Le SIG est aujourd'hui l'outil principal de navigation qui centralise les données produites par l'ensemble du matériel embarqué (radar, sondeur, GPS, AIS...) et les conjugue avec des bases de données de cartographie maritime, côtière ou de rivière. Il informe l'utilisateur de l'état de l'environnement naturel grâce à une visualisation qui fusionne ces différentes informations. Les SIG permettent d'acquérir, de gérer, de manipuler et de transmettre de l'information géographique. L'acquisition de données et les capacités de gestion associées vont ainsi faciliter l'intégration et l'organisation d'un modèle observé de la réalité d'un territoire. Dans un second temps, les SIG vont pouvoir servir de support à différentes analyses spatiales conduisant à une compréhension de ce territoire modélisé et permettre la production de documents, sous différentes formes, rendant compte de ces analyses. L'information ainsi conduite va conduire le ou les gestionnaires à prendre des décisions sur ce territoire, décisions qui vont pouvoir le modifier.

### 3. Chapitre 3 : Télédétection

Les publications se multiplient et permettent de mieux apprécier l'utilité de la télédétection du fait qu'il est devenu une nécessité et un besoin à la fois surtout quand on veut manipuler l'information géographique se trouve dans le contenu de l'imagerie satellitaire.

La télédétection spatiale, s'appuyant sur des mesures au sol et combinée aux systèmes d'informations géographiques, apporte une contribution décisive aux diverses questions que se posent en matière d'environnement, d'aménagement du territoire, d'exploitation rationnelle des ressources naturelles ou de prévention contre les catastrophes naturelles.

Depuis longtemps, la télédétection satellitaire constitue un outil moderne et efficace pour l'étude de l'activité végétale et les différents facteurs qui influencent et celle-ci a permis d'ouvrir de larges perspectives pour des applications thématiques très variées (Minvielle & Souiah, 2003). On entend par télédétection l'acquisition de renseignements concernant un objet ou un événement sur la base de mesures effectuées à distance.

#### 3.1. Historique

Le terme " télédétection " a été inventé en 1960 par Evelyn Pruitt du Bureau de la Recherche Navale des Etats-Unis mais l'histoire de la télédétection remonte bien plus loin, citons par exemple le lancement de Spoutnik I par l'URSS en 1957 a marqué le début de " l'ère aérospatiale".

En 1959, le satellite américain Explorer VI a transmis la première image de la terre vue de l'espace.

Le satellite météorologique TIROS1 a été lancé dans le cadre des études de la végétation et de la détection des maladies des plantes.

En 1973, les Etats-Unis ont lancé une station orbitale, Skylab, qui a reçu des astronautes en 1973 et 1974. Les capteurs utilisés comprenaient deux appareils photographiques, qui ont pris 35,000 photographies, et un radiomètre multi bandes (13 canaux), qui a enregistré 800 km de bande magnétique. Trois ans plus tard l'URSS a lancé la station Soyuz dotée d'un appareil photographique semblable au matériel principal à bord du Skylab.

Les années 80 ont été marquées par une avancée significative au niveau de l'élaboration des techniques et outils de traitement d'images qui a conduit notamment au montage d'un grand nombre de projets basés sur l'utilisation des données spatiales.

L'Afrique se dotait ainsi, dans les années 90, de centres nationaux, sous régionaux et régionaux spécialisés en la matière. (BenKhatra et Essahli, 2005).

### 3.2. Définition

Parmi les nombreuses définitions de la télédétection nous pouvons retenir celles qui se résument essentiellement comme suit :

La télédétection (remote sensing en anglais) est un 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 (Faivre, 2018). La télédétection est la discipline scientifique 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. Elle suppose l'acquisition d'informations (caractéristiques physiques et biologiques) à distance, sans contact direct avec l'objet étudié (Bonnet & Rochon, 1992).

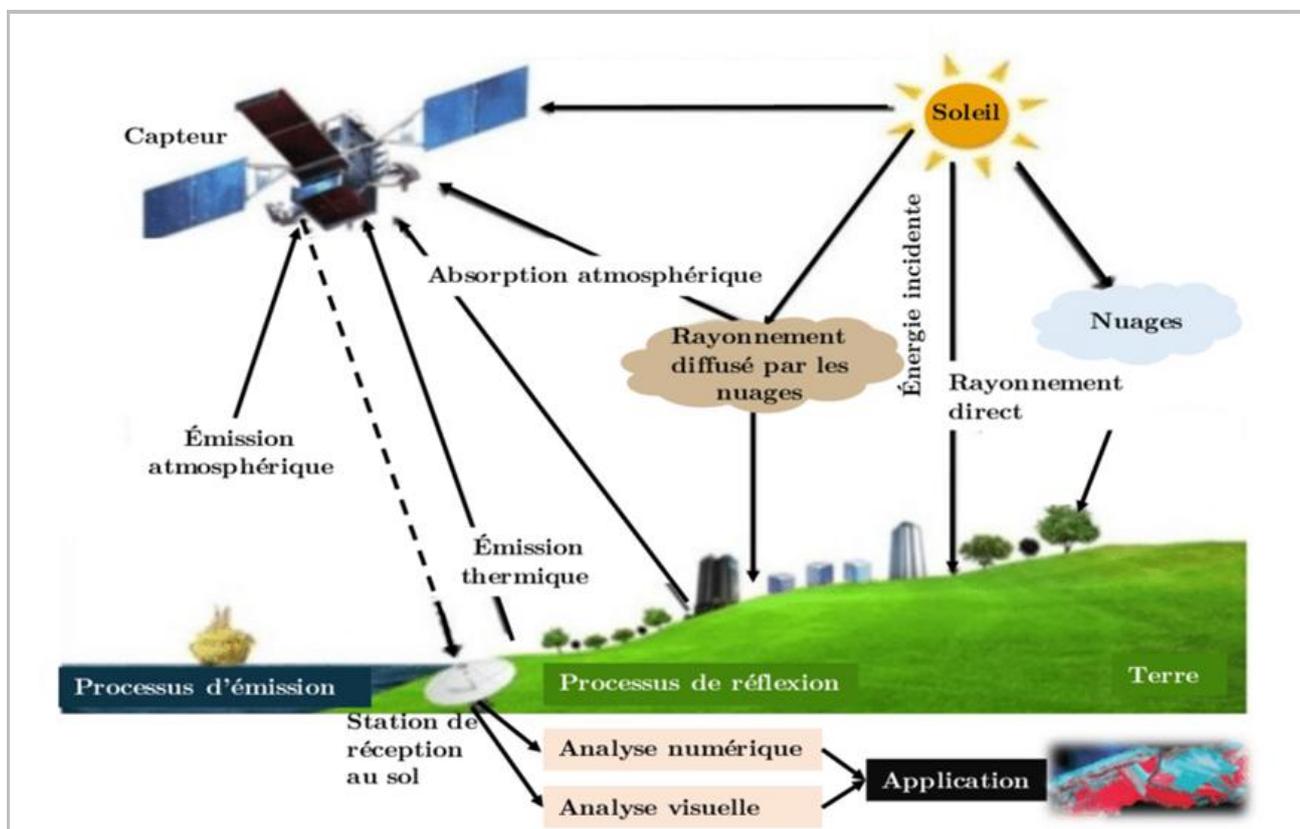


Fig. 45. Principe général de la télédétection

La télédétection est définie comme étant l'ensemble des techniques mises en œuvre à partir d'avions, de ballons ou de satellites qui ont pour but d'étudier soit la surface de la terre ou d'autres planètes, soit l'atmosphère en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques émises, réfléchies ou diffractées par les différents corps observés (Scanvic, 1983).

La télé-détection est un moyen d'appréhender les objets et d'étudier leurs propriétés spectrales. Cela se fait en étudiant les caractéristiques des ondes électromagnétiques réfléchies ou émises par ces objets. Elle est basée sur le principe que chaque objet absorbe, émet, diffuse et réfléchit des rayonnements qui lui sont propres et que l'on peut enregistrer et analyser (Deshayes *et al.*, 1984).

Alors que l'acteur « chercheur » la considère comme étant un outil défini par l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.

### 3.3. Bases physiques et technologiques de la télé-détection

La télé-détection est un moyen d'observation de la terre, par l'étude des rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par les objets au sol. Elle regroupe l'ensemble des techniques de collecte, de traitement et d'interprétation de l'information contenue dans ces rayonnements.

#### 3.3.1. Formes de Télé-détection

Formes de Télé-détection ; formes d'acquisition d'information avec capteurs.

- Par réflexion (a)
- Par émission (b).
- Par émission-réflexion (c).

Le radar permet de localiser une cible en gisement et distance (y compris de nuit ou par mauvaise visibilité). La cible peut être :

- a. Un autre navire en anticollision,
- b. La côte ou un amer en positionnement.

#### 3.3.2. Rayonnement Electromagnétique (REM)

Le soleil émet un rayonnement qui se propage sous forme d'ondes. Ces ondes traversent l'espace puis l'atmosphère avant d'arriver à la surface de la Terre où une part d'entre elles est réfléchi vers l'espace. Ce rayonnement et les différentes ondes qui le composent sont représentés sous la forme d'un spectre électromagnétique. Les ondes sont caractérisées par leurs longueurs d'onde et leurs fréquences (deux grandeurs inversement proportionnelles). On parle par exemple de grandes ondes, de micro-ondes, d'ultraviolet, d'infra-rouge, etc. Dans le spectre visible, chaque couleur perçue par notre œil correspond à un intervalle de longueur d'onde. Le soleil n'est pas la seule source de rayonnement électromagnétique, de nombreuses autres sources émettent des ondes, qu'elles soient visibles ou non. Les domaines d'application du spectre électromagnétique sont nombreux : on utilise les ondes micro-ondes pour chauffer ou cuire des aliments, les rayons X pour les

radiographies médicales, les rayonnements infrarouges émis par les êtres vivants pour observer des animaux de nuit, etc.

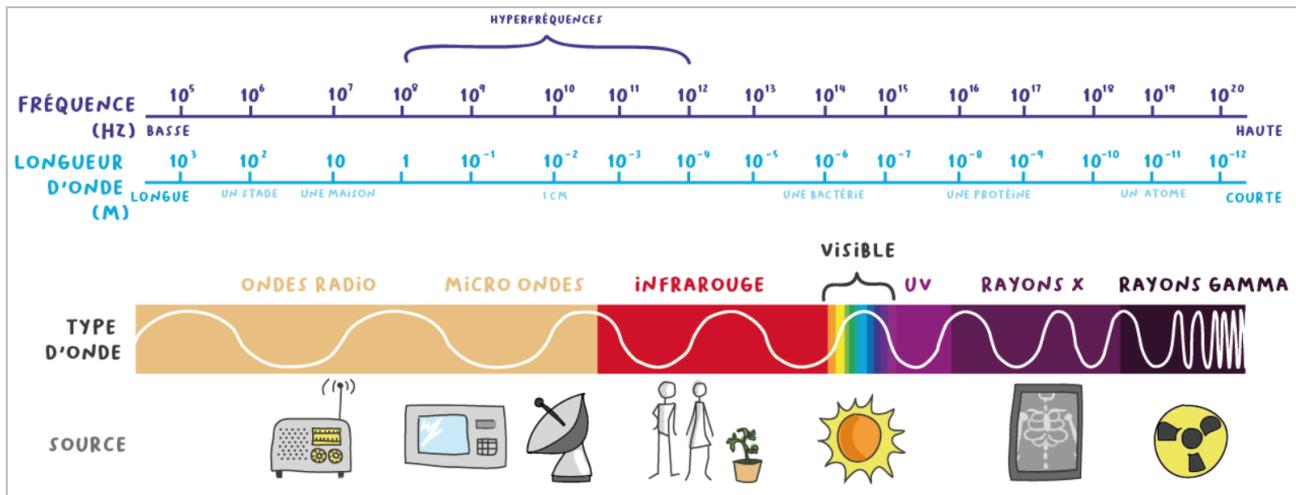


Fig. 46. Spectre électromagnétique

L'interaction entre le rayonnement solaire et les matériaux dépend de la longueur d'onde. Au cours de son trajet entre le Soleil, la Terre puis le capteur, ce rayonnement est (Faivre, 2018) :

- Transmis ; lors de son passage à travers l'atmosphère, le rayonnement est transmis par le milieu. Les capteurs utilisent les bandes spectrales pour lesquelles la transmission du rayonnement par l'atmosphère est importante.
- Absorbé ; le signal parvenant au capteur est modifié au cours de la traversée atmosphérique où le rayonnement est absorbé par les constituants gazeux et les particules en suspension. L'atmosphère est quasi transparente aux rayonnements visibles et proche infrarouge, en revanche les surfaces naturelles absorbent une partie de ces rayonnements.
- Réfléchi ; changement de direction du rayonnement quand il atteint une surface. La direction du rayonnement réfléchi peut varier, elle dépend de la rugosité des surfaces. On distingue ainsi trois types de réflexion (réflexion spéculaire, réflexion diffuse et réflexion de volume).
- Diffusé ; la direction de la propagation du rayonnement est modifiée de manière aléatoire par les molécules et aérosols de l'atmosphère.
- Emis ; après absorption, les particules s'échauffent et réémettent le rayonnement, mais souvent dans une autre longueur d'onde.

Les rayonnements qui nous intéressent dans les échanges radiatifs entre le soleil, le système terre-atmosphère et les satellites s'étendent sur un large spectre des ondes électromagnétique de  $0.35 \mu\text{m}$  à  $1 \text{ m}$ .

Le Rayonnement Electromagnétique (REM) est une énergie qui apparaît sous forme de rayons de lumière visible et invisible, de micro-ondes et d'ondes-radio. Ces formes de REM, qui peuvent initialement apparaître comme des phénomènes séparés, font, en fait partie d'un spectre continu. Le meilleur exemple est celui d'un prisme, qui sépare la lumière blanche en différentes couleurs, dont chacune représente une longueur d'onde lumineuse différente. La lumière visible est la seule partie du REM détectable par l'œil humain. Ce rayonnement électromagnétique considéré comme étant une forme d'énergie ne peut être observée que par son interaction avec la matière.

Selon la théorie des ondes, tout rayonnement électromagnétique possède des propriétés fondamentales et se comporte de façon prévisible. Le rayonnement électromagnétique est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M). Le champ électrique varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement. Le champ magnétique est orienté de façon perpendiculaire au champ électrique. Les deux champs se déplacent à la vitesse de la lumière.

Il est indispensable de saisir les deux composantes du rayonnement électromagnétique que sont la longueur d'onde et la fréquence. La longueur d'onde est équivalente à la longueur d'un cycle d'une onde, ce qui correspond à la distance entre deux crêtes successives d'une onde. La longueur d'onde est représentée habituellement par la lettre grecque lambda ( $\lambda$ ), elle est mesurée en mètres ou en l'un de ces sous-multiples tels que les nanomètres ( $1\text{nm}=10^{-9}$  mètre), micromètres ( $1\mu\text{m}=10^{-6}$  mètre) ou centimètres ( $1\text{cm}=10^{-2}$  mètre). La fréquence ( $\nu$ ) représente le nombre d'oscillations par unité de temps.

La fréquence est mesurée en Hertz (Hz), nombre d'oscillations par seconde, ou en multiple d'Hertz. La formule suivante illustre la relation entre la longueur d'onde et la fréquence :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$\lambda$  : longueur d'onde,

C : vitesse de la lumière,

$\nu$  : fréquence.

La longueur d'onde et la fréquence sont donc inversement proportionnelles, tel que plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée, et plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est basse.

Le spectre électromagnétique représenté par la Fig. 2 s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique.

Les plus petites longueurs d'onde utilisées par la télédétection se situent dans l'ultraviolet. Certains matériaux de la surface terrestre, surtout des roches et minéraux, entrent en fluorescence ou émettent de la lumière visible quand ils sont illuminés par un rayonnement ultraviolet.

La lumière que nos yeux - nos tout premiers "capteurs de télédétection" peuvent déceler se trouve dans ce qui s'appelle "spectre visible". Il est important de constater que le spectre visible représente une petite partie de l'ensemble du spectre. Une grande partie du rayonnement électromagnétique qui nous entoure est invisible à l'œil nu, mais il peut cependant être capté par d'autres dispositifs de télédétection.

Les longueurs d'onde visibles s'étendent de [0.4 à 0.7]  $\mu\text{m}$ . La couleur qui possède la plus grande longueur d'onde est le rouge, alors que le violet a la plus courte longueur d'onde. Les longueurs d'onde du spectre visible que nous percevons comme des couleurs communes sont énumérées ci-dessous. Il est important de noter que c'est la seule portion du spectre que nous pouvons associer à la notion de couleurs.

- a. Violet : 0.4 - 0.446  $\mu\text{m}$
- b. Bleu : 0.446 - 0.500  $\mu\text{m}$
- c. Vert : 0.500 - 0.578  $\mu\text{m}$
- d. Jaune : 0.578 - 0.592  $\mu\text{m}$
- e. Orange : 0.592 - 0.620  $\mu\text{m}$
- f. Rouge : 0.620 - 0.7  $\mu\text{m}$ .

Le bleu, le vert et le rouge sont les couleurs (ou les longueurs d'onde) primaires du spectre visible. Une couleur primaire ne peut être créée par deux autres couleurs, mais toutes les autres couleurs peuvent être créées en combinant les couleurs primaires. Même si nous voyons la lumière du Soleil comme ayant une couleur uniforme ou homogène, en réalité, elle est composée d'une variété de longueurs d'onde dans les parties de l'ultraviolet, du visible, et de l'infrarouge du spectre. La portion visible de ce rayonnement se décompose en ses couleurs composantes.

Lorsqu'elle traverse un prisme. Le prisme réfracte la lumière de façon différente en fonction de la longueur d'onde.

Examinons maintenant la partie de l'infrarouge (IR) du spectre. L'infrarouge s'étend approximativement de  $[0,7 \text{ à } 100] \mu\text{m}$ , ce qui est un intervalle environ 100 fois plus large que le spectre visible. L'infrarouge se divise en deux catégories : IR réfléchi et IR émis ou thermique. Le rayonnement dans la région de l'infrarouge réfléchi est utilisé en télédétection de la même façon que le rayonnement visible. L'infrarouge réfléchi s'étend approximativement de  $[0,7 \text{ à } 3] \mu\text{m}$ . L'infrarouge thermique est très différent du spectre visible et de l'infrarouge réfléchi. Cette énergie est essentiellement le rayonnement qui est émis sous forme de chaleur par la surface de la Terre et s'étend approximativement de  $[3 \text{ à } 100] \mu\text{m}$ . Depuis quelques temps, la région des hyperfréquences, suscite beaucoup d'intérêt en télédétection. Cette région comprend les plus grandes longueurs d'onde utilisées en télédétection et s'étend approximativement de  $[1 \text{ mm à } 1\text{m}]$ . Les longueurs d'onde les plus courtes possèdent des propriétés semblables à celles de l'infrarouge thermique, tandis que les longueurs d'onde les plus grandes ressemblent aux ondes radio.

### 3.3.3. Sources d'énergie électromagnétique

Les expériences en télédétection ont montré que les objets ont des comportements spécifiques dans les différentes longueurs d'ondes, en fonction de leurs propriétés physiques, chimiques et morphologiques.

En observation de la Terre on peut exploiter :

- a. Des ondes émises par le soleil puis réfléchies par la surface de la Terre et enregistrées par un capteur placé sur un satellite,
- b. Des ondes émises par un émetteur artificiel placé sur le satellite puis réfléchies par la surface de la Terre et enregistrées par un capteur placé sur ce même satellite.

Dans le premier cas on parle de télédétection passive et d'images optiques, dans le second cas de télédétection active et d'images radar. La télédétection radar présente l'avantage de :

- a. S'affranchir des contraintes de couverture (les ondes émises par les satellites traversent les nuages).
- b. Pouvoir acquérir des images de jour comme de nuit.

En revanche, leur exploitation pour l'observation de la Terre est moins intuitive et une expertise est nécessaire pour interpréter des images qui ressemblent bien moins à une photo que les images optiques. Ainsi, différents domaines spectraux sont exploités en télédétection optique (longueurs d'onde du visible à l'infrarouge) et en télédétection radar (micro-ondes ou plus couramment appelées hyperfréquences dans le domaine de la télédétection).

Chaque élément de la surface de la terre peut d'une part absorber, transmettre ou réfléchir les rayonnements envoyés par une source électromagnétique naturelle (télédétection passive) ou

artificielle (téledétection active) et d'autre part il peut émettre ses propres rayonnements, en particulier dans l'infrarouge thermique.

Deux techniques de téledétection peuvent être distinguées : les techniques passives, où l'on se contente d'enregistrer l'énergie naturelle émise ou réfléchiée par les corps et, d'autre part les techniques actives, où l'on « éclaire » les corps à étudier avant d'enregistrer l'énergie qu'ils renvoient vers le détecteur.

Deux types de capteurs existent en téledétection, les capteurs actifs et les capteurs passifs. Les capteurs actifs utilisent la réflexion des ondes émises par le satellite, alors que les capteurs passifs utilisent la réflexion des rayons solaires. La téledétection est dite passive quand le capteur n'émet aucune énergie (par ex. capteur optique passif avec les canaux Rouge, Vert, Bleu), et active lorsque le capteur émet sa propre source d'énergie avant réception (par ex. capteur *Radio Detection and Ranging (RADAR)* en bandes L, C, ou X (Herbreteau *et al.*, 2018).

### 3.3.3.1. Sources naturelles

Les rayonnements qui nous intéressent dans les échanges radiatifs entre le soleil, le système terre-atmosphère et les satellites s'étendent sur un large spectre des ondes électromagnétique de  $0.35 \mu\text{m}$  à 1 m.

Le capteur embarqué sur l'engin spatial est un appareil qui détecte les rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis et les convertit en une valeur physique qui peut être enregistrée et traitée. Les capteurs passifs, qui enregistrent le REM réfléchi ou émis à partir de sources naturelles. Ils mesurent la radiation produite naturellement (l'énergie solaire renvoyée, soit l'énergie terrestre émise). Le corps noir est le radiateur parfait, car il émet toute l'énergie absorbée. Le rayonnement du soleil correspond à peu près à celui du corps noir. La terre représente aussi une source d'énergie qui émet essentiellement dans l'infrarouge lointain. Tous les objets se trouvant sur la surface de la terre émettent des radiations lorsque leur température est supérieure à  $-273 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Pendant la construction des capteurs, on assortit autant que possible les détecteurs de la sensibilité. Comme celle-ci se modifie peu à peu avec le temps, il arrive qu'un détecteur devient plus ou moins sensible à la radiance qu'un autre. En conséquence, la même cible sera représentée avec des luminosités différentes par des détecteurs à sensibilités différentes. Les données auxiliaires du capteur sont utilisées au stade de prétraitement (au sol) pour corriger le défaut d'image.

Principales zones ou bandes spectrales employées dans les mesures de téledétection

Ondes non visibles

- $0,35 - 0,40 \mu\text{m}$  (ultraviolet),

- 0,70 - 0,90  $\mu\text{m}$  (proche infrarouge).

L'infrarouge est un rayonnement électromagnétique ; il possède toutes les propriétés fondamentales de la lumière : propagation, réflexion, réfraction, interférences, diffraction, diffusion, polarisation, etc. Il est situé dans une région spectralement invisible à l'œil humain, entre visible et les micro-ondes ; ses longueurs d'onde sont supérieures à celles des radiations rouges ( $\lambda \geq 0,72 \mu\text{m}$ ) et on peut leur fixer une limite supérieure qui est voisine de 0,1 cm. Le domaine de l'infrarouge est divisé en PIR (proche infrarouge), IRM (infrarouge moyen), IRT (infrarouge thermique), IRL (infrarouge lointain).

#### Le Proche infrarouge

Le proche infrarouge (0,7 à 1,6)  $\mu\text{m}$ , est la partie du spectre électromagnétique qui vient juste après le visible (couleur rouge). Comme pour le visible, ce que le radiomètre (instrument de mesure à distance) mesure dans le proche infrarouge, c'est une luminance correspondant au rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre. Ce domaine du spectre électromagnétique est très utilisé en télédétection pour différencier les surfaces naturelles qui se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance à cette longueur d'onde. Il permet également l'étude des surfaces continentales, et notamment de distinguer les surfaces végétatives des surfaces minérales car les surfaces couvertes par la végétation se distinguent par une forte réflectance dans les longueurs d'onde du proche infrarouge, alors qu'elles réfléchissent peu le rayonnement dans le visible.

#### L'Infrarouge moyen

L'infrarouge moyen (1,6 à 4)  $\mu\text{m}$ , permet de façon générale d'étudier les teneurs en eau des surfaces. Il est très utilisé en agriculture et en foresterie, notamment pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique. L'atmosphère est en grande partie opaque aux rayonnements du moyen infrarouge qui sont absorbés par la vapeur d'eau. Seules quelques fenêtres atmosphériques permettent la transmission du rayonnement. Elles sont centrées sur les longueurs d'onde 2,5 $\mu\text{m}$ , 3,5 $\mu\text{m}$  et 5 $\mu\text{m}$ .

#### L'Infrarouge thermique

Dans ce domaine spectral (4 à 15)  $\mu\text{m}$ , le rayonnement dépend des propriétés d'émissivité des surfaces, et les capteurs satellitaires mesurent la température apparente des objets. En effet une partie du rayonnement visible et proche infrarouge parvenant à la surface de la Terre est absorbée par les objets, puis réémise sous forme de chaleur à une longueur d'onde plus grande.

#### Téledétection dans l'infrarouge thermique

Plusieurs systèmes de téledétection multi spectraux (MSS) captent la radiation infrarouge (ou thermique) ainsi que le visible et l'infrarouge réfléchi. Cependant, la détection de l'énergie infrarouge émise par la terre (entre 3 et 15 microns) demande une technique différente de la technique utilisée pour capter l'énergie infrarouge réfléchi. Les capteurs infrarouges thermique (ou capteurs thermiques) utilisent des photos détectrices dont la surface est sensible au contact des photons infrarouges émis par la terre. Ces détecteurs sont refroidis à des températures très basses (près du zéro absolu), de façon à limiter leur propre émission d'infrarouge thermique. Les capteurs thermiques mesurent essentiellement la température de surface et les propriétés thermiques de la cible.

Les systèmes de détection thermique sont des capteurs à balayage perpendiculaire à la trajectoire, qui captent la radiation émise dans la portion infrarouge thermique du spectre d'énergie. Ces systèmes utilisent une ou plusieurs références internes (corps noir) de température pour étalonner la radiation détectée. De cette façon, les capteurs thermiques peuvent déterminer la température absolue de la radiation captée. Afin d'analyser une image de température radiative relative (avec un thermo gramme), on affiche en différents niveaux de gris, les températures chaudes en fond pâles, et les températures froides en fond foncés. Les images qui montrent les températures relatives à chacun pixel (plus petit élément d'un nuage satellitaire correspondant à une surface donnée de la cible observée) sont suffisantes pour la plupart des besoins. La température absolue peut être calculée, mais elle demande un étalonnage précis, une mesure de température de référence et une connaissance approfondie des propriétés thermiques des cibles, de la distorsion géométrique et des effets radiométriques est nécessaire.

#### L'émission thermique

Tout corps dont la température thermodynamique (T) est supérieure à 0 K (-273,16°C) est une source de rayonnement thermique. Ce rayonnement est directement associé à l'agitation des particules constituant la matière. De ce fait, il est qualifié de 'thermique', car la température est une mesure de l'énergie cinétique interne du milieu. L'intensité de ce rayonnement est modélisée de manière exacte pour les corps 'parfaits' appelés corps noirs.

#### **L'Infrarouge lointain**

L'infrarouge lointain (15 à 100)  $\mu\text{m}$ , n'est utilisé ni pour l'observation de la terre, ni pour l'étude de l'atmosphère, mais pour étudier la formation des galaxies et des étoiles. Les détecteurs, appelés bolomètres utilisent cette gamme de longueurs d'onde pour mesurer l'intensité du rayonnement infrarouge émis par les corps célestes.

#### Ondes visibles

- 0,40 – 0,70 um (visible),

L'œil humain ne peut voir que la synthèse des trois bandes suivantes :

1. 0,40 – 0,50 um (bleu),
2. 0,50 – 0,60 um (vert –jaune),
3. 0,60 – 0,70 um (rouge).

Les techniques de la télédétection se différencient les unes des autres par le type de vecteur (drone, ballon, avion ou satellite), le mode d'acquisition (analogique ou numérique), la résolution spatiale, la gamme spectrale utilisée et la surface observée. Ces techniques sont actuellement au nombre de quatre :

1. La photographie aérienne ou spectrale,
2. La télédétection multi spectrale visible,
3. La télédétection thermique,
4. La radar graphie (Lidar, ...etc.).

### 3.3.3.2. Sources artificielles

Les bandes des capteurs Radar sont ainsi peu ou très peu sensibles aux conditions atmosphériques à la différence des capteurs optiques pour lesquels les nuages, en particulier, masquent le sol. Dans le cas des capteurs Radar, on mesure la part retransmise (rétrodiffusée) par les objets tout en mesurant le temps de trajet des ondes et les changements éventuels de polarisation de l'onde émise (Herbretau *et al.*, 2018). Les capteurs actifs peuvent émettre ses propres rayonnements ou énergies artificielles on parle télédétection active ou radar.

Les sources d'énergies sont constituées par différents appareils tels que les lasers et les radars. Elles permettent la production artificielle d'un rayonnement et l'enregistrement du signal réfléchi par la surface visée. Les capteurs actifs se composent d'un émetteur, qui est la source du rayonnement, et d'un détecteur qui mesure le rayonnement de retour de la surface observée. Le capteur actif le plus utilisé en télédétection est le radar imageur à visée latérale. Le grand avantage du radar est d'utiliser des longueurs d'ondes très grandes, entre 0,8 cm et 1 m, pour lesquelles l'atmosphère, y compris les nuages, est complètement transparente ; les radars sont des capteurs « tous temps », particulièrement intéressants dans les régions du monde où la nébulosité est très fréquente, et pour les applications qui nécessitent d'obtenir des images à des dates et heures bien déterminées (Kergomard, 1990). Les caractéristiques générales des longueurs d'ondes et fréquences radar utilisées en télédétection sont résumées dans le Tab.1 suivant :

Tab. 2. Longueurs d'ondes et fréquences radar utilisées en télédétection (d'après Sabins, 1978).

Désignation de Bande	$\lambda$ :Longueur d'ondes (cm)	Fréquence Mégahertz (10 <sup>6</sup> cycles/sec)
Ka (0, 86 cm *)	0,8 à 1,1	40,000 à 26.500
K	1,1 à 1,7	26,500 à 18.000
Ku	1,7 à 2,4	18,000 à 12.500
X (3 et 3, 2 cm *)	2,4 à 3,8	12,500 à 8.000
C	3,8 à 7,5	8,000 à 4.000
S	7,5 à 15,0	4,000 à 2.000
L (25 cm *)	15,0 à 30,0	2,000 à 1.000
P	30,0 à 100,0	1,000 à 300

(\*) Indique les longueurs d'ondes utilisées généralement avec les radars imageurs

Dans les conditions nuageuses qui font obstacle aux moyens de télédétection conventionnels, la fiabilité de l'acquisition des données prend plus d'importance que la résolution ou la fréquence. Un capteur actif est peut-être la seule source possible de donner et sa fiabilité facilitera la régularité de la surveillance. Le radar est tout indiqué pour ce rôle et un capteur aéroporté suffit pour les exigences de haute résolution telle que la distinction du couvert. Ce type de données peut être utilisé pour une carte initiale, et les données à faible résolution pourront servir aux mises à jour de cette carte. Les capteurs RSO tel Radarsat sont plus utiles dans les cas où les couches nuageuses persistent et limitent l'utilité des capteurs optiques.

L'interprétation du type de couvert forestier avec des données radars est très similaire à l'interprétation d'images multi spectrales. Les mêmes éléments d'interprétation sont utilisés (ton, texture, forme, motif, grandeur, association), mais la texture joue un rôle de première importance dans la distinction des différents types de forêts. La visualisation des images en stéréo aide à différencier la hauteur relative des arbres et à définir les rivières qui ont une végétation spécifique sur leurs rivages.

Les résultats expérimentaux (tests portés sur deux espèces résineuses : Pin maritime et Pin noir d'Autriche) obtenus avec le capteur Hutsat (bande X 2,1 cm et bande C 5,6 cm) par Martinez

(2000), montrent qu'on peut estimer la hauteur des arbres avec une précision absolue de l'ordre du mètre, comme on peut déduire de ces estimations d'autres variables tel que le volume de bois sur pied et l'indice de fertilité locale.

Des données de l'image Radarsat ont montrés que les plantations d'Eucalyptus d'Algorta (Uruguay en 1998) présentaient une tonalité plus brillante et une texture plus grossière que les plantations de pins, ce qui permet la classification des espèces. Les images de Radarsat ont considérablement facilité la classification des espèces forestières, notamment la distinction entre les plantations d'eucalyptus et les plantations de pins qui génèrent beaucoup de confusion lorsque la classification est faite à partir de données optiques.

Les résultats préliminaires ont démontré que les images Radarsat sont aussi très utiles pour la détection de nouvelles plantations forestières ; ce qui permet, avec l'aide des cartes d'utilisation des sols d'obtenir une mise à jour rapide des activités de reboisement.

L'information polarimétrique (données acquises par l'antenne RSO) rehausse fortement la distinction entre les espèces forestières lors des conditions de feuillaison et de défeuillaison ; et permet la démonstration de l'effet significatif de l'angle d'illumination RSO sur le mécanisme de diffusion des forêts (Touzi, 2004).

La transparence de l'atmosphère aux micro-ondes ou hyperfréquences permet au radar d'acquérir les données quelques soient les conditions climatiques. Les micro-ondes pénètrent les nuages et ne sont diffusées ni par la brume ni par la pluie.

Les capteurs actifs (radar, Sonar, ...etc.) peuvent illuminer un objet avec leur propre source de radiation. L'illumination peut soit induire un objet à émettre une radiation (fluorescence), soit lui faire réfléchir la radiation produite par le capteur. Les capteurs actifs sont souvent utilisés quand la radiation naturelle dans une bande particulière du spectre n'est pas suffisante pour illuminer convenablement la cible, autrement dit quand elle est au-dessous du seuil signal-bruit.

### **3.4. Interaction du REM avec l'atmosphère**

Avant que le rayonnement, qui sera utilisé pour la télétection, atteigne la surface de la Terre, celui-ci doit traverser une certaine épaisseur d'atmosphère. Les particules et les gaz dans l'atmosphère peuvent dévier ou bloquer le rayonnement incident. Ces effets sont causés par les mécanismes de diffusion et d'absorption.

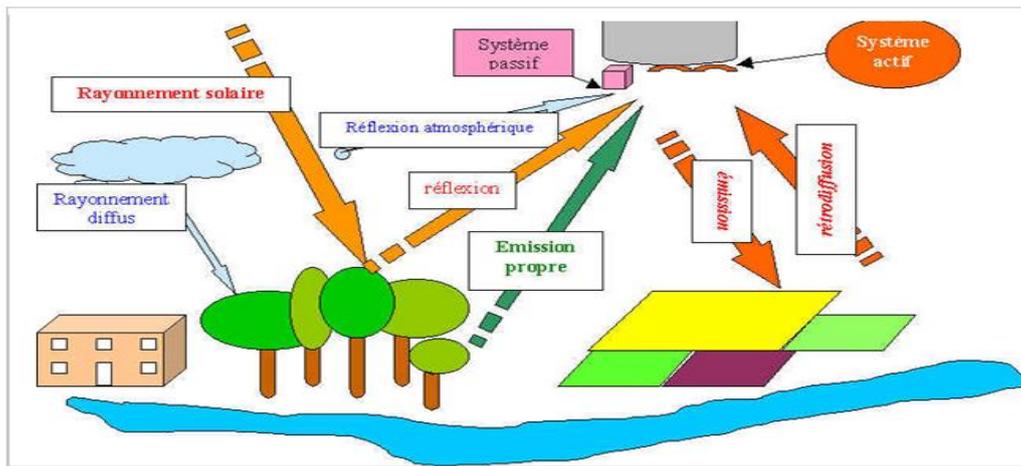


Fig. 47. Schéma d'interaction du REM avec l'atmosphère et la cible (terre)

#### a. Diffusion

La diffusion se produit par interaction entre le rayonnement incident et les particules ou les grosses molécules de gaz présentes dans l'atmosphère. Les particules dévient le rayonnement de sa trajectoire initiale. Le niveau de diffusion dépend de plusieurs facteurs comme la longueur d'onde, la densité de particules et de molécules, et de l'épaisseur de l'atmosphère que le rayonnement doit franchir.

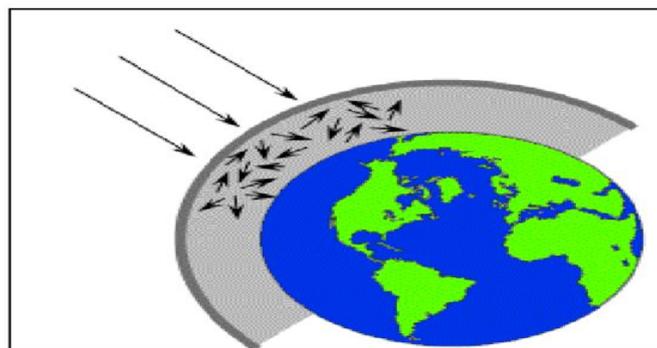


Fig. 48. Diffusion des ondes électromagnétiques

Il existe trois types de diffusion :

#### ➤ Diffusion de Rayleigh

Elle se produit lorsque la taille des particules est inférieure à la longueur d'onde du rayonnement. Celles-ci peuvent être soit des fines particules d'aérosols ou des molécules d'azote ou d'oxygène. La diffusion de Rayleigh disperse et dévie de façon plus importante les courtes longueurs d'onde que les grandes longueurs d'onde. Cette forme de diffusion est prédominante dans les couches supérieures de l'atmosphère. Ce phénomène explique pourquoi nous percevons un ciel bleu durant la journée. Comme la lumière du Soleil traverse l'atmosphère, les courtes longueurs d'onde

(correspondant au bleu) du spectre visible sont dispersées et déviées de façon plus importante que les grandes longueurs d'onde. Au coucher et au lever du Soleil, le rayonnement doit parcourir une plus grande distance à travers l'atmosphère qu'au milieu de la journée. La diffusion des courtes longueurs d'onde est plus importante. Ce phénomène permet à une plus grande proportion de grandes longueurs d'onde de pénétrer l'atmosphère.

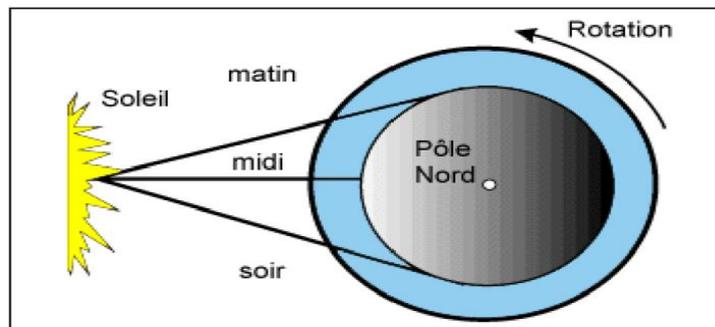


Fig. 49. Trajet optique au coucher et lever du Soleil

➤ Diffusion de Mie

Lorsque les particules sont presque aussi grandes que la longueur d'onde du rayonnement. Ce type de diffusion est souvent produit par les particules de poussière, le pollen, la fumée et les gouttelettes d'eau. Ce genre de diffusion affecte les plus grandes longueurs d'onde et se produit surtout dans les couches inférieures de l'atmosphère où les grosses particules sont plus abondantes. Ce processus domine quand le ciel est ennuagé.

➤ Diffusion non-sélective

Ce genre de diffusion se produit lorsque les particules (les gouttes d'eau et les grosses particules de poussière) sont beaucoup plus grosses que la longueur d'onde du rayonnement. Nous appelons ce genre de diffusion "non-sélective", car toutes les longueurs d'onde sont dispersées. Les gouttes d'eau de l'atmosphère dispersent le bleu, le vert, et le rouge de façon presque égale, ce qui produit un rayonnement blanc (lumière bleue + verte + rouge = lumière blanche). C'est pourquoi le brouillard et les nuages nous paraissent blancs.



Fig. 50. Diffusion non-sélective

#### b. Absorption

Ce phénomène entre en jeu lorsque le rayonnement électromagnétique interagit avec l'atmosphère. L'absorption survient lorsque les grosses molécules de l'atmosphère (ozone, dioxyde de carbone et vapeur d'eau) absorbent l'énergie de diverses longueurs d'onde.

L'ozone absorbe les rayons ultraviolets qui sont néfastes aux êtres vivants. Sans cette couche de protection dans l'atmosphère, notre peau brûlerait lorsqu'elle est exposée au Soleil.

Le dioxyde de carbone est un gaz qui contribue à l'effet de serre. Ce gaz absorbe beaucoup de rayonnement dans la portion infrarouge thermique du spectre et emprisonne la chaleur dans l'atmosphère.

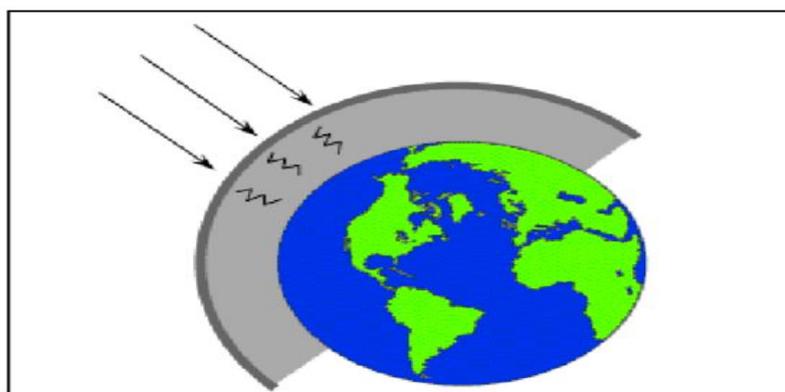


Fig. 51. Absorption des rayonnements dans l'atmosphère

La vapeur d'eau dans l'atmosphère absorbe une bonne partie du rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'onde et les hyperfréquences de petites longueurs d'onde qui entrent dans l'atmosphère (entre  $22\mu\text{m}$  et  $1\text{m}$ ). La présence d'eau dans la partie inférieure de l'atmosphère varie grandement d'un endroit à l'autre et d'un moment à l'autre de l'année. Par exemple, une masse d'air au-dessus d'un désert contient très peu de vapeur d'eau pouvant absorber de l'énergie, tandis qu'une masse d'air au-dessus des tropiques contient une forte concentration de vapeur d'eau. Parce que ces gaz et ces particules absorbent l'énergie électromagnétique dans des régions spécifiques du spectre, ils

imposent le choix de longueurs d'onde utilisées en téledétection. Les régions du spectre qui ne sont pas influencées de façon importante par l'absorption atmosphérique, et qui sont donc utiles pour la téledétection, sont appelées fenêtres atmosphériques.

Les effets atmosphériques dépendent de facteurs tels que la longueur du trajet, les longueurs d'ondes observées et les variations quotidiennes des conditions atmosphériques. Dans le cas de l'énergie réfléchie, l'atmosphère intervient aussi bien entre la source de lumière et la cible, qu'entre la cible et le capteur. En ce qui concerne les longueurs d'ondes émises, la situation est plus simple parce que la cible est la source de lumière. Cette énergie absorbée par l'atmosphère est ensuite réémise, généralement sous forme de chaleur.

La quantité d'énergie émise est fonction de la température et de l'émissivité du matériau. Etant donné que l'énergie émise par la terre est la plus importante dans la région infrarouge thermique et que l'émissivité de l'eau est essentiellement constante dans cette gamme. Les mesures infrarouges, pourvues qu'elles soient calibrées, permettent de déterminer les températures de la surface de l'eau avec un degré raisonnable de précision.

### **3.5. Interaction du REM avec la cible (Terre-mer-océan)**

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la Terre. Lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber (A) l'énergie, transmettre (T) ou réfléchir (R). L'énergie incidente totale interagira avec la surface selon l'une ou l'autre de ces trois modes d'interaction, ou selon leur combinaison. La proportion de chaque interaction dépendra de la longueur d'onde de l'énergie, ainsi que de la nature et des conditions de la surface.

L'absorption se produit lorsque l'énergie du rayonnement est absorbée par la cible, la transmission lorsque l'énergie du rayonnement passe à travers la cible et la réflexion lorsque la cible redirige l'énergie du rayonnement. En téledétection, nous mesurons le rayonnement réfléchi par une cible. La réflexion spéculaire et la réflexion diffuse représentent deux modes limites de réflexion de l'énergie.

#### ✓ Réflexion spéculaire

Une surface lisse produit une réflexion spéculaire, c'est-à-dire que toute l'énergie est redirigée dans une même direction. Pour qu'une réflexion spéculaire puisse avoir lieu, il faut que les rugosités de la surface du corps soient plus petites que la longueur d'onde incidente. Dans le domaine du spectre solaire (0.4 à 2 $\mu$ m), la réflexion est donc de type spéculaire sur des surfaces lisses.

#### ✓ Réflexion diffuse

La réflexion diffuse se produit quand la surface est rugueuse, ce qui redirige l'énergie non uniformément dans les différentes directions. La plupart des objets de la surface terrestre se situent entre ces deux extrêmes.

La façon dont une cible réfléchit le rayonnement dépend de l'amplitude de la rugosité de la surface par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident. Si la longueur d'onde du rayonnement est beaucoup plus petite que la rugosité de la surface ou que la grosseur des particules qui composent la surface, on a la réflexion diffuse.

Examinons quelques exemples de cibles de la surface de la Terre et voyons comment l'énergie aux longueurs d'onde visible et infrarouge interagit avec celles-ci.

### **3.6. Capteurs de téledétection**

Un capteur est un appareil qui détecte les rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis et les convertit en une valeur physique qui peut être enregistrée et traitée. Les capteurs peuvent être divisés en capteurs passifs et actifs.

#### **3.6.1. Capteurs passifs**

Capteurs passifs, qui enregistrent le REM réfléchi ou émis à partir de sources naturelles (Soleil, surface terrestre, atmosphère). Ils mesurent la radiation produite naturellement (l'énergie solaire renvoyée, soit l'énergie terrestre émise).

Pendant la construction des capteurs, on assortit autant que possible les détecteurs de la sensibilité. Comme celle-ci se modifie peu à peu avec le temps, il arrive qu'un détecteur devient plus ou moins sensible à la radiance qu'un autre. En conséquence, la même cible sera représentée avec des luminosités différentes par des détecteurs à sensibilités différentes. Les données auxiliaires du capteur sont utilisées au stade de prétraitement (au sol) pour corriger ce défaut d'image.

Les capteurs mesurent la radiance, ce qui correspond à la brillance de la surface dans la direction du capteur. On parle souvent plutôt de réflectance, c'est-à-dire le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement solaire incident sur la surface (Faivre, 2018). Un capteur comporte trois éléments constitutifs : un système optique, un filtre spectral et un détecteur. Le système optique fixe l'angle instantané de prise de vue, le filtre spectral (ou les filtres spectraux) définit le domaine spectral de la mesure et le détecteur transforme le signal physique en informations utilisables pour l'utilisateur. Un capteur donné peut détecter le REM seulement sur une gamme limitée de longueurs d'ondes, dite bande spectrale. La largeur de la bande spectrale, c'est-à-dire l'étendue de la gamme réduite aux longueurs d'ondes détectées, est dénommée résolution spectrale. Certains capteurs comprennent un certain nombre de détecteurs dont chacun est sensible à une bande spectrale différente. Ces capteurs

s'appellent capteurs multispectraux ou multi-bandes. Quand nous observons la terre dans deux ou plusieurs bandes simultanément, il est possible de distinguer une plus large gamme de caractéristiques. L'ensemble des réponses types émanant d'une cible spécifique vue par un capteur dans différentes bandes spectrales, constitue la signature spectrale de cette cible.

La base de la télédétection est axée sur les dispositifs d'enregistrement de ces rayonnements électromagnétiques à savoir les capteurs portés sur les plates formes, vecteurs ou navettes spatiales. Les capteurs constituent l'ensemble des moyens assurant la transformation des informations recueillies en données facilement assimilables pour l'interprétation. Ils enregistrent des luminances provenant de la terre et qui renferment les informations sur les caractéristiques de la surface réfléchissante, les facteurs atmosphériques et la géométrie du système (Soleil - Cible - Capteur).

Utiliser un capteur sensible à de petites variations dans les valeurs de réflectance, dite d'une bonne résolution radiométrique. Ces techniques peuvent également servir à détecter des variations ou des changements à l'intérieur d'un type donné de matériau.

Tab. 3. Caractéristiques générales de quelques capteurs optiques (d'après Faivre, 2018)

Capteur	Résolution (m)	Bandes spectrales	Fauchée (km)	
Sentinel 2	MS : 10, 20, 60	B, V, R, PIR (10m)	290 x 290	MS : Multi-spectral PAN : Panchromatique  RVB : Rouge Vert Bleu PIR : Proche Infra-Rouge MIR : Moyen Infra-Rouge CA : Côtier/Aérosol
SPOT 5	Pan : 2,5 MS : 10	V, R, PIR, MIR	60 x 60	
SPOT 6 & 7	Pan : 1,5 MS : 6	B, V, R, PIR	60 x 60	
Pléiades	Pan : 0,5 MS : 2	B, V, R, PIR	20 x 20	
Worldview-4	Pan : 0,31 MS : 1.24	B, V, R, PIR	13 x 13	
Landsat 8	Pan : 15 MS : 30	CA, B, V, R, PIR, MIR	185 x 180	

### 3.6.2. Capteurs actifs

Capteurs actifs, qui illuminent un objet avec leur propre source de rayonnement (radars, lidars) et enregistrent "l'écho". Ils transmettent la radiation pour illuminer la surface et pour recevoir et mesurer la quantité de radiation qui est réfléchi.

Tab. 4. Caractéristiques générales des bandes de fréquences radar

Bande de fréquence	Intervalle de fréquence (Ghz)	Intervalle longueur d'onde (Cm)
Bande P	0.22 - 0.39 Ghz	140 - 76.3 cm
Bande L	0.39 - 1.55 Ghz	76.9 - 19.3 cm
Bande S	1.55 - 4.20 Ghz	19.3 - 07.10 cm
<b>Bande C</b>	<b>4.20 - 5.75 Ghz</b>	<b>7.10 - 5.20 cm</b>

Bande X	5.75 - 10.90 Ghz	5.20 - 2.75 cm
Bande K	10.90 - 36.00 Ghz	2.70 - 0.83 cm

La bande C la plus utilisée par les satellites ERS et Envisat, car la valeur de longueur d'onde comprise entre 7,10 et 5.20 cm leur permet de pénétrer et traverser le couvert nuageux au niveau de la couche composée de l'ozone (O3) donc l'atténuation atmosphérique est nulle ou relativement faible. La valeur de la bande C permet aussi à l'onde émise par le *Radio Detecting And Ranging* (RADAR) de traverser au niveau de la cible (forêt) le feuillage, les troncs et le sous-sol sous les arbres.

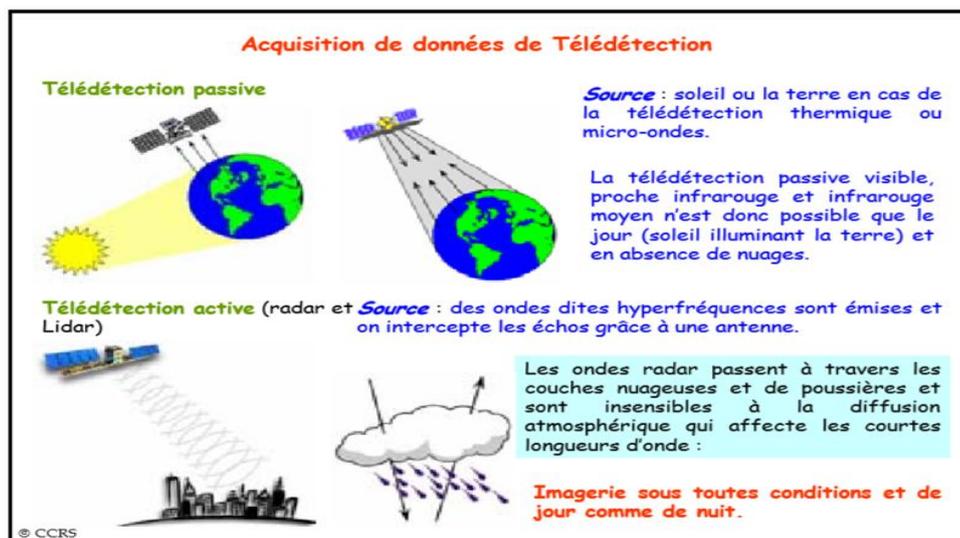


Fig. 52. Télédétection passive et active

### 3.7. Notions de résolution

Lorsque l'on prend une photographie classique, l'information est traduite par des formes et des couleurs, qui correspondent à des groupes de pixels plus ou moins homogènes. Sur une même scène photographiée prise par deux appareils, plus les **pixels** seront nombreux dans l'image plus la **résolution spatiale** sera élevée. On le voit aisément lorsque l'on souhaite faire un agrandissement et que l'on voit apparaître les pixels en zoomant sur une image.

La résolution fait appel à la notion du pixel. Le pixel étant la plus petite surface distinguée par le capteur. Par exemple, le satellite Landsat *Thematic Mapper* (TM) distingue des surfaces d'à peine 30m × 30m. Depuis 1972, les progrès dans ce domaine sont remarquables : on est passé d'une résolution de 80 m (MSS de Landsat), à 30 m (*Thematic Mapper*) et à 20 et 10 m (SPOT) (Kergomard, 1990) et actuellement à 10 m avec Sentinel. Il existe trois types de résolutions.

#### 3.7.1. Résolution spatiale

La résolution spatiale est la taille du plus petit élément qu'il est possible de distinguer sur l'image. Elle est également couramment définie comme étant la taille du pixel. Sur une image, les objets qu'il sera possible de discerner dépendront de la résolution spatiale du capteur utilisé. Généralement, plus la résolution spatiale augmente, plus la superficie de la surface visible par le capteur diminue : une image très haute résolution couvrira une portion de territoire plus restreinte qu'une image moyenne résolution. Au moment du choix des images à traiter, il convient donc de choisir le bon compromis selon la taille des objets les plus petits que l'on veut observer, et l'échelle à laquelle on souhaite observer un processus.

La résolution spatiale d'une image satellite est la taille de la zone couverte par un pixel. Chaque pixel de l'image correspond à une partie de la surface de la terre. La résolution spatiale dépend de la taille des détecteurs, du miroir, de la distance focale et de l'altitude de vol. Une résolution fine permet de distinguer des objets de petite taille (Faivre, 2018).

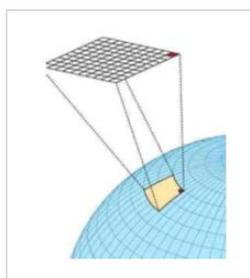


Fig. 53. Exemple de résolution spatiale (d'après Faivre, 2018)

La télédétection produit des indicateurs dont la précision dépend de la résolution spatiale des capteurs utilisés (Forman *et al.*, 2016). La résolution spatiale correspond à la dimension des pixels qui constituent les éléments de base d'une image (Stéphanie *et al.*, 2011).

En règle générale, plus la résolution spatiale de l'image est grande (taille du pixel plus petite), plus la surface couverte par l'image est faible (Charrier *et al.*, 2016).

Une résolution spatiale de 10 à 30 m semble adéquate pour la cartographie du couvert forestier, l'identification, la surveillance des coupes à blanc, la cartographie des zones en feu ou brûlées, la collecte de l'information des récoltes forestières et l'identification des dommages subis par les forêts.

### 3.7.2. Résolution spectrale

Dans une image satellitaire, l'information sur les couleurs est décomposée en différents **canaux ou bandes spectrales**. Chaque bande est une image en niveaux de gris, composée de pixels ayant chacun une valeur de réflectance pour un intervalle de longueur d'ondes donné. On parle ainsi de "bande du bleu", du "rouge, du proche infrarouge", etc. Chaque bande va couvrir une portion plus

ou moins large du spectre électro magnétique. Par exemple, la bande du bleu correspond à des longueurs dans un intervalle autour de 480 nm, celle du rouge autour de 600 nm.

Bande spectrale (Canal spectral) ; chaque bande spectrale est une image raster en niveau de gris qui représente les valeurs de réflectance des surfaces au sol pour un intervalle de longueurs d'ondes donné.

Signature spectrale ; lorsqu'elles sont soumises à une source d'énergie, différentes cibles ont différents comportements. La variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde est appelée signature spectrale.

L'œil ne voit que le visible. En plus du visible, certains satellites optiques sont capables de capter un rayonnement hors du visible (ex : infrarouge). Le rayonnement est capté par bande : une image satellite est composée d'une ou plusieurs bandes, correspondant chacune à un intervalle spectral. La résolution spectrale correspond au nombre et caractéristiques des bandes dans lesquelles le satellite observe (Faivre, 2018).

La résolution spectrale d'un capteur est son aptitude à différencier les longueurs d'ondes du spectre électromagnétique. Elle fait référence au détail perceptible dans une image. La résolution spectrale fait référence à la largeur ou l'étendue de chaque bande enregistrée. Les classes spectrales sont des groupes de pixels qui ont les mêmes caractéristiques (ou presque). La surface marine peut contenir plusieurs sous classes spectrales avec des variations spectrales définies. Les sous classes spectrales peuvent être causées par des variations des propriétés physico-chimique de l'eau, sa couleur, sa température, sa salinité, sa turbidité ou son activités biologique.

La résolution spectrale correspond au nombre et à la finesse des bandes spectrales auxquelles le capteur est sensible (Stéphanie et al., 2011). La résolution spectrale indique le nombre de bandes spectrales dans lesquelles le capteur peut capturer les radiations. Le nombre de bandes n'est pas le seul aspect important de la résolution spectrale. La position des bandes dans le spectre électromagnétique est un aspect clé (Mariama & Hakdaoui, 2013).

La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Plus la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites.

La forêt peut contenir plusieurs sous classes spectrales avec des variations spectrales définies. Les sous classes spectrales peuvent être causées par des variations d'âge, d'espèces, de densité d'arbres ou simplement par les effets d'ombrage ou de variation dans l'illumination.

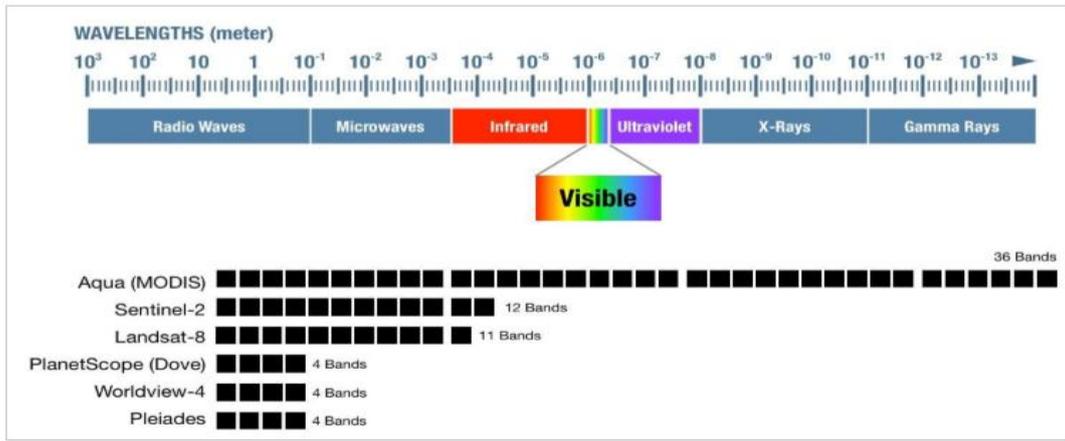


Fig. 54. Exemple de résolution spectrale (d'après Faivre, 2018)

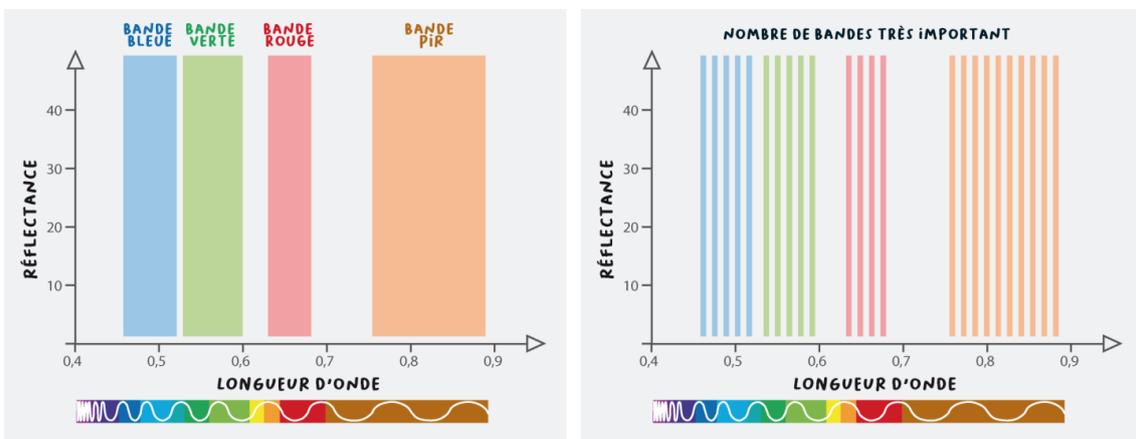


Fig. 55. Exemples de résolutions spectrales améliorées

Une image satellitaire, selon les caractéristiques du capteur embarqué sur le satellite, peut contenir en plus des trois bandes du visible (RVB) quelques bandes supplémentaires (par exemple infrarouge, proche infrarouge), et jusqu'à des centaines de bandes. Ces bandes vont couvrir des intervalles plus ou moins large du spectre électromagnétique. On parle ainsi d'**images multi-spectrales** (quelques bandes) ou d'**images hyper-spectrales** (des dizaines à des centaines de bandes).

### 3.7.2.1. Exemple d'image multi-spectrale (MS)

Le satellite Sentinel-2 acquiert dans 13 bandes spectrales à une résolution spatiale de 10m, 20m et 60m en fonction de la bande considérée.

Tab. 5. Liste des bandes spectrales du satellite Sentinel-2 (d'après Faivre, 2018)

Bandes Sentinel-2	Longueur d'onde centrale [micromètres]	Résolution [mètres]
Band 1 – Aérosol (bleu côtier)	0.443	60
Band 2 – Bleu	0.490	10
Band 3 – Vert	0.560	10
Band 4 – Rouge	0.665	10
Band 5 – Végétation Red Edge	0.705	20
Band 6 – Végétation Red Edge	0.740	20
Band 7 – Végétation Red Edge	0.783	20
Band 8 – PIR	0.842	10
Band 8A – Végétation Red Edge	0.865	20
Band 9 – Vapeur d'eau	0.945	60
Band 10 – MIR – Cirrus	1.375	60
Band 11 – MIR	1.610	20
Band 12 – MIR	2.190	20

### 3.7.3. Résolution radiométrique

La résolution radiométrique est la sensibilité d'un détecteur aux variations de l'intensité de l'énergie électromagnétique émise, réfléchi ou diffusée qui est détectée. Différents niveaux d'intensité qui peuvent être discriminés par le capteur dans une bande (Mariama & Hakdaoui, 2013).

La résolution radiométrique est la capacité de distinguer les différents niveaux d'intensité du REM dans une bande spectrale donnée. Habituellement mesurée en bits (chiffres binaires), la résolution radiométrique est la plage des valeurs de luminosité disponibles qui, dans l'image, correspondent à la plage maximale des DN ; par exemple, une image avec une résolution de 8 bits a 256 ( $2^8$ ) niveaux de luminosité.

La résolution radiométrique; c'est le nombre d'intervalles des intensités qui peuvent être capturées. Elle est caractérisée par ce qui suit :

- Sensibilité à l'intensité de l'énergie électromagnétique,
- Capacité du capteur à reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique,
- La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible se nomme plage dynamique.

### 3.7.4. Résolution temporelle

La résolution temporelle correspond à la fréquence d'acquisition d'une image à un endroit donné (Stéphanie *et al.*, 2011). Elle fait référence au laps de temps écoulé entre deux images. Entre ces deux images, trois facteurs principaux sont susceptibles de modifier la mesure au niveau du capteur :

- a. L'état du couvert végétal ; les images prises en été, quand la stabilité phénologique est grande, on suppose que le couvert a le même comportement spectral d'une année à l'autre,
- b. La géométrie d'observation ; la réflectance est directionnelle et dépend de l'angle d'incidence solaire, de l'angle de prise de vue, et de l'azimut relatif entre les directions d'observation et

d'éclairement. En prenant les images à la même époque de l'année, l'angle d'incidence solaire sera considéré comme identique. On privilégiera des angles de prise de vue comparables entre images,

- c. Les conditions atmosphériques ; jouent sur la réflectance apparente d'un objet car la composition très variable de l'atmosphère dans le temps (eau, aérosols, ...etc.) modifie l'importance des phénomènes d'absorption et de diffusion par ses composantes.

La résolution temporelle précise la fréquence de révision du satellite pour un emplacement spécifique (Mariama & Hakdaoui, 2013). Le facteur temps est important lorsque :

- Les nuages persistants offrent une vue directe limitée de la surface de la Terre,
- Les phénomènes à court terme (inondations, marées noires, ... etc.),
- Les phénomènes qui changent rapidement (atmosphérique),
- ✓ Haute résolution temporelle : < 1 - 3 jours,
- ✓ Moyenne résolution temporelle : 4 - 16 jours,
- ✓ Faible résolution temporelle : > 16 jours.

### 3.8. Notions de réflectance

En télédétection, la grandeur utilisée pour décrire la « teinte » des pixels est la **réflectance** (on parle de réflectivité pour les images radar). La réflectance va traduire le comportement d'une surface lorsqu'elle reçoit les rayons du soleil. Soumise à un rayonnement, une surface (la cible) va en partie:

- a. L'absorber,
- b. Le transmettre aux surfaces sous-jacentes,
- c. Le réfléchir vers le ciel. C'est cette part réfléchi qui est enregistrée par les capteurs des satellites.

#### 3.8.1. Définition

La réflectance est une grandeur qui traduit la proportion de lumière réfléchi par la surface d'une cible. Elle est définie comme le rapport entre le flux lumineux réfléchi et le flux lumineux incident et s'exprime généralement en pourcentage.

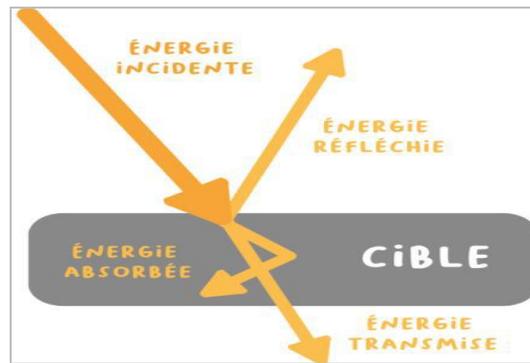


Fig. 56. Interaction de l'énergie solaire avec la surface de la cible

Quand le REM frappe un objet, certaines longueurs d'ondes sont réfléchies tandis que d'autres sont absorbées ou transmises. Dans le spectre visible, cette réflectance sélective de certaines longueurs d'ondes est perçue en termes de couleur. La quantité d'énergie réfléchie par un objet dans les différentes longueurs d'ondes (par rapport à l'énergie qu'il reçoit) s'appelle la réflectance spectrale, celle-ci étant une propriété intrinsèque de chaque matériau.

La réflectance spectrale est le rapport de l'énergie réfléchie dans toutes les directions à l'énergie incidente dans un intervalle de longueur d'onde donnée. Les données recueillies sur les images sont quantifiables. Elles représentent l'intensité relative des différentes longueurs d'ondes. Ces valeurs enregistrées simultanément représentent la signature spectrale des objets (Girard et al. 1977). Cette énergie ou signature spectrale est donc propre à chaque objet et rend sa distinction possible (Stonner et al., 1981). La réflectance est définie comme étant une grandeur qui dépend de la dimension, la nature, la composition, la structure, l'humidité de la cible, de son environnement, des conditions atmosphériques, de la géométrie de l'éclairement et de celle de la visée, de la rugosité du sol et de la réflectance diffuse de la végétation, de l'importance des ombres, l'angle d'incidence solaire et l'angle de visée sont autant de facteurs susceptibles de modifier sensiblement la réflectance d'une surface

### 3.8.2. Signification thématique des canaux

Chaque cible thématique est caractérisée par une signature spectrale. Elle ne réagit pas de la même façon dans les différents canaux. L'analyse des réflectances moyennes des différents thèmes individualisés dans chacun des canaux permet le choix des bandes spectrales appropriées pour la cartographie des sols (Escadafal, 1989). Il est donc, à priori, possible d'identifier un objet à partir de son spectre électromagnétique. Mais la signature spectrale d'un objet donné varie en fonctions de son état et des conditions d'éclairement (Scanvic, 1983). La signature spectrale est affectée également par la teneur en éléments minéraux et par la teneur en eau.

### 3.8.3. Comportement spectral des végétaux

#### 3.8.3.1. Propriétés optiques des feuilles des végétaux chlorophylliens

Les feuilles d'une plante en bonne santé vont absorber les longueurs d'onde du rouge et du bleu (pour les besoins physiologiques de la plante, puisque les végétaux convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique par le processus de photosynthèse), et réfléchir les longueurs d'ondes du vert. Ainsi, nous voyons les feuilles de couleur verte. Au-delà du domaine du visible, la végétation réfléchit de manière très importante les longueurs d'ondes de l'infrarouge et du proche infrarouge (PIR). C'est pour cela que sur l'image de la rade de Lorient, la végétation apparaissait en blanc sur l'image de la bande PIR. Autrement dit, les valeurs de réflectance de la végétation sont élevées dans la bande du PIR.

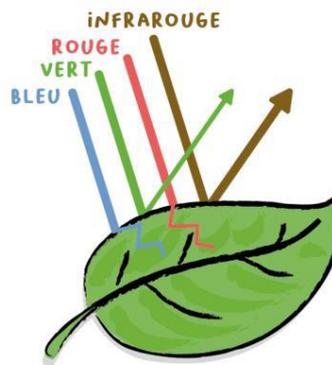


Fig. 57. Exemple de réflectance des végétaux chlorophylliens dans le Proche Infrarouge

Les feuilles d'une plante en bonne santé vont absorber les longueurs d'onde du rouge et du bleu (pour les besoins physiologiques de la plante, puisque les végétaux convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique par le processus de photosynthèse), et réfléchir les longueurs d'ondes du vert. Ainsi, nous voyons les feuilles de couleur verte. Au-delà du domaine du visible, la végétation réfléchit de manière très importante les longueurs d'ondes de l'infrarouge et du proche infrarouge (PIR). C'est pour cela que sur l'image de la rade de Lorient, la végétation apparaissait en blanc sur l'image de la bande PIR. Autrement dit, les valeurs de réflectance de la végétation sont élevées dans la bande du PIR.

Il est possible de caractériser des cibles de différente nature selon leur réponse spectrale à différentes longueurs d'onde. On parle de signature spectrale d'une cible (ou d'un type de surface). On peut représenter graphiquement les signatures spectrales des principaux matériaux.

La réflexion d'une feuille est de nature diffuse. Les mécanismes qui interviennent sont très complexes car les réfractions qui se produisent à tous les changements d'indice ; paroi cellulaire – protoplasme, chloroplastes contribuent à la diffusion et donc à la réflexion.

Tous les spectres des feuilles ont la même forme. Les différences se manifestent seulement dans les amplitudes, on peut distinguer trois domaines :

- a. Le visible : la majeure partie du rayonnement reçu est absorbée par les pigments foliaires. Les principaux d'entre eux sont les chlorophylles a et b (65% des pigments des plantes supérieures) qui possèdent deux bandes d'absorption dans le bleu et le rouge. Cela se traduit par un maximum de réflectance dans le jaune-vert à 550 nm environ.
- b. Le proche infrarouge ; La réflectance des feuilles dépend du nombre d'assises cellulaires, de la dimension des cellules et de l'épaisseur du parenchyme lacuneux.
- c. Le moyen infrarouge ; Dans l'infrarouge moyen (1,3 à 2,5  $\mu\text{m}$ ), l'absorption est principalement due à l'eau présente dans les plantes. Plus une plante contiendra de l'eau, plus l'absorption sera grande dans l'infrarouge moyen.

La signature spectrale de la végétation est complexe. La complexité croît de la feuille vers la plante en fonction de la phénologie (variation en fonction des saisons et des phases de croissance). La signature spectrale de la feuille vivante qui se traduit par une couleur verte dans le visible, est attribuable aux pigments foliaires comme la chlorophylle. Cette dernière a une forte absorption dans le bleu et le rouge et un maximum de réflectance dans le vert vers 0,55  $\mu\text{m}$ . En revanche, dans le proche infrarouge, les feuilles se caractérisent par une forte réflectance, la transition entre le rouge et le proche infrarouge est très forte et se traduit par une pente abrupte de la courbe de réflectance.

Dans la plupart des cas, les surfaces en eau peuvent être considérées comme surfaces réfléchissantes ou lambertiennes, c'est à dire qu'elles réfléchissent, de façon isotrope, une part très faible du rayonnement solaire (réflectance très faible). Pour des incidences solaires et des angles d'observation particuliers, les surfaces en eau réfléchissent le rayonnement comme un miroir (réflexion spéculaire): la quasi-totalité du rayonnement incident est alors réfléchi selon un angle égal à l'angle d'incidence, est dans la direction opposée à celle de l'angle d'incidence solaire.

Dans le moyen infrarouge, ce sont les bandes d'absorptions de l'eau à 1,45 et 1,95  $\mu\text{m}$  qui commandent l'absorption de la feuille, ce qui génère des pics de réflectance à 1,650 et 2,2  $\mu\text{m}$ .

Dans le visible (400-700 nm), les végétaux réagissent en fonction de leur composition en pigments foliaires.

Dans le proche infrarouge (800 à 900 nm), les pigments ont peu d'influence sur la réflectance des végétaux ; c'est alors la structure interne des feuilles, à savoir la densité des parenchymes foliaires, qui prend de l'importance. La réflectance dans ce domaine, bien supérieure à la réflectance dans le visible, présente donc une bonne corrélation avec la biomasse verte.

#### **3.8.4. Comportement spectral de l'eau**

L'eau absorbe davantage les grandes longueurs d'onde du rayonnement visible et du proche infrarouge. Ainsi, l'eau paraît généralement bleue ou bleu-vert car il réfléchit davantage les petites longueurs d'onde, il paraît encore plus foncé s'il est observé sous les longueurs d'onde du rouge ou du proche infrarouge. Lorsque les couches supérieures de l'eau contiennent des sédiments en suspension, la transmission diminue, la réflexion augmente et l'eau paraît plus brillante. Nous confondons parfois l'eau qui contient des sédiments en suspension avec l'eau peu profonde et claire, car ces deux phénomènes paraissent très semblables.

La chlorophylle dans les algues absorbe plus de bleu et réfléchit plus de vert. L'eau paraît donc plus verte quand il contient des algues. L'état de la surface d'eau (rugueuse, lisse, vagues, débris flottants, ...etc.) peut aussi susciter des problèmes dans l'interprétation à cause de la réflexion spéculaire.

Ces exemples démontrent que nous observons des réponses très différentes aux mécanismes d'absorption, de transmission et de réflexion selon la composition de la cible et la longueur d'onde du rayonnement qui lui est propre. En mesurant l'énergie réfléchié ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet. En comparant les signatures de différents objets, nous pouvons les distinguer les uns des autres, alors que nous ne pourrions peut-être pas les distinguer si nous les comparions seulement avec une longueur d'onde.

Par exemple, l'eau et la végétation peuvent avoir une signature spectrale similaire aux longueurs d'onde visibles, mais ils sont presque toujours différenciables dans l'infrarouge. Les signatures spectrales peuvent être très variables pour la même sorte de cible et peuvent aussi varier dans le temps et dans l'espace. Pour interpréter correctement l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la surface, il est important de savoir où regarder dans le spectre et de comprendre les facteurs qui influencent la signature spectrale de la cible.

Quand le REM et la matière agissent, l'un sur l'autre, le REM peut être réfléchi, absorbé ou transmis. On appelle spectre électromagnétique la courbe de répartition de l'énergie diffusée par cette surface (réflectance dans le visible et le proche infrarouge, émittance dans le thermique) en fonction de la longueur d'onde. C'est bien ce message spécifique qu'il faut enregistrer puis décrypter.

Les fenêtres utilisées à l'heure actuelle en téledétection sont fonction des techniques actuelles et des facteurs atmosphériques, qui limitent l'usage du spectre électromagnétique dans le visible (0,4 – 0,75  $\mu\text{m}$ ), le proche infrarouge (0,75 – 1,1  $\mu\text{m}$ ), l'infrarouge thermique (3 à 5 et 8 à 14  $\mu\text{m}$ ) et les ondes radars (supérieur au millimètre).

L'eau est caractérisée par une réflectance relativement plus forte dans le visible (bleu (0.45 - 0.52  $\mu\text{m}$ ), vert (0.52 - 0.60  $\mu\text{m}$ ), rouge (0.63 - 0.69  $\mu\text{m}$ )), que dans le proche infrarouge (0.76 - 0.90  $\mu\text{m}$ ) et les courtes longueurs du proche infrarouge (1.55 – 1.75  $\mu\text{m}$ ), considérant les bandes du capteur Landsat TM comme exemple. L'absorption des rayons solaires dans la bande proche infrarouge est complète (Sleimi, 2018). L'eau réfléchit les longueurs d'onde du bleu et absorbe fortement les longueurs d'onde de l'infrarouge (Herbreteau *et al.*, 2018). L'humidité diminue la réflectance des sols. Un sol sec (interface air- particules). Sol humide (microcavité occupée par l'eau).

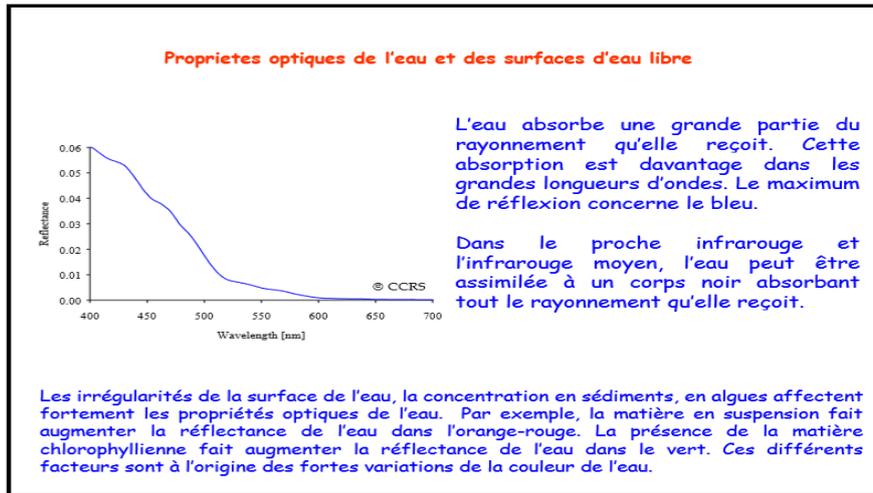


Fig. 58. Propriétés optiques de l'eau

### 3.8.4.1. Propriétés optiques de l'eau de mer

#### *Diffusion*

C'est surtout la diffusion particulaire qui va dominer, c'est-à-dire que les particules en suspension dans l'eau de mer et les molécules d'eau diffusent un rayon de lumière et forment ensemble comme un faisceau lumineux ; en réalité, l'ensemble des particules éclairées.

L'atténuation de la lumière est donc liée pour une grande part à la teneur en matières en suspension et donc à la turbidité de l'eau de mer. Les eaux littorales ont tendance à être plus turbides que les eaux océaniques du large (remises en suspension, apports estuariens, etc).

#### *Absorption*

L'absorption varie avec les longueurs d'onde et après quelques dizaines de mètres, seuls les bleus continuent à se propager, la lumière devient quasi monochromatique (une seule couleur).

La couleur de la mer va du bleu au vert : elle est davantage bleue lorsqu'il y a peu de production biologique (et donc moins de chlorophylle, responsable de la couleur verte) comme dans les mers tropicales et équatoriales où l'on rencontre parfois un bleu indigo ; le long des côtes, les eaux sont généralement verdâtres ; dans les régions polaires, la mer est quasiment verte.

Si l'eau avait été chargée de microalgues, on aurait vu des zones plus rouges dans l'eau (comme la végétation).

### **3.9. Aperçu sur quelques plates formes spatiales d'acquisition d'images satellites**

Plusieurs générations de satellites ont été lancés depuis et présentent un intérêt certain pour la recherche. Il y a environ 1071 satellites opérationnels en orbite (John, 2017).

On peut distinguer d'une part des satellites d'acquisition d'images à très haute résolution spatiale mais ne comportant que les traditionnelles bandes bleu-vert-rouge-proche infrarouge, et d'autre part des satellites de télédétection (comme par exemple des satellites comme MODIS ou la famille des Landsat) offrant un panel de bandes un peu plus riche mais une résolution spatiale basse ou moyenne. Les satellites super spectraux, c'est-à-dire spectralement plus riches, sont restés des satellites à basse ou moyenne résolution spatiale. Il s'agissait par exemple des satellites Landsat (Landsat7 et 8 comportent respectivement 8 et 11 bandes, avec des résolutions spatiales de l'ordre de 30m pour la plupart des bandes) ou MODIS (36 bandes entre 400 nm et 14 400 nm, mais avec des résolutions spatiales variant entre 250 et 1000 m) (Chehata, 2017).

#### **3.9.1. Satellites à faible résolution**

La résolution spatiale de cette catégorie de satellites varie entre 30 à 1000 mètres.

Tab. 6. Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à faible résolution (d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique - Québec, 2013).

	NOAA 17 et 18	NOAA 19	SPOT4 et 5	IRS-1C et 1D	RESOURCESAT-1
Pays	États - Unis	États - Unis	France	Inde	Inde
Année de lancement	2002 et 2005	2009	1998 et 2002	1997	2003
Résolution spatiale	1,1 km (nadir) 5 à 6 km (bordure)	1,1 km (nadir) 5 à 6 km (bordure)	1,1 km (nadir) 1,7 km (bordure)	180 m	50 m (nadir) 70 m (bordure)
Dimension de l'image	2 400 x 2 400 km	2 400 x 2 400 km	2 200 x 2 100 km	774 x 774 km	734 x 734 km
Fréquence de passage	2 fois / jour	2 fois / jour	1 fois / jour	24 jours	24 jours
Application	Météorologie et océanographie	Météorologie et océanographie	Végétation, agriculture et océanographie	Occupation du sol et végétation	Occupation du sol et végétation
Site web	<a href="http://www.noaa.gov">http://www.noaa.gov</a>	<a href="http://www.noaa.gov/">http://www.noaa.gov/</a>	<a href="http://www.spot.com/">http://www.spot.com/</a>	<a href="http://www.isro.org/satellites/earthobservation/satellites.aspx">http://www.isro.org/satellites/earthobservation/satellites.aspx</a>	<a href="http://www.isro.org/satellites/earthobservationsatellites.aspx">http://www.isro.org/satellites/earthobservationsatellites.aspx</a>

### 3.9.2. Satellites à moyenne résolution

La résolution spatiale de cette catégorie de satellites varie entre 04 à 30 mètres.

Le CEOS (Committee on Earth Observation Satellites), fédère 60 agences membres ou associées, recense 154 satellites pour l'observation de la Terre en 2018, dont les caractéristiques sont données sur son portail d'information : <http://database.eohandbook.com/index.aspx> (Herbreteau *et al.*, 2018).

#### 3.9.2.1. Satellite optique Sentinel

En 2001, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et l'Union européenne ont lancé un programme ambitieux de surveillance globale pour l'environnement et la sécurité (Global Monitoring for Environment and Security - GMES), devenu le programme Copernicus en 2012, afin de rassembler des données satellitaires accessibles et de développer des services opérationnels. Dans le cadre de Copernicus, l'ESA a développé la constellation des satellites Sentinel qui fournissent des images gratuites, optique et Radar, dans des résolutions complémentaires. Ainsi, les satellites Sentinel-2 A et B produisent des images à haute résolution spatiale (HR) (jusqu'à 10 m), avec une acquisition systématique globale tous les 5 jours (Herbreteau *et al.*, 2018) et une couverture au sol de 290km

(Faivre, 2018). Deux satellites optiques identiques : Sentinel-2A et Sentinel-2B, Lancés respectivement par l'ESA en date du 2015 et 2016. Il dispose 13 bandes spectrales ayant une résolution spatiale de 10, 20 et 60. Les caractéristiques des bandes sont résumées dans le Tab.13 suivant :

### 3.9.2.2. Satellites Algériens

L'Algérie compte actuellement 6 satellites mis sur orbites depuis l'année 2002. Ils sont gérés par l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL). Le microsatellite amélioré satellite Alsat-1 mis sur orbite terrestre de 700 km (Bekhti & Sweeting, 2008). Sa fauchée est de 600 km. Son capteur solaire a une résolution spatiale de 32m et 3 bandes spectrales (rouge, vert et proche infrarouge) identiques à celles du capteur *TM* du satellite Landsat (Rachedi *et al.*, 2004). Il est dédié à la surveillance des catastrophes naturelles. Les données Alsat-1 ont été utilisées dans un cadre prévisionnel dans la mesure où elles permettent la localisation et l'identification des zones agricoles menacées par d'éventuelles invasions acridiennes (Benhamouda, 2005). Elles ont permis aussi de faire un suivi des incendies de forêts et un bilan chiffré des superficies touchées annuellement (entre le mois de Mai et Août) par le feu de forêts (Yousfi *et al.*, 2005).

Le deuxième satellite Alsat-2A mis sur orbite héliosynchrone de 670 km (Kameche *et al.*, 2011). Son capteur a une résolution au sol de 2,5 m pour la bande panchromatique et 4 m pour les 4 bandes mutlispectrales (vert, bleu, rouge et infrarouge). Sa fauchée est de 17,5 km. Les opérations sont effectuées à partir du segment terrestre Alsat-2 situé à Ouargla - Algérie (Larbi *et al.*, 2012). Le satellite présente un intérêt technologique et économique considérable et qui garantit le renforcement de l'autonomie en termes de disponibilité et de couverture des données satellitaires, ce qui permet d'améliorer et de mettre à jour la cartographie de base et thématique sur l'ensemble du territoire national (Boukerch *et al.*, 2012). Plus de 130 000 produits d'imagerie ont été reçus (Kameche & Benmostefa, 2016).

Le satellite Alsat-1B et 2B ont été mis sur une orbite héliosynchrone de 700 km. La résolution spatiale est moyenne (24 m en multispectrale et 12 m en panchromatique). La fauchée est de 163 km. Parmi ses applications on cite l'observation de la terre telle que la surveillance des ressources naturelles (agriculture), gestion des catastrophes et la cartographie de l'occupation des sols (Serief, 2017).

Le satellite expérimental Alsat-1N est dédié à la recherche scientifique et le développement technologique.

Le satellite AlcomSat1 est le 6<sup>ème</sup> satellite Algérien et le premier satellite de communication. Il assure une couverture nationale et régionale (nord-ouest de l'Afrique et le Sahel). Il permet le renforcement de la souveraineté nationale en matière de télécommunications. Il permettra la diffusion de 200 à 300 chaînes de télévision et du même nombre de radios numériques, mais aussi l'amélioration de certains services tels que la formation en ligne, la télémédecine et la visioconférence grâce à la diffusion de l'Internet à très haut débit sur l'ensemble du territoire Algérien. Il permet la réduction des coûts d'exploitation actuels liée à l'utilisation de la capacité spatiale fournie par des systèmes de télécommunications internationaux (ASAL, 2018).

### 3.9.3. Satellites à haute résolution

La résolution spatiale de cette catégorie de satellites varie entre 0.5 à 04 mètres. La fin des années 1990 et le début des années 2000 ont vu l'avènement des satellites à très haute résolution spatiale, avec des capteurs comme GeoEye, QuickBird, Worldview ou Pléiades. Ces satellites permettent de bénéficier de résolution submétrique (de 0,3 à 0,7m) en panchromatique et métrique (de 1 à 3m) en multispectral (Chehata, 2017). Les capteurs des satellites optiques à haute résolution ont une très haute résolution. Ils permettent de détecter les changements à une échelle plus fine et de mesurer l'impact de l'exploitation sur la dégradation forestière (Mayaux *et al.*, 2003). Les données télédéteectées serviront à établir les cartes, les spatioctes, les plans d'information et le Model Numérique de Terrain (MNT).

#### 3.9.3.1. Satellites Radar

Le satellite est un outil irremplaçable car il permet de surveiller l'océan de façon globale et de manière répétitive sur de longue période de temps. Les radiomètres optiques opérant dans les longueurs d'onde du visible enregistrent les réflectances de la surface marine (couleur de l'océan). Le traitement de ces données permet de quantifier certaines caractéristiques des eaux de surface, en particulier la teneur en matière en suspension (turbidité) et en chlorophylle (phytoplancton). Les mesures ainsi acquises sont d'une grande utilité dans le suivi des courants, de la pollution et de la productivité biologique des eaux côtières.

Grâce aux technologies satellitaires (ex. satellite Européen Sentinel qui dispose un instrument optique et radar, les satellites canadiens), nous pouvons :

- a. Positionner les navires en mer (fournir les coordonnées GPS exactes),
- b. Contrôler les frontières,
- c. Assurer la sécurité maritime (la navigation en mer),
- d. Lutter contre la pêche illégale,

- e. Lutter contre la pollution (détecter les dégazages en mer),
- f. Lutter contre la piraterie,

Grâce aux technologies satellitaires nous pouvons suivre aussi le déplacement des animaux marins (ex. les prédateurs marins « tests sur tortue marin, le manchot » ...) à l'aide des balises ARGOS (marquage) en s'appuyant sur les données altimétriques de la circulation océanique afin de nous permettre de connaître les zones de nourriture de ces animaux.

Les images satellitaires en océanographie permettent de connaître ce qui suit :

- a. Comparer la répartition spatiale des animaux avec les cartes de température de surface, carte des niveaux de l'océan, carte de la productivité,
- b. Connaître le stock de l'espèce suivie dans le monde (ex. cas du suivi du thon rouge) afin de mieux gérer et exploiter durablement l'espèce.

Sur ce même balise les chercheurs ont mis aussi un capteur de température. Le suivi toujours du manchot par satellites ARGOS a permis de connaître la répartition spatiale de la température de surface.

Grâce à ces expériences de suivi du mouvement des manchots ARGOS, les chercheurs ont commencés à faire mieux connaître la biologie (présence de nourriture donc possibilité de pêche) et l'environnement (température) des milieux parcourus par le manchot.

Cette méthode ARGOS permet de suivre l'évolution des animaux marins dans un environnement qui changeant afin de pouvoir prévoir leur préservation et conservation.

Depuis les années quatre-vingt-dix les capteurs Radar ont été largement utilisés, puisque leurs microondes peuvent pénétrer les nuages et prendre des images jour et nuit. De plus, ils offrent une information supplémentaire et précise sur le territoire "par ex. surfaces inondées et la géométrie des rivières" (Di Baldassarre, 2012). L'imagerie radar apporte des informations pertinentes sur les unités de paysage (réseaux hydrographiques et routiers, structures urbaines, ...etc.), les unités végétales et géomorphologiques, les types de sols, les thèmes côtiers (trait de côte, cordons dunaires, plages, ...etc.) les phénomènes d'ensablement du chenal d'embouchure, d'engraissement et d'érosion autour du canal de délestage, l'état de surface de la mer (vaguelette, houle, ...etc.) les états et la nature de l'eau "calme ou turbide, claire ou chargée" (Souléye *et al.*, 2007).

Les satellites altimétriques ou radar permettent de faire un diagnostic précis sur la montée du niveau de la mer due au changement climatique. Grâce aux technologies satellitaires nous pouvons étudier

les vents aux larges à l'aide des images radar car ces données images sont riches et nous permettent d'établir les cartes des vents au profit des partenaires industriels de l'énergie éolienne.

### **3.9.3.2. Satellite Radar franco-américain Topex Poséidon**

Ce satellite radar a été lancé en 1992. Il est doté d'un radar altimétrique. Ce satellite permettra de mesurer la hauteur des océans de façon très précise pour pouvoir étudier le niveau de la mer, la circulation océanique (courants...) ainsi que les interactions avec l'atmosphère. Ce satellite est placé à 1,336 km d'altitude, il a une orbite particulière (de forme circulaire) et une inclinaison de 66° sur l'équateur. Il effectuera des mesures et couvrira tout l'océan entre le 66° parallèle Nord et le 66° parallèle Sud. Après avoir effectué 127 tours en environ dix jours, le satellite repasse à proximité des mêmes points à 1k près, décrivant un maillage régulier des traces au sol. Le même cycle recommence tous les dix jours. Son but principal c'est d'étudier la circulation des océans et sa variabilité, l'état de la mer et les marées océaniques. Ce travail a duré 5 ans jusqu'à son accident survenu en date du 9 octobre 2006. Parmi les résultats du satellites Topex-Poseidon on cite ce qui suit :

- a. Pour la première fois, Topex-Poseidon a permis de surveiller de façon globale et continue l'évolution du phénomène El Niño. Il s'agit d'un phénomène climatique très intense qui a lieu dans le Pacifique au large du Pérou. Les eaux habituellement froides (18-22 C°) sont en quelques mois remplacées par des eaux plus chaudes (25-29 C°), ce qui causent des conséquences importantes sur la faune et la flore, le climat, les ressources. En 1997, le phénomène a été particulièrement important et dès le mois de mars Topex-Poseidon a observé les premières manifestations du phénomène : la propagation d'une « bosse » d'eau chaude, surélevée de 20 à 30 centimètres par rapport au reste de l'océan, qui a traversé le Pacifique d'ouest en est.

La relève est assurée par le satellite Jason1 et 2 mis en orbite respectivement en 2001 et 2008. Jason2 a remplacé Jason1 en 2008. Ce dernier a permis de mesurer en continue la topographie de la surface des océans (collines et vallées).

### **3.9.3.3. Satellite Envisat**

Envisat est un satellite Européen de 5 tonnes de masse lancé en 2002 jusqu'au 2012. Il est doté d'instrument Radar. Il scrute l'océan et la terre. Il surveille et acquit des images radar. Il peut détecter la pollution accidentelle des eaux (ex. dégazage) et il peut alerter les autorités.

### **3.9.3.4. Satellite d'altimétrie Franco-Indien Saral**

Ce satellite a été lancé en 2013. Il dispose un altimètre Altika (bande ka) et un instrument LEGOS, il est placé sur une orbite polaire (800 km d'altitude). Le satellite sert à :

- a. Mesurer la position,
- b. Mesurer la distance du satellite,
- c. Mesurer la surface de l'océan,
- d. Mesurer les facteurs du climat,
- e. Mesurer les calottes polaires,
- f. Mesurer le niveau de la mer,
- g. Mesurer et suivre les fleuves et les lacs de petites tailles.

#### **3.9.3.5. Satellite radar "Sentinel-1"**

Ce satellite a été lancé le 03/04/2014 dans le cadre d'un programme Européen Copernicus mené par la commission Européenne, il apporte une amélioration sur le plan revisite de 6 jours. Son orbite est héliosynchrone, altitude de 700 km, cycle de répétition de 12 jrs, donc 6 jrs à l'équateur. Son but c'est de fournir des informations relatives à la surveillance de l'atmosphère, de la mer, de la terre et du changement climatique. Sentinel 1, c'est une émission radar dans la bande C, il permet de surveiller les pôles, l'environnement marin (pêche illégale, glaciation, vents, courants, détection des bateaux, sécurité maritime) l'océan, la terre (mouvement des surfaces (inondation, surveillance des forêts, agriculture, etc.) et quelques déformations. Autres applications sont résumées d'après Mariama & Hakdaoui, 2013) comme suit :

- a. Surveillance de la glace de mer et de l'environnement arctique,
- b. Surveillance marine,
- c. Surveillance des risques en raison du déplacement du sol,
- d. Cartes pour organiser l'aide humanitaire dans les situations de crise.

#### **3.9.3.6. Satellite radar Sentinel -3**

Sentinel-3 ; c'est une mission globale océanique et du sol terrestre. Il est placé sur une orbite hélium-synchrone à 814.5 Km d'altitude. Sa période de révision est de 27 jours. Parmi leurs applications nous citons ce qui suivent :

- a. Couleur et température de la surface de la mer et du sol,
- b. Topographie de la surface de la mer et des glaciers,

- c. Topographie des zones côtières, des lacs et de la banquise,
- d. Cartes végétation

### **3.10. Traitement d'images satellites**

#### **3.10.1. Définition**

Toute représentation d'un objet ou d'une scène dans un plan est dite image. Il y a trois formes physiques d'existence d'une image :

- a. Forme binaire (trait),
- b. En niveau de gris (NG),
- c. En couleur.

L'image numérique est constituée par une ou plusieurs matrices (par exemple : les bandes du capteur) de numéros (ND : Niveaux Numériques), c'est-à-dire, ils sont des fonctions multidimensionnelles (Mariama & Hakdaoui, 2013). Une image numérique de télédétection est un document et une technique d'approche du milieu naturel ou d'analyse de la surface de la terre. Elle est sous forme d'une matrice géométrique à deux dimensions.

Les données raster (ou image) correspondent à une grille régulière de pixels. Un format raster permet d'associer des informations additionnelles telles que la projection cartographique, le système de coordonnées, l'ellipsoïde de référence, le Datum, la résolution spatiale (ou taille du pixel) et tout ce qui est nécessaire pour la référence spatiale de l'image. Mais aussi des informations sur les dimensions de l'image, le nombre de bandes, et une synthèse statistique pour chacune. On parle de métadonnées (Faivre, 2018).

Cette image est acquise, en générale, par un capteur électronique embarqué à bord d'un vecteur et captant l'énergie provenant de la surface terrestre. Cette dernière est reçue par le capteur puis transformée en signaux électriques par les détecteurs. Une image satellite est formée de composés élémentaires appelés « pixels » dont la valeur est définie par la mesure de la radiance moyenne. La plupart des logiciels de télédétection traitent les pixels un par un sur base de leurs propriétés spectrales (Bontemps, 2004). Un pixel (point) d'une image définie en 256 couleurs (ou 256 valeurs).

#### **3.10.2. Prétraitement d'images**

Les prétraitées plus importantes en télédétection, visant à obtenir les bonnes valeurs de l'énergie réfléchie ou émise sur un point quelconque de la surface terrestre sont : correction radiométrique, correction atmosphérique et de correction géométrique (Mariama & Hakdaoui, 2013).

Ce travail de prétraitement se basera sur des images brutes qui présentent des distorsions et des dégradations ; les traitements préliminaires ont pour but de les éliminer afin d'obtenir une carte qui soit une référence planimétrique pour ses utilisateurs. Les images doivent subir une correction géométrique et radiométrique. Mais actuellement un grand nombre d'utilisateurs travaillent à partir d'images dont les distorsions systématiques ont été corrigées ("niveau 1B" des images).

En effet, les facteurs comme l'angle d'élévation du soleil, la distance terre-soleil, la calibration des capteurs, les conditions atmosphériques et la géométrie de visée affectent la valeur numérique des pixels (Eckhardt *et al.*, 1990). Et comme nous ne pouvons pas obtenir une information fiable sur ces différents paramètres lors de la prise des images, la correction atmosphérique basée sur la correction empirique d'image à image est à appliquer (Jensen, 1996).

### 3.10.2.1. Correction atmosphérique

Prendre en compte la contribution du rayonnement atmosphérique qui arrive au capteur. L'inconvénient de la télédétection c'est que le capteur reçoit les données de la surface terrestre à travers de l'atmosphère. Les effets de l'atmosphère sont l'absorption et la diffusion, mais il est pratiquement transparent au rayonnement électromagnétique à plusieurs longueurs d'onde (récupération de SST ou NDVI) (Mariama & Hakdaoui, 2013).

Reflectance Top Of Atmosphere (TOA)

Correction appliquée dans le but de réduire la variabilité au sein de l'image par une normalisation des valeurs par rapport au rayonnement solaire incident au niveau de l'atmosphère. Cette réflectance TOA est un ratio adimensionnel, et s'exprime selon Faivre (2018) de la manière suivante :

$$\rho_p = (\pi * L_\lambda * d^2) / (ESUN_\lambda * \cos\theta_s)$$

Avec

- $L_\lambda$  = Spectral radiance at the sensor's aperture (at-satellite radiance)
- $d$  = Earth-Sun distance in astronomical units (provided with Landsat 8 metadata file, and an excel file is available)
- $ESUN_\lambda$  = Mean solar exo-atmospheric irradiances
- $\theta_s$  = Solar zenith angle in degrees, which is equal to  $\theta_s = 90^\circ - \theta_e$  where  $\theta_e$  is the Sun elevation

*Top Of Canopy (TOC) ou réflectance de surface*

Correction appliquée dans le but de réduire les effets atmosphériques :

- ✓ L'absorption de la lumière par les molécules présentes dans l'air,
- ✓ La diffusion de la lumière par les molécules et aérosols.

$$\rho = [\pi * (L_\lambda - L_p) * d^2] / [T_v * ((ESUN_\lambda * \cos\theta_s * T_z) + E_{down})]$$

Avec

- $L_p$  is the path radiance
- $T_v$  is the atmospheric transmittance in the viewing direction
- $T_z$  is the atmospheric transmittance in the illumination direction
- $E_{down}$  is the downwelling diffuse irradiance

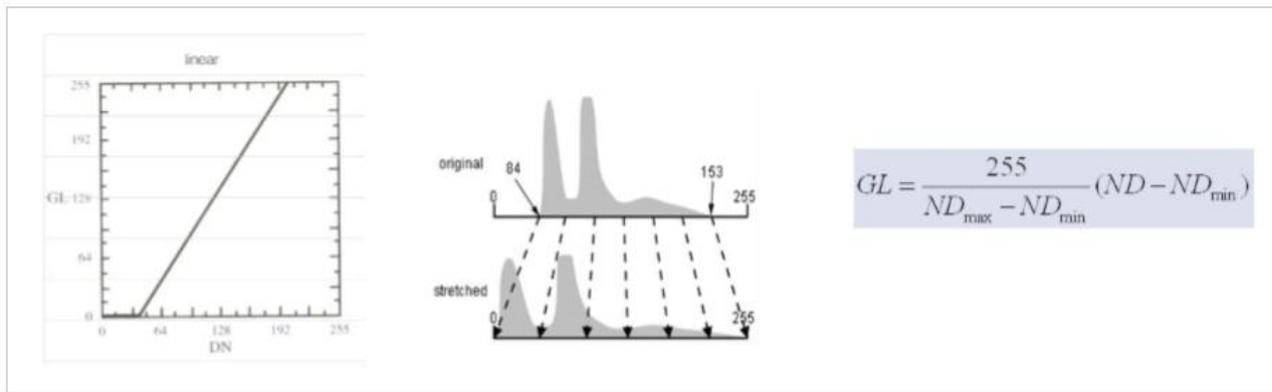
### 3.10.3. Traitement d'images

#### 3.10.3.1. Amélioration de l'image

Amélioration de contrastes

L'objectif est d'améliorer la qualité visuelle de l'image. Pour cela on fait diverses transformations (min-max, saturation, égalisation, ...etc.) à l'histogramme de l'image. Il s'agit d'appliquer une transformation qui fait correspondre les niveaux numériques originaux (ND) en niveaux de gris (NG). Il existe plusieurs possibilités de transformation des niveaux. Ces transformations sont faites pour chaque pixel de l'image comme un élément séparé et indépendant de sa position dans l'image en utilisant l'histogramme de l'image. L'histogramme est la distribution statistique des pixels d'une image en termes de nombre de pixels pour chaque valeur (ND) possible (Mariama & Hakdaoui, 2013).

*Exemple* de Min-Max Stretch : le rang dynamique des valeurs s'étend jusqu'à occuper le rang complet de reproduction. Il utilise la valeur minimale et maximum du signal.



Avec :

GL : niveaux de gris,

ND : niveaux numériques.

### Seuillage

C'est une transformation qui classe l'image en deux catégories (binaires) basé sur un seuil sur les valeurs d'origine de l'image. Pour un plus grand nombre de classes est nécessaire un plus grand nombre de seuils.

### Filtrage de convolution

Technique pour modifier l'information spatiale de l'image en utilisant les valeurs numériques du voisinage (filtrage local).

- On utilise une fenêtre qui se déplace le long des colonnes et des rangées.
- Une opération est effectuée avec les pixels de l'image d'entrée qui tombent à l'intérieur de la fenêtre et le résultat est le nouveau pixel de l'image à la position du centre de la fenêtre.

### Masque de convolution (réponse impulsionnelle)

Filtres moyenneurs : Réduisent le bruit par moyenne spatiale,

Filtres de gradient : Détecteur de contour (approximation de la dérivée).

### Détecteur de contour

### Transformée de Fourier

La transformée de Fourier appliquée sur les images fournit des informations sur les structures présentes dans l'image et peut être utilisé pour filtrer les fréquences indésirables.

La transformée de Fourier d'une image est composée de deux types d'informations: l'amplitude et de phase.

Le spectre de puissance (carré du module du spectre) est utilisé dans la reconnaissance des patrons spatiaux globaux de l'image.

Fusion d'images

Il s'agit d'améliorer la qualité spatiale de l'imagerie multispectrale (MS) en utilisant le détail qui fournit la bande panchromatique (PAN) à haute résolution mais en préservant l'information spectrale.

Objectif :

- Obtenir une image à haute résolution spatiale et spectrale, à partir de l'image PAN (haute résolution spatiale, faible résolution spectrale) et des bandes multispectrales (haute résolution spectrale, faible résolution spatiale),
- Améliorer la qualité visuelle pour faciliter la photo-interprétation et la qualité des SIG,
- Améliorer la détection et l'extraction d'objets et de caractéristiques,
- Améliorer la classification thématique,
- Améliorer la détection des changements des images multi-temporelles.

### **3.10.3.2. Correction géométrique**

L'environnement observé (courbure de la terre, variation d'altitude du sol, réfraction atmosphérique,), le mouvement de la plate-forme (altitude, vitesse,), les erreurs systématiques et aléatoires dans le système de mesure (Bonnet & Rochon, 1992) causent des distorsions spatiales aux scènes brutes car elles sont inhérentes aux images satellites, une correction géométrique est indispensable ; de plus, cette étape permettra d'attribuer aux images une projection cartographique. La distorsion géométrique est produite par la sphéricité de la terre, la non-linéarité du miroir du scanner et le mouvement de rotation du satellite. La correction de ces déformations géométriques peut s'effectuer de deux façons suivantes :

- a. Les positions réelles des pixels sont changées mais ces derniers conservent leurs valeurs d'intensité. Cette méthode manquant de précision, on ne l'utilise que pour des corrections géométriques simples comme l'asymétrie,
- b. L'image est ré échantillonnés ; autrement dit, on transforme une image numérique déformée géométriquement, en une autre image sur un quadrillage non-déformé et espacé de façon

égale. Les valeurs d'intensité des pixels sur ce quadrillage dérivé doivent être déterminées par interpolation à l'aide des pixels avoisinants de l'image déformée.

Les fenêtres comportent des distorsions géométriques dues à l'instrument d'enregistrement des données et à la courbure de l'écran sur lequel les images ont été photographiées. Les images vont être, par conséquent, rectifiées par extrapolation afin d'avoir l'image superposable à la carte topographique considérée comme référentiel (Bariou, 1978). Ces erreurs par contre excluent tout traitement automatique et leurs corrections consistent à redresser l'image à partir de points de contrôle au sol ou Ground Control Point (GCP), dont la principale propriété est d'être facilement localisables à la fois sur l'image satellite et dans un système de référence (cartes, autres images,). La qualité de la correction est, en grande partie, conditionnée par la précision - capture et localisation - des GCP.

### **3.10.3.3. Correction radiométrique**

Elle traduit les données brutes enregistrées par le satellite en intensité de rayonnement en exécutant une série de conversions. La station de réception transforme les données brutes en compte numérique que l'utilisateur transpose ensuite en luminance spectrale, elle-même convertie en réflectance effective (Bontemps, 2004). Un tel étalonnage facilite la comparaison des données entre plusieurs images prises à différentes dates et/ou par différents capteurs (Markham & Barker, 1986). Elle s'applique ou non en fonction de l'objectif poursuivi et de la méthode d'analyse employée ainsi que du prétraitement des images acquises. La radiance de la cible est modifiée (atténuée) par l'atmosphère à travers laquelle elle passe pour accéder au capteur. Le capteur lui-même déforme encore plus cette radiance qui lui est parvenue.

L'évaluation subjective d'une seule image ne nécessite pas de correction atmosphérique. Cependant, quand le but est d'extraire des informations quantitatives (ex. concentration en chlorophylle, profondeur bathymétrique, ...etc.) ou de comparer deux images en valeurs tonales ; les effets atmosphériques doivent être éliminés.

Diverses techniques sont utilisées pour la correction atmosphérique. Parmi les plus simples on trouve la "dark pixel subtraction", (soustraction de pixel foncé), et l'"histogramme matching" (assortiment d'histogramme), mais elles sont sujettes à erreurs. Les complexes font appel à la modélisation mathématique des conditions atmosphériques à l'heure et à l'endroit de la prise d'image, ce qui nécessite souvent le relevé de renseignements à l'emplacement de l'image et au moment de la prise de vue.

Les données télédéteectées à l'état brut comportent des défauts radiométriques, ponctuels ou en lignes, dus essentiellement au capteur embarqué à bord du satellite. Une correction radiométrique vise l'élimination de ces défauts. Elle consiste en un reformatage et à une élimination du lignage dans les images, notamment une calibration relative des canaux (Bariou, 1978). Les corrections peuvent être appliquées sans connaissance particulière du terrain (Lounis & Belhadj, 2005). En fait, une très grande majorité des recherches en télédétection s'effectue sur des données dont la radiométrie n'a pas été corrigée.

#### **3.10.3.4. Equilibrage de la dynamique**

Un détecteur a une sensibilité radiométrique égale à 256 niveaux de gris. L'information numérique répartie sur cette gamme est restituée sur le film de sensibilité 16 fois moindre. Ceci engendre une perte considérable d'informations que nous cherchons à minimiser par un ajustement de la densité en la ramenant à un niveau plus compatible.

#### **3.10.3.5. Composition colorée**

Sur une image classique, on reconstitue à l'écran ce que notre œil voit en affectant un filtre coloré correspondant à la "vraie" couleur de chaque bande, (c'est le principe de la synthèse additive : toutes les couleurs du spectre visible additionnées, ou les 3 couleurs primaire additionnées donnent de la lumière blanche). On parle alors de composition colorée vraies couleurs. Le principe est le même pour les images satellitaires, si l'on souhaite afficher une image optique telle que notre œil verrait la Terre depuis le ciel, on affectera aux trois bandes du visible bleu, du vert et du rouge leurs vraies couleurs.

La réalisation d'une composition colorée consiste à attribuer à chaque couleur primaire (rouge, vert et bleu) trois bandes spectrales d'un capteur satellitaire. Par synthèse additive, il est possible de reconstituer toutes les couleurs. Cela permet de faciliter l'interprétation des images satellitaires et de mettre en évidence des phénomènes environnementaux.

De manière conventionnelle en observation de la terre, on affecte à la bande du proche infrarouge un filtre rouge, à la bande du rouge un filtre verte et à la bande du vert un filtre bleu. On parle alors de composition colorée "fausses couleurs". Dans cette représentation, les informations contenues dans la bande de la bleue ne sont pas représentées. Peu intuitive au départ, cette représentation a l'avantage de rendre visible des informations non visibles à l'œil nu, et de bien discriminer surfaces minérales et surfaces végétales.

Les images panchromatiques sont affichées en noir et blanc (ou niveaux de gris). Les images multi spectrales résultent de l'assemblage d'au moins trois bandes spectrales et sont généralement

affichées en couleurs (Jensen, 2007). L'affichage des couleurs s'obtient en additionnant en proportions variables les trois couleurs primaires que sont le bleu, le rouge et le vert. Une composition en couleurs vraies consiste à attribuer aux trois couleurs de base les bandes spectrales équivalentes de l'image. On obtient ainsi une image en couleurs « réelles ». Par contre, la composition « infrarouge fausses couleurs » consiste à attribuer la bande infrarouge au rouge, la bande rouge au vert et la bande verte au bleu (Bonnet, 2011).

L'œil humain est plus sensible aux couleurs qu'aux niveaux de gris, il est important pour l'analyse visuelle, la représentation des couleurs des images (Mariama & Hakdaoui, 2013). Cette représentation peut se faire de deux manières :

- a. Représentation en fausses couleurs (pseudocouleur) : Lorsqu'une bande dans l'échelle de gris est appliquée une table de couleur (LUT : Look-up table) ou lorsque diverses bandes qui ne correspondent pas avec la couleur vraie sont attribuées le rouge, vert ou bleu.
- b. Représentation en couleurs vraies : Lorsque l'image est acquise par un capteur qui capte les trois bandes de couleurs vraies (rouge, vert et bleu).

L'information apportée par un seul canal ne permet pas de donner un détail satisfaisant pouvant refléter de près ce qu'on espère ressortir à partir des données télédétectées. Pour ce faire, on a recours à la combinaison de trois (03) canaux en affectant l'une des trois couleurs fondamentales : Bleu, Vert et Rouge ; c'est-à-dire en associant les couleurs primaires dans l'ordre de classement correspondant à leur longueur d'onde à savoir : vert, rouge et proche infrarouge.

Chaque image est chiffrée dans une couleur différente (exemple : rouge, vert, bleu), l'image finale étant une composition colorée des images d'origine. Celles-ci peuvent être une même scène saisie à des longueurs d'ondes différentes (analyse multi bande) ou à des périodes différentes (analyse multi dates).

Le résultat final correspond à une image trichrome appelée composition colorée dans laquelle les thèmes se distinguent par les différentes nuances dans les trois couleurs de base.

### **3.10.4. Analyse de l'image**

#### **3.10.4.1. Détection de structures sur l'image**

#### **3.10.4.2. Segmentation**

La segmentation est une première étape dans la plupart des problèmes de traitement d'images (Mariama & Hakdaoui, 2013). La segmentation est un moyen de partitionner l'image en segments basés sur les valeurs pixels et sur leur position. Les pixels qui sont spatialement connectés et qui ont

des valeurs similaires sont regroupés dans un même segment (Faivre, 2018). Les segments sont construits sur un critère spectral et spatial.

*Sortie* : polygones vectoriels avec les attributs statistiques dérivés de l'image originale (bandes spectrales et/ou indices par exemple) : min, max, moyenne, médiane, ...etc.

Deux familles basiques d'algorithmes de segmentation (Mariama & Hakdaoui, 2013) :

- a. Détecteurs de discontinuités ; détectent les changements brusques dans le signal,
- b. Détecteurs d'homogénéité ; détectent les zones des caractéristiques similaires.

L'utilisation des informations supplémentaires telles que le mouvement ou la profondeur améliore les résultats.

#### Détecteurs de discontinuités

- Pour détecter les discontinuités, les filtres détecteurs de bords sont couramment utilisés à partir des opérateurs de gradient ou de Laplace. Ensuite l'union des bords sera nécessaire pour délimiter correctement les objets,
- C'est un processus complexe et non toujours fiable qui se trouve très affecté par le bruit.

#### Détecteurs d'homogénéités

Techniques basées sur l'homogénéité des pixels. Les plus courants sont :

- Seuillage ; détection en utilisant techniques basées sur le seuillage manuel ou automatique. On peut utiliser un seuil global pour l'image ou des seuils locaux.
- Croissance de régions Analyse la *Region Adjacency Graph* (RAG), fusionne les régions les plus semblables et actualise le RAG avec les nouvelles valeurs. Ce processus utilise l'itération jusqu'à atteindre un certain critère de terminaison.
- Split & merge Pas de split : Divise l'image en régions disjointes en analysant le critère de similarité. Cette étape est faite en suivant une structure d'arbre quaternaire. (QuadTree).

Pas de merge : Fusionne des feuilles de l'arbre en tenant en compte du critère de similarité. Cette étape ne suit pas une structure prédéterminée.

#### Watershed

L'algorithme Watershed est une technique de segmentation basée sur des outils morphologiques qui combine les concepts de croissance de régions et de détection de bords :

- Groupe les pixels autour des minimas de l'image,

- Les frontières des régions se trouvent dans les points (crêtes) de gradient maximal de l'image.

Le processus peut se comprendre comme le résultat d'inonder un relief topographique :

- L'image est interprétée comme un relief,
- L'eau s'introduit par les minimales du relief,
- Quand deux fronts d'eau se trouvent, une digue se lève.

Transformée de Hough

Cette transformée peut servir à localiser les objets dont la forme est connue. L'exemple le plus simple est l'application de la transformée de Hough pour la localisation de lignes droites ou de figures avec une forme circulaire.

Morphologie mathématique

Ils sont des outils très puissants de traitement de signal qui permettent de filtrer des éléments de caractéristiques concrètes dans la scène en préservant les autres.

La morphologie mathématique a été développée à l'origine pour des images binaires et a ensuite été étendue aux fonctions et aux images à différents niveaux de gris. Ce sont des outils non linéaires qui sont basés sur des critères d'ordre et ne sont pas facilement applicables aux images vectorielles.

Exemple des filtres morphologiques sur des images binaires :

- ✓ Erosion,
- ✓ Dilatation,
- ✓ Ouverture,
- ✓ Fermeture.

### 3.10.4.3. Classification thématique

C'est l'étape d'analyse des images dirigée vers la génération de cartes thématiques pour l'utilisateur final à partir de l'information d'entrée. C'est-à-dire, il s'agit de transformer les données numériques des images en catégories descriptives qui identifient différents éléments de l'image. Les catégories ou les classes sélectionnées pour la carte thématique doivent pouvoir être discriminées à partir des données numériques de l'image (Mariama & Hakdaoui, 2013).

Les algorithmes de classification peuvent fonctionner sur plusieurs bandes spectrales et/ou indices radiométriques (Faivre, 2018). La classification numérique des images utilise l'information spectrale contenue dans les valeurs d'une ou de plusieurs bandes spectrales. Les pixels peuvent être

classés individuellement. Deux classes, une classe d'information (ex. surface d'eau superficielle) et classe spectrale qui est définie comme étant un groupe de pixel ayant les mêmes caractéristiques (ex. riche en activité chlorophyllienne).

Il existe divers types de classificateurs en fonction de l'information qu'ils utilisent :

➤ Classificateur spectral

Il est basé sur le fait que les différentes classes de l'image possèdent différentes combinaisons de valeurs numériques dans chaque bande grâce à ses propriétés de réflectance ou émittance.

➤ Classificateur spatial

Il est basé sur l'analyse de la relation entre les pixels voisins, en considérant des aspects comme la texture, la proximité, la taille, la forme, la répétition, ...etc.

➤ Classificateur temporel

Il utilise des images acquises à différentes dates pour favoriser le processus de classification (p.ex. les récoltes ou certains types de végétation ont des propriétés spectrales différentes selon la saison de l'année ce qui facilite son identification).

➤ Classificateur orienté à un objet

Il est un classificateur hybride spatial et spectral qui a l'habitude d'inclure des étapes préalables de segmentation pour guider la classification et ainsi obtenir un objet complètement assigné à une classe possible.

#### **3.10.4.4. Phase d'Extraction de Caractéristiques**

Il est basé sur l'application d'une transformation spatiale ou spectrale pour obtenir les caractéristiques les plus intéressantes pour la classification (Mariama & Hakdaoui, 2013). Dans cette étape :

- ✓ On a extrait l'information de l'image ou des bandes originales,
- ✓ On peut supprimer la variabilité non désirée dans les signatures spectrales (indices spectraux).  
Exemple : l'indice de végétation (IV),
- ✓ On peut améliorer la séparabilité des classes spectrales,
- ✓ On peut réduire le nombre de bandes (Analyse de Composants Principaux).

#### **3.10.4.5. Phase d'Entraînement**

Sélectionner des pixels représentatifs des classes désirées pour entraîner le classificateur. On peut le faire de forme supervisée ou non supervisée.

### *Séparabilité*

Avant de passer à la phase d'entraînement il est recommandable de faire une analyse de séparabilité des classes pour pouvoir évaluer si la classification est possible ou s'il y aura des classes qui ne pourront pas être discriminées.

### *Entraînement Supervisé*

Les échantillons d'entraînement sont étiquetés par l'utilisateur. Il implique une connaissance préalable du terrain (données in situ, cartes, photo-interprétation, ...etc.).

Toutes les classes dans l'image doivent être tenues en compte pour éviter les erreurs (Solution : appliquer des seuils dans la phase d'assignation).

L'analyste doit sélectionner des aires représentatives pour chaque classe pour obtenir le rang de niveaux numériques correspondants à chaque catégorie.

Les aires d'entraînement peuvent s'établir grâce à des visites de champ, cartes, photo-interprétation, ...etc.

Chaque aire d'entraînement (ROI) doit inclure le rang de la variabilité de la classe (Utiliser plus de 1 aire d'entraînement pour chaque classe).

Nombre de pixels d'entraînement  $> 10 * N$  (N : nombre de bandes utilisées). C'est recommandé  $100 * N$ .

Il n'existe pas, de garanties que les classes seront distinguées (1 thématique  $\leftrightarrow$  1 spectral).

### *Entraînement non Supervisé*

Les échantillons d'entraînement ne sont pas étiquetés. Les classes se déterminent automatiquement.

- Ne requiert pas la connaissance préalable de la zone.
- L'algorithme localise des concentrations ou des groupes (clusters) de pixels avec caractéristiques similaires (on assume que les classes ont des valeurs similaires spectrales).
- Les groupes représentent des classes dans l'image mais tout de suite ils doivent être étiquetés selon les classes d'intérêt.
- Il n'y a pas de garantie que les classes spectrales obtenues correspondent avec les classes d'intérêt.

- On ne connaît pas le nombre de groupes dans l'image user plus que les classes d'un intérêt.
- En général l'image complète se classe (entraînement + assignation) au lieu d'utiliser les aires d'image pour l'entraînement non supervisé.

Le processus itératif est répété jusqu'à le changement des valeurs moyennes atteignent un seuil.

#### *Entraînement Mixte*

Il combine les deux types d'entraînement. Il y a quelques possibilités :

- En premier lieu, on fait l'entraînement non supervisé (trouver des classes spectrales représentatives dans les sous-images) pour guider le supervisé et pour sélectionner les classes thématiques séparables.
- En premier lieu supervisé, en étiquetant les classes connues, pour guider le non supervisé dans l'initialisation des clusters.
- Appliquer les deux méthodes séparément et combiner les résultats.

#### *Phase d'Assignation ou Étiquetage*

Cette étape consiste à assigner chaque pixel de l'image à l'une des classes existantes. Une image thématique est obtenue.

#### Précision de la classification

Il faut vérifier la précision de la classification. Les principales sources sont :

- a. Structure du terrain (forme, direction et taille des objets, distribution spatiale des classes, degré de mélange, pente du terrain, ...etc.),
- b. Use des images avec une résolution spatiale ou spectrale inadéquate,
- c. Influences de l'atmosphère,
- d. Dates d'acquisition non appropriées.

Les méthodes habituelles sont :

- Visuellement,
- Matrice de confusion / erreur.
- ✓ Utilisation des données in-situ (2 ensembles indépendants, l'un pour la phase d'entraînement et les autres pour l'évaluation).

- ✓ Vérification du pourcentage de pixels de chaque classe de l'image classés correct et erronément.
- Coefficient Kappa

#### Matrice de confusion

- Méthode pour quantifier la précision d'une classification,
- Matrice carrée (rangées : des classes réelles, colonnes : des classes de classification)
- La diagonale indique le nombre de pixels classés correctement,
- Les valeurs dehors de la diagonale correspondent aux classifications erronées.
- ✓ Précision globale (overall accuracy): pixels corrects / totaux,
- ✓ Erreur d'omission (les pixels d'une classe qui n'est pas détectée comme tel) : Déchet des files.
- ✓ Erreur de commission (pixels classés de forme incorrecte): Déchet des colonnes.
- Il Permet de connaître les conflits principaux entre des classes ---- redéfinir les classes.

#### Coefficient Kappa

- Le coefficient Kappa mesure la correspondance entre l'image classée et la réalité et cette correspondance qui est obtenue en faisant une classification aléatoire,
- Essaie de mesurer le degré d'ajustement grâce à la précision de la classification, en éliminant des facteurs aléatoires.

0 : accord grâce au hasard,

1 : accord total de l'image et de réalité,

Négatif : classification mauvaise.

- Permet de comparer différentes méthodes (différentes matrices de confusion).

Exemple, au niveau de la mer ; la variation de la qualité physico-chimique de l'eau, sa couleur, sa température, sa turbidité, présence ou absence d'espèces faunistique et floristique peuvent causer la création de sous classes.

Ces paramètres sont utilisés pour identifier et classer numériquement les pixels sur une image. Ce procédé donne à chaque image une certaine classe ou thème basé sur les caractéristiques statistiques de la valeur de l'intensité du pixel.

Deux approches générales qui sont souvent utilisées, la classification supervisée et la classification non supervisée.

#### **3.10.4.6. Classification non-supervisée**

La classification non-supervisée est un processus de classification (groupement de pixels ayant des caractéristiques communes) basé sur l'analyse d'une image sans que l'utilisateur ne fournisse d'échantillons de classe (Faivre, 2018). Le logiciel utilise un algorithme permettant de déterminer quels pixels sont liés puis regroupés en classes. L'utilisateur peut spécifier quel algorithme utilisé, ainsi que le nombre de classes souhaité. Cependant l'utilisateur doit avoir une connaissance de la zone afin de pouvoir associer les classes produites à la réalité de l'occupation du sol (tel que les surfaces d'eau, zones humides, aires urbaines, sol agricole, forêt, ...etc.).

Avantage ; processus totalement automatique (a priori),

Inconvénient ; impossible de savoir à l'avance le nombre de classes nécessaires, car pas d'expertise en entrée,

Parmi les algorithmes nous citons *K-Means*, *ISODATA*, etc.

#### *Méthodes d'échantillonnage sur l'image*

La méthode d'échantillonnage adoptée est dite aléatoire stratifiée. La méthode consiste à prendre au hasard un nombre de 30 points (pixels) par classe à condition que toutes les classes contenues dans la maille soient échantillonnées. Les méthodes d'échantillonnage se résument comme suit :

- a. Choix de la zone et/ou du type d'objet,
- b. Définition du polygone d'échantillonnage,
- c. Vérification de la qualité de l'échantillon au regard du nombre de pixels, des valeurs statistiques (moyennes, écart-types, ...etc.), de la signature spectrale de l'échantillon dans les différents canaux sélectionnés,
- d. Rejet ou sauvegarde de l'échantillon,
- e. Nouvel échantillon dans le même type d'objet et/ou dans un nouveau type. Il est indispensable de réaliser plusieurs échantillons sur le même type d'objet et d'échantillonner tous les types d'objets.

Pour pouvoir réaliser un bon échantillonnage, il faut :

- a. Avoir une idée relativement précise des objets et de leur répartition dans l'image,

- b. Tenir compte des canaux les plus caractéristiques définissant l'image (même s'ils n'ont pas servi à la visualisation),
- c. Multiplier au maximum les échantillons de départ et procéder par élimination,
- d. Etudier les valeurs statistiques obtenues et en particulier les profils spectraux,
- e. Procéder à différentes échelles depuis les grandes composantes jusqu'aux objets ponctuels,
- f. En d'autres termes : une bonne classification s'appuie sur un bon échantillonnage, et un bon échantillonnage s'appuie sur une bonne étude préalable de l'image via les histogrammes, les composantes statistiques et les documents disponibles.

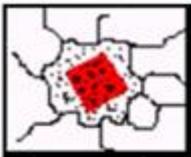
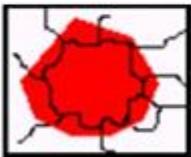
ECHANTILLON	CARACTERISTIQUES	CLASSIFICATION
	Très petit nombre de pixels - profil bien identifié- écarts types très faibles	Objet bien classé - beaucoup de non classés - marges de l'objet non classés
	Grand nombre de pixels - moyenne générale bonne - points aberrants - profil mixte	Objet bien classé - confusion avec objets sur les marges - peu de non classés, beaucoup de mal classés
	Nombre de pixels moyen - double profil - fort écart-type	Confusion entre 2 types d'objets - risques de mal classé
	Nombre de pixels moyen - profil mixte ou double - fort écart-type- objet composite	Classification quasi-impossible en raison du caractère mixte de l'objet défini par plusieurs composantes (savane arborée)

Fig. 59. Exemple d'échantillonnage et incidence sur ma classification

#### 3.10.4.7. Classification supervisée

La classification supervisée : elle consiste à identifier sur l'image les échantillons assez homogènes qui représentent les différents types de surfaces ou de classes d'informations sur les objets thématiques.

La classification supervisée est basée sur le principe que l'utilisateur peut sélectionner des échantillons de pixels dans une image qui sont représentatifs de classes spécifiques, permettant de guider l'algorithme par l'utilisation de ces zones d'entraînement en tant que références pour la

classification de l'ensemble des pixels de l'image. La sélection de ces zones d'entraînement est basée sur la connaissance de l'utilisateur (Faivre, 2018).

Avantage ; l'expertise en entrée afin de guider l'algorithme peut donner lieu à de hautes performances, forts développements dans les techniques de machine Learning.

Inconvénient ; processus pas totalement automatique (semi-automatique), la performance dépend grandement de la qualité des échantillons de départ.

Avantage principal ; l'algorithme travaille pour vous en analysant les différentes dimensions spectrales. Votre contribution est de sélectionner des échantillons de pixels ... ce qui peut être automatisé s'ils sont sélectionnés dans une base de données existante.

Evaluation de la qualité de classification supervisée ou validation terrain

L'évaluation de la précision du processus de classification est effectuée par le calcul de :

- a. La matrice de confusion ; en utilisant le même jeu d'entraînement ou un jeu de validation,
- b. Les mesures de performance / métriques : précision (commission), rappel (omission), précision globale (OA), indice Kappa (0 à 1).

L'erreur de commission (précision) représente la part des pixels attribués à une classe mais qui en réalité n'y appartient pas. C'est une mesure des faux positifs. Les erreurs de commission apparaissent dans les lignes de la matrice, exceptées les valeurs situées dans la diagonale.

L'erreur d'omission (rappel) représente la part des pixels qui appartiennent à une classe mais qui sont attribués à une classe différente. C'est une mesure des faux négatifs. Les erreurs d'omission sont visibles dans les colonnes de la matrice, exceptées les valeurs situées dans la diagonale (Faivre, 2018).

La précision globale est calculée en sommant le nombre de pixels correctement classifiés et en divisant le tout par le nombre total de pixels évalués. Le nombre de pixels bien classés est indiqué dans la diagonale de la matrice de confusion. Le nombre total de pixels évalués correspond à la somme de la ligne/colonne des totaux.

#### **3.10.4.8. Evaluation de la qualité de classification**

Discussion d'une matrice de confusion : La matrice de confusion se construit en mettant respectivement sur les lignes et sur les colonnes les données de référence et la classification.

Ceci permet de calculer :

- a. La précision totale : nombre de pixels bien classés divisé par le nombre total d'individus.

- b. L'erreur d'excédents : pourcentage de pixels d'une classe issue de la classification qui appartiennent, en fait à d'autres classes dans les données de référence,
- c. La précision pour l'utilisateur : pourcentage de pixels d'une classe issue de la classification correspondant à la même classe dans les données de référence. Elle est égale à "100% - erreur d'excédents",
- d. L'erreur de déficits : pourcentage de pixels d'une classe de référence affectés à d'autres classes par la classification,
- e. La précision pour le réalisateur : pourcentage de pixels d'une classe de référence affectés à la même classe par la classification. Elle est égale à "100% - erreur de déficits".

La matrice de confusion contrôlant une classification doit toujours être fournie, avec, pour chaque classe, les risques de confusion avec telle ou telle autre classe.

### **3.10.5. Calcul des indices spectraux**

Ce sont des combinaisons entre des bandes pour obtenir un paramètre d'intérêt pour classer la végétation, eau, minéraux, ...etc. Ils sont basés sur le comportement du paramètre de réflectivité pour maximiser sa discrimination (Mariama & Hakdaoui, 2013).

Pour accompagner les classifications, divers indices sont souvent calculés pour compléter l'interprétation des résultats.

Si la tache urbaine est considérée, des indices synthétiques sont souvent extraits, soit à partir de la combinaison des mesures de luminance dans le visible et l'infrarouge ; indices de végétation, de brillance, du bâti, d'humidité du sol, de sol (Braun et Herold, 2004), soit de ratios favorisant l'extraction de la végétation et donc l'identification des zones non couvertes par la végétation (Banzhaf et al., 2009).

D'autres indices se concentrent sur les formes, qu'elles soient urbaines (indices morphologiques) (Benediktsson et al., 2003) ou paysagères (indices de paysage) (Bianchin et Bravin, 2008). La combinaison de plusieurs indices associés aux images initiales est par ailleurs utilisée pour améliorer les résultats (Tao et al., 2009).

#### **3.10.5.1. Indice de l'eau**

Qualité de l'eau

Le monitoring de la qualité de l'eau avec la télédétection est normalement obtenu à partir de quelques paramètres fondamentaux : turbidité, température, chlorophylle, ...etc.

L'existence d'une relation directe entre la variation de la réflectivité des canaux et la variation des paramètres de qualité d'eau a été étudiée avec des capteurs à moyenne et basse résolution spatiale (SeaWiFS, MODIS, MERIS, ... etc.) pour les eaux ouvertes.

Récemment, le satellite WorldView2 à haute résolution et avec 8 bandes spectrales a été lancé et il fournit des mesures de la qualité de l'eau des zones côtières ou des eaux continentales avec 2 m de résolution (Mariama & Hakdaoui, 2013).

#### *L'indice de l'eau*

L'indice connu sous le sigle anglophone *Normalized Differential Water Index (NDWI)* est défini par la formule suivante :

$$\mathbf{NDWI = (G - NIR) / (G + NIR)}$$

$$\mathbf{NDWI = (B3 - B5) / (B3 + B5)}$$

Avec :

B5 : bande PIR

B3 : bande Vert

#### *Autres indices spectraux concernant l'eau*

Indice	Source	Formule
$NDWI_{McFeeters}$	(McFeeters, 1996)	$(V - PIR) / (V + PIR)$
$NDWI_{Xu} = MNDWI$	(Xu, 2007)	$(V - MIR1) / (V + MIR1)$
$AWEI_{no\ shadow}$	(Feyisa, Meilby, Fensholt, & Proud, 2013)	$4 * (V - MIR1) - (0.25 * PIR + 2.75 * MIR2)$
$AWEI_{shadow}$	(Feyisa, Meilby, Fensholt, & Proud, 2013)	$B + 2.5 * V - 1.5 * (PIR + MIR1) - 0.25 * MIR2$
$WI_{2015}$	(Fisher, Flood, & Danaher, 2015)	$1.7204 + 171 * V + 3 * R - 70 * PIR - 45 * MIR1 - 71 * MIR2$

#### *Matière en Suspension*

La turbidité est définie comme l'absence de transparence d'un liquide due à la présence de particules en suspension. Plus les solides en suspension, l'eau semblera plus souillée et turbide. La turbidité est considérée comme un bon indicateur de la qualité de l'eau, si l'eau est turbide la qualité est inférieure. La turbidité influe sur le degré auquel la lumière est diffusée et absorbée par les molécules et les particules. Les eaux côtières peu profondes sont souvent caractérisées par une forte turbidité provoquée par la ré-suspension des sédiments de fond ou d'origine humaine (travaux, dragage, ...etc.). Les algorithmes qui calculent les matières en suspension dans l'eau (Total

Suspended Mater – TSM) sont basés sur l'augmentation de la réflectivité de l'eau dans la bande rouge et vert. Il existe une variété d'algorithmes qui calculent la turbidité principalement en utilisant plusieurs bandes dans le proche infrarouge (Mariama & Hakdaoui, 2013).

#### *Indice de turbidité de l'eau*

Pour les images Spot : XS1+XS2+XS3

Pour les images Landsat : TM1+TM2+TM3+TM4

Les indices n'ont pas d'unités puisqu'ils correspondent à des valeurs de compte numériques brutes.

#### **3.10.5.2. Indice de Salinité**

Dans l'océan est défini comme le nombre de grammes de sel par 1000 grammes d'eau. 1 gramme de sel par 1000 grammes d'eau est définie comme 1 PSU (unité de salinité pratique). En haute mer, l'intervalle de salinité est généralement 32-37 psu. La salinité de surface de la mer (SSS) peut être mesurée par les radiomètres micro-ondes passives qui travaillent autour de 1,4 GHz. La puissance reçue par le radiomètre est proportionnelle à l'émissivité de la micro-onde et de la température de la surface de l'océan. Le sel augmente la réflectivité et diminue l'émissivité de l'eau. Ainsi, si la température de l'eau peut être obtenue par d'autres moyens, la salinité peut être dérivée à partir du rayonnement reçu. La télédétection par satellite ne pouvait pas mesurer la salinité jusqu'à l'année 2009, avec le lancement de la plate-forme SMOS (ESA). SMOS mesure la SSS en utilisant 24 radiomètres à faible bruit dans chaque bras de 4,5 m et l'antenne en forme de Y. La précision est de 0,1- 0,2 psu et la résolution est environ 35 km. Aquarius (NASA) a été lancé en 2011 et comprend un radiomètre plus un diffusiomètre pour mesurer la salinité et pour prendre en compte des effets de la rugosité de la surface de la mer dans le signal qui arrive au radiomètre. (Mariama & Hakdaoui, 2013).

L'indice connu sous le sigle anglophone *Normalized Differential Salinity Index* (NDSI) est défini par la formule suivante :

$$\text{NDSI} = (\text{Red} - \text{NIR}) / (\text{Red} + \text{NIR}) = (\text{B4} - \text{B5}) / (\text{B4} + \text{B5})$$

#### **3.10.5.3. Température de surface**

Elle est connue sous le sigle anglophone *Land Surface Temperature* (LST) est définie par la formule suivante :

$$L = L_{min} + \left( \frac{L_{max} - L_{min}}{255} \times Q \right)$$

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L_i + 1)$$

Avec :

L : valeur de la radiance dans l'infrarouge thermique (IRT)

T : température exprimée en (Kelvin:K)

Q : Liminance

K1 et K2 : coefficients (K1= 666,09 W/m<sup>2</sup> et K2= 1282,71 k)

Lmin= 0.1238 W/m<sup>2</sup>, Lmax= 1.500 W/m<sup>2</sup>

Température de surface de la mer (SST)

La température de surface de la mer (SST) ; c'est la température de l'eau dans la couche superficielle de l'océan. Avant 1980 les mesures étaient obtenues à partir des instruments installés sur la côte, des bateaux ou des bouées. À partir de 1980 la majorité de l'information globale sur SST procèdent des estimations de satellite (Mariama & Hakdaoui, 2013).

- ✓ L'océan émet un rayonnement dans l'infrarouge thermique et dans la bande des micro-ondes. Le niveau reçu varie avec la température de la mer,
- ✓ Il y a des radiomètres en travaillant dans ces bandes pour mesurer la SST,
- ✓ Le rayonnement infrarouge thermique provient de la couche superficielle (10 premiers microns). Le rayonnement micro-onde provient du premier millimètre (1 mm),
- ✓ Les capteurs infrarouges ont une meilleure résolution (1 km) que les micro-ondes (25 km), mais sont affectées par les nuages qui absorbent le rayonnement émis.

### 3.11. Intégration des données télédéteectées dans un environnement SIG

L'intégration des résultats issus de traitements des images satellitaires donne la possibilité de faire des interprétations et des synthèses avec d'autres sources de données. L'intégration et l'emploi des données de télédétection constituent une demande croissante en particulier pour la cartographie numérique. Il s'agit de l'étape qui suit la structuration des données. Les travaux préparatoires qui précèdent facilitent d'autant plus cette étape que la réflexion aura été menée de manière approfondie (Koehl, 2006). L'intégration est une méthode qui implique la combinaison de données provenant de différentes sources et qui permet d'extraire une plus grande quantité et

meilleure qualité d'information. Ces dernières peuvent inclure des données multi temporelles, de plusieurs capteurs et des données d'autres types géométriquement liés entre elles ou ayant des coordonnées géographiques communes. L'intégration des données du Modèle Numérique de Terrain (MNT) peut augmenter la précision et de la visualisation de l'image. L'imagerie et l'extraction de l'information peuvent être intégrées dans un SIG pour une analyse plus poussée ou pour présentation avec des données auxiliaires telles que les pentes, les limites de propriété ou les routes. Le système permet d'intégrer et de traiter les données multi sources. Toutes les données disponibles, aussi bien celles issues des cartes, du terrain ou celles de la télédétection peuvent être intégrées au sein d'une base de données gérée par un SIG.

L'imagerie et l'extraction de l'information peuvent être intégrées dans un SIG pour une analyse plus poussée ou pour présentation avec des données auxiliaires telles que le trait de côte, les limites des surfaces d'eau de juridiction nationale et internationale, de voies d'accès, ...etc.

### **3.12. Buts et objectifs de la télédétection**

La télédétection est un outil qui prendra la forme de produits qui permet de fournir des services assurant ainsi une meilleure efficacité, une plus grande rapidité d'opération, un accroissement de l'automatisation et une économie accrue de l'information sur les ressources naturelles (ex. marines), sur leurs milieux physiques, biologiques, hydrodynamiques et environnementales. Il permet aux gestionnaires des milieux de traiter numériquement les images. Il permet de réduire le temps d'exécution des tâches et par conséquent les coûts.

La télédétection facilite notamment la surveillance permanente de la surface thématique considérée en permettant des analyses complexes de son évolution spatiale et temporelle, en relation avec les différents facteurs qui l'influencent. L'imagerie satellitaire est en particulier utile pour le suivi des phénomènes naturels et anthropiques.

L'image satellite est sans doute le modèle visuel le plus fidèle, le plus riche de l'espace géographique. Elle est la source d'informations abondantes et précises sur l'occupation du sol et sur les phénomènes qui se déroulent à la surface de la terre (Sall *et al.*, 2019). L'intérêt de l'image satellitaire réside dans la stabilité de la qualité des données fournies et la possibilité avec un même flux d'obtenir différentes informations modulées par le nombre de capteurs, le domaine spectral, la résolution spatiale (Chehata, 2017). La télédétection aérienne a connu ses premières expérimentations dès le début du 19<sup>ème</sup> siècle puis s'est réellement développée pendant les première et deuxième guerres mondiales par la prise de photographies militaires. Les premières images satellites apparaissent dans les années 60 mais c'est avec le lancement du satellite Landsat 1 en

1972 puis du satellite SPOT 1 en 1986 que l'observation de la Terre par satellite devient réellement opérationnelle (Campbell, 2011). Ils ont été les précurseurs de séries de satellites d'observation qui sont aujourd'hui en orbite, et régulièrement renouvelés. Selon leurs caractéristiques, les images satellites peuvent permettre l'identification d'objets au sol de quelques dizaines de centimètres, ou d'avoir des images de la surface terrestre avec une fréquence d'acquisition quotidienne (Herbreteau *et al.*, 2018). La quantité de données de télédétection archivées est de plus en plus importante et grâce aux nouveaux et futurs satellites, ces données offriront une plus grande diversité de caractéristiques spatiales, spectrales, temporelles, et superficie de l'emprise du satellite (Masse, 2013). La bonne résolution, la répétitivité, les grandes possibilités de stockage et de restitution rapide d'informations des systèmes permettent de réduire la durée des travaux cartographiques (amélioration d'interprétation, diminution du temps consacré à la prospection sur le terrain, possibilités de cartographie automatique de certains ensembles homogènes), ces techniques d'acquisition et de mémorisation des données relatives à l'occupation des sols devraient permettre de résoudre, en partie, les problèmes liés à la surveillance régulière et efficace du territoire (Girel, 1986). La télédétection permet de cartographier les sols, de mesurer leur humidité et d'observer leur dynamique (Merzouk, 1994), par une observation diachronique, elle apparaît comme un outil précieux du suivi de l'état de l'environnement (Karimoune et Ozer, 1994). Traditionnellement, l'estimation du taux de couverture de la végétation à partir de l'imagerie satellitaire se fait soit à l'aide de la classification conventionnelle soit à l'aide d'indices de végétation (Hill *et al.*, 1998).

La télédétection est un outil qui prendra la forme de produits qui permet de fournir des services assurant ainsi une meilleure efficacité, une plus grande rapidité d'opération, un accroissement de l'automatisation et une économie accrue de l'information forestière. Il permet aux gestionnaires des forêts de traiter numériquement les images. Il permet de réduire le temps d'exécution des tâches et par conséquent les coûts (Missoumi & Djillali, 1998).

Les données hyper spectrales offrent une vue unique des couverts forestiers, une vue impossible sans la technologie de télédétection. L'imagerie hyper spectrale renferme de l'information spectrale détaillée qui peut aider l'interprète de distinguer la différence entre espèces végétales principales et de détecter certains stress des arbres (infestations d'insectes). L'imagerie hyperspectrale consiste à acquérir une image avec un grand nombre (plusieurs centaines) de bandes spectrales étroites et contiguës. De par sa richesse spectrale, cette donnée offre le potentiel d'une caractérisation de l'occupation du sol plus fine qu'en utilisant les données multispectrales traditionnelles à 3 ou 4 bandes (Chehata, 2017).

Les données optiques fournissent une information spectrale détaillée, utile pour faire la différence entre deux types de surfaces, tandis que les images Radars mettent en évidence les détails structuraux de la surface.

Les changements d'état (extension ou régression de surface d'objets thématiques) ou de suivi (déplacement de la flore et la faune vers les hautes latitudes) peuvent être détectés par l'observation et l'analyse des images de la télédétection acquise à quelques jours, semaines, mois ou années d'écart.

### **3.13. Domaines d'application de la télédétection**

La télédétection est un outil très utile pour l'utilisation des terres ou la surveillance de la couverture des terres, ce qui peut être utile pour décider de la répartition de l'utilisation des terres et de la couverture des terres (Butt, 2015). Les applications utilisant les données satellitaires optiques et radar sont multiples (Rango et Salomonson, 1974) et nombreuses abouties à cause des développements récents des techniques de la télédétection. Parmi les principales applications nous citons celles qui sont utilisées dans tout le domaine de l'hydrobiologie marine et continentale (agriculture, foresterie, urbanisation, maritime et l'environnement).

#### **3.13.1. Secteur de l'hydrobiologie marine**

L'utilisation de la télédétection spatiale permet d'étendre, d'uniformiser et d'accélérer la couverture spatiale et temporelle de certains paramètres océaniques. En effet, les satellites offrent une vue globale et répétitive de la mer et des lagunes. Ainsi, les données satellitaires permettent d'avoir un aperçu d'un grand nombre de phénomènes de grand intérêt, comme la détection de zones de remontée d'eau (upwelling), la productivité primaire, la pollution, l'étude des courants et des vents de surface, l'interaction air / mer... Cependant, l'information apportée par les satellites est d'interprétation délicate.

D'une part les capteurs ne mesurent pas directement les paramètres océaniques, mais seulement des luminances de surface qui doivent être corrigées et transformées, et d'autre part parce que le rayonnement électromagnétique ne peut pas fournir d'information directe sur l'état interne de la mer, puisque la profondeur d'observation satellitaire dépend de la longueur d'onde et du type d'eau. Le développement des techniques de télédétection pour le domaine marin et côtier a été plus lent que celui des techniques utilisées pour les applications terrestres et atmosphériques.

Les océans sont tridimensionnels, et en général la télédétection décrit uniquement les phénomènes superficiels. Par conséquent les caractéristiques en profondeur ne sont détectables que par leur influence à la surface. qui sont accessibles à la mesure spatiale.

Les cartes ainsi générées à partir des modèles de turbidité et de bathymétrie issus des images satellites sont combinées avec d'autres sources d'information relevées à partir des missions de terrain à la même période (salinité, concentrations en phosphates, nitrates, oxygène dissous,). Toutes ces informations constituent une base de données qui a été introduite dans un système d'information géographique. Ce système permet à un gestionnaire de fixer des critères d'aménagement, de gestion et du choix de l'adaptabilité des zones à un type donné d'aquaculture.

La gestion du domaine maritime peut bénéficier de nombreuses applications internationales et domestiques de la télédétection. Mentionnons parmi celles-ci : la biodiversité, la biomasse marine, la bathymétrie, l'hydrodynamique, l'environnement, le suivi et la surveillance de la pêche, la cartographie de reconnaissance, sont autant d'applications qui utilisent la télédétection comme source d'information. Ce sont des paramètres clés mesurés par des méthodes de télédétection. La technologie satellitaire (imagerie radar) permet d'évaluer le stock de la ressource, de localiser géographiquement les poissons, de détecter les bateaux de pêche, les navires et de suivre leurs mouvements. Les images radar sont une technologie clef car elles permettent de détecter très rapidement tous les navires sur une zone d'intérêt. La télédétection peut permettre de mesurer :

c. En océanographie Biologique

1. Température de surface de la mer (SST),
2. Niveau de la mer (SSH),
3. Salinité (SSS),
4. Vents de surface,
5. Courants océaniques,
6. Couleur de l'océan,
7. Qualité de l'eau,
8. Prolifération,

d. En océanographie Chimique

1. Qualité de l'eau,
2. Salinité (SSS),
3. PH, calcite, ...etc.

e. En océanographie Géologique

1. Gestion des zones côtières,
2. Bathymétrie (érosion, sédimentation, ...etc.).

La concentration en chlorophylle peut aussi être repérée par satellite, elle permettra de connaître la quantité de phytoplancton présente. En effet, le phytoplancton est composé de milliards de cellules microscopiques et ces cellules possèdent des pigments dont la chlorophylle, qui utilisent l'énergie solaire pour la synthèse de la matière organique (production primaire). La présence du phytoplancton modifie donc les propriétés optiques de la lumière émise par la surface marine : plus il y a de chlorophylle, plus la couleur de la surface est verte.

- Détermination de l'indice de la Température de Surface de la Mer (TSM) : l'extraction de la bande infrarouge thermique (bande 6 des images Landsat (classification automatique),
- Détermination de l'indice de turbidité : deux formules (pour les images Spot on applique la formule :  $XS1+XS2+XS3$  et pour les images Landsat on applique la formule :  $TM1+TM2+TM3+TM4$ ).

Suivi de la distribution spatio-temporelle des espèces (ex. le thon pour des zones pilotes à partir de l'imagerie satellitaire).

#### **3.13.1.1. Bathymétrie**

Une application très récente est l'obtention de la bathymétrie des zones côtières peu profondes (jusqu'à 20 ou 30 mètres) à partir de données de satellites à haute résolution. C'est une question très complexe, car quelques bandes peuvent pénétrer assez loin et il faut éviter les effets de la réflectivité des fonds marins.

#### **3.13.1.2. Vents de surfaces**

Le vent océanique est le mouvement de l'atmosphère relatif à la surface de l'océan. Généralement, les vents sur l'océan sont mesurés avec anémomètres à proximité de la surface et fixés à des bouées, plates-formes ou de navires. Les vents également peuvent être mesurés à distance en utilisant radars Doppler qui peuvent obtenir le vent de la mer (la portée se limite généralement à plusieurs centaines de kilomètres en raison de l'atténuation du signal). Plus récemment, les progrès de satellites de télédétection ont permis des mesures du vent presque superficielles en utilisant des instruments passifs et actifs.

- ✓ Radiomètres passifs ; la surface de l'océan réagit rapidement à la circulation de l'air au-dessus, ce qui fournit un patron de rugosité différent en fonction de la vitesse relative et de la direction du vent par rapport à la surface de l'océan. La rugosité de la surface de l'océan fournit une «

luminosité » qui peut être détectée à l'aide spécifiquement des radiomètres à micro-ondes passives et peuvent être traduits avec précision à la vitesse du vent près de la surface.

- ✓ Radars actifs ; les longueurs d'onde spécifiques dans la bande de micro-ondes sont sensibles à la diffraction de Bragg, qui est un type caractéristique d'ondes superficielles, à une échelle centimétrique, dénommées ondes capillaires. Ils sont directement influencés par les changements dans les vents près de la surface, et permettent aux radars spécialisés, dénommé diffusiomètre, observer ces changements. Ces radars émettent des impulsions à micro-ondes à la surface de l'océan, ce qui disperse immédiatement une partie de l'énergie qui retourne au radar. Une fois que la section transversale du radar est normalisée, la vitesse du vent près de la surface peut être calculée en fonction de l'énergie rétrodiffusée. Contrairement aux radiomètres à micro-ondes passives, le système du radar actif peut combiner les mesures depuis différents angles d'azimut pour obtenir la direction approximative du vent (Mariama & Hakdaoui, 2013).

#### **3.13.1.3. Courants marins**

Les courants marins sont le mouvement continu et dirigé des eaux océaniques générées par les forces qui agissant sur ce milieu. Les courants océaniques peuvent couler grandes distances, et jouent un rôle clé dans la détermination du climat de nombreuses régions de la Terre.

Les courants peuvent être causés par la pression du vent, par les gradients thermohalines ou par la force des marées. Ces courants sont aussi influencés par la rotation de la Terre grâce à la déviation de Coriolis. Les courants peuvent être estimés avec la télédétection à distance en utilisant altimètres (SSHA) ou à partir du calcul de flux optique en séquences d'images de la température de surface de la mer ou de la concentration de chlorophylle.

Altimètre

Les courants océaniques peuvent augmenter la hauteur de la surface de la mer jusqu'à un mètre au-dessus de la zone environnante. Par conséquent, les courants peuvent être calculés en mesurant les variations de hauteur à l'aide de satellites altimètres (Mariama & Hakdaoui, 2013).

#### **3.13.1.4. Couleur de l'océan**

Elle est la mesure du rayonnement spectrale obtenu à partir de la réflectance dans la bande visible.

Objectif principal : Extraire les concentrations de phytoplancton marin.

Le phytoplancton est l'ensemble des organismes aquatiques autotrophes du plancton, qui ont la capacité photosynthétique et qui vivent dispersés dans l'eau (Mariama & Hakdaoui, 2013). Le monitoring est important parce que :

- Il fixe le dioxyde de carbone dans la matière organique,
- Il joue un rôle clé dans le cycle global du carbone et climat,
- Il est responsable de la production primaire nette de la moitié de la Terre,
- Il est la base de la chaîne alimentaire marine,
- Il affecte divers secteurs, principalement la pêche,
- Surveillance des eaux côtières et de leur qualité.

#### **3.13.1.5. Déversements de pétrole**

Un autre aspect relatif à la qualité de l'eau est la détection de déversements de pétrole. Pour cela il est possible d'utiliser les données de radars d'ouverture synthétique (SAR) qui détectent la rugosité de la mer et par conséquent sous certaines conditions de vent, il est facilement détectable car la rétrodiffusion est beaucoup plus faible dans les zones contaminées par la marée noire. La détectabilité dépend essentiellement de la vitesse du vent (3 - 6 m/s), de l'état de la mer et de l'âge de la tache (Mariama & Hakdaoui, 2013).

#### **3.13.2. Exemple d'application de téledétection dans le secteur de la pêche en Algérie**

La géomatique est donc une activité à caractère opérationnel qui s'applique à de nombreux domaines tels que le secteur de la pêche en Algérie.

Il en ressort que lors des migrations, le thon longe les côtes Algériennes selon les saisons.

La connaissance des paramètres influents sur la répartition et l'abondance de poissons aide à évaluer une ressource halieutique. La recherche des effets environnementaux liés à la pêche consiste, en grande partie, à mettre en corrélation un nombre de paramètres avec la répartition spatiale et temporelle du poisson, qui est sensible à l'ensemble des facteurs du milieu marin.

Les cartes dérivées de l'imagerie satellitaire sont une source d'informations importante pour la localisation des zones à forte probabilité de présence ou d'abondance du thon.

le Ministère de la Pêche et des Ressources Halieutiques a confié à l'Agence Spatiale Algérienne la réalisation d'un projet portant sur la réalisation d'un SIG dédié au suivi et à l'optimisation de la pêche des thonidés en Algérie. Ce Système est réalisé à partir de l'exploitation de l'imagerie satellitaire des différents paramètres environnementaux influant la répartition du thon.

### 3.13.2.1. Objectifs

La réalisation de ce SIG basé sur l'exploitation des images satellitaires des différents facteurs environnementaux qui influent sur la répartition du thon (la température de surface de la mer, la couleur de la mer, la bathymétrie, et les courants) permettra la localisation des zones de pêche du thon au niveau du littoral Algérien, et sera un outil d'aide au suivi et à la gestion de cette ressource.

Les objectifs spécifiques se traduisent à travers :

1. L'étude de la relation entre les facteurs environnementaux et la répartition du thon pour mieux appréhender les déplacements migratoires du thon,
2. Le suivi de la distribution spatiotemporelle du thon sur des zones pilotes à partir de l'imagerie satellitaire,
3. Le développement d'un système d'information géographique, comme un outil d'aide à la pêche thonière en Algérie.

### 3.13.2.2. Phases du projet

Phase 1 : collecte des données

La constitution de la base de données est établie par la saisie des données de pêche (zones de production) comme outil permettant de constituer un historique et une banque de données d'une série d'images et de cartes marines.

Mesures in situ

Inventaire des données historiques pouvant intervenir dans l'étude (le nombre d'années de mesures disponibles ; la nature des données *in situ* (température de surface de la mer, salinité, etc.).

Images satellitaires

Acquisition des images multi temporelles (Seawifs et images NOAA- AVHRR, MERIS, ASTER) associées à la même période des mesures collectées.

Les informations extraites des traitements de ces images sont :

- a. La température de surface de la mer (SST),
- b. La répartition spatiale et temporelle de la concentration en chlorophylle-A , la concentration des pigments de chlorophylle-A,
- c. La concentration des pigments de chlorophylle-A (pigments photosynthétiques de phytoplancton) qui est souvent considérée comme un indice de productivité biologique et la dynamique des phénomènes biologiques.

## Cartes marines

Les cartes marines concernent :

1. Carte bathymétrique,
2. Carte de la circulation des masses d'eau dans le bassin Algérien,
3. Carte de déplacements migratoires du thon rouge.

## Phase 2 : détermination des relations Thon - environnement

Pour faciliter l'analyse et l'interprétation des images satellites fournies, la compréhension des mécanismes et des lois physiques régissant le déplacement des masses d'eau en fonction des caractéristiques de ces dernières est indispensable. De même, la notion d'écosystème ainsi que l'incidence des facteurs biotiques et abiotiques sur celui-ci (production primaire et chaîne alimentaire, communautés planctoniques, etc.) sont des acquis indispensables pour une bonne compréhension du « compartiment océanique » qu'ils exploitent.

L'objectif de cette phase est d'étudier sur la base de données disponible, l'évolution saisonnière et interannuelle des paramètres environnementaux ayant une influence sur la présence du thon rouge, et d'établir des analyses statistiques pour quantifier l'effet des différents facteurs.

## Phase 3 : mise en œuvre de la méthodologie sur les zones pilotes

- a. Définition des zones et périodes de pêche (selon des campagnes de pêche précédentes),
- b. Détermination des propriétés thermiques et bio-optiques qui conditionnent la distribution spatio-temporelle du thon par analyse de la distribution du thon à partir d'une série d'images multi temporelles et des données in-situ collectées par des pêcheurs et des chercheurs.

Les données mesurées en mer comprennent :

- a. La température de surface et la profondeur,
- b. Traitement des données satellitaires ; pour analyser la distribution du Thon, une série d'images multi temporelles nous permettra de déterminer les propriétés biophysiques ayant influence sur la présence du thon ;
- c. La Température de surface de la mer (images NOAA AVHRR, MERIS, ASTER),
- d. La Couleur de la mer (images SEAWIFS et MODIS aqua),
- e. Les courants (images Jason-2, Topex-poseidon),
- ✓ La bathymétrie (cartes marines numérisées),

- ✓ Dérivation des cartes de température de surface pour mettre en évidence les fronts thermiques,
- ✓ Extraction des couches d'informations et intégration de ces dernières dans un modèle spécifique,
- ✓ Conception du SIG et fourniture de cartes interprétées qui indiquent sur des zones pilotes, des probabilités de présence de l'espèce, en croisant un certain nombre de variables pertinentes.

#### *Spécifications de l'espèce*

Nom latin : *Thunnus thynnus*

Espèce pélagique de surface qui peut prolonger jusqu'à 1000 m.

Distribution : Atlantique nord et mers adjacentes.

Grand migrateur : les jeunes se déplacent en bancs, les adultes se concentrent à l'époque de la reproduction.

Prédateur de poissons crustacés et céphalopodes.

Température : entre 3 – 30°C

Longévité : de 20 à 40 ans

Taille maximum : supérieure à 3m, 700 kg

Ponte annuelle : mai - juin

Zones de ponte connues : Mer Méditerranée et golfe du Mexique

Facteurs environnementaux influant la répartition du thon rouge

Couleur de la mer (pigments de chlorophylle-a) :

Les concentrations de chlorophylle sont obtenues à partir de la couleur de l'océan issue des traitements d'images spécifiques. La communauté de végétaux à la base de la chaîne alimentaire est presque entièrement constituée d'organismes microscopiques collectivement appelés phytoplancton, lequel contient de la chlorophylle qui modifie la couleur de l'océan, elle est considérée comme un indice de la productivité biologique et elle peut être rapportée à la production de poissons. Les concentrations de chlorophylle au-dessus de 0,2 mg/m<sup>3</sup> indiquent une présence de plancton suffisant pour entretenir une pêche commerciale viable.

En utilisant des instruments optiques à bord de satellites pour détecter la présence de pigments qui émettent à des longueurs d'ondes précises du spectre de la lumière visible, nous pouvons mesurer la quantité et la répartition du phytoplancton dans l'océan. Nous appliquons ensuite une calibration

pour transformer les données en concentration de chlorophylle, habituellement exprimée en milligrammes par mètre cube d'eau. Les pigments de chlorophylle ont une signature spectrale spécifique et distincte, car ils absorbent la lumière bleue (et rouge) et reflètent fortement le vert, influant ainsi sur la couleur de l'océan.

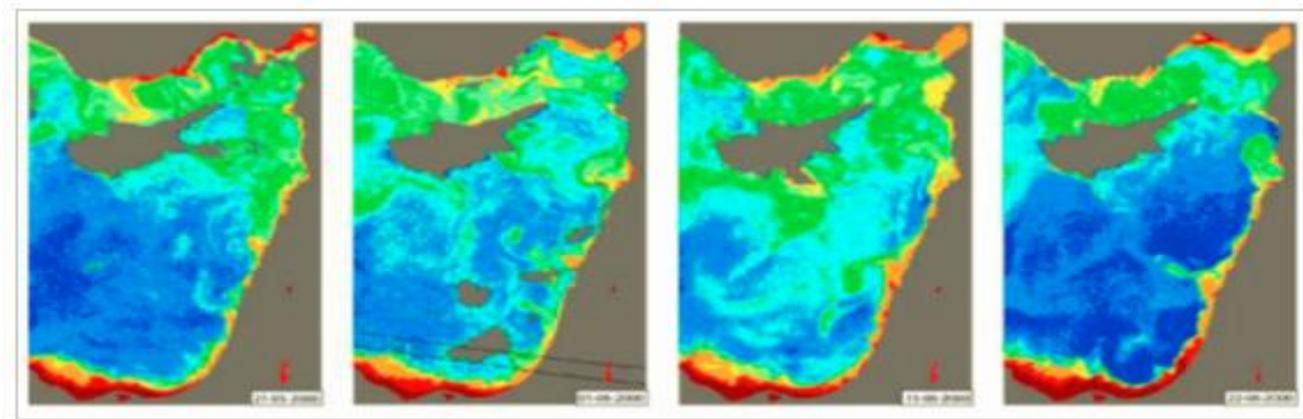


Fig. 60. Image de la Chlorophylle-A au niveau de la Méditerranée orientale (2001)

Il est bien connu que certaines espèces du thon tel que le thon rouge se nourrissent dans les eaux chaudes des fronts thermiques du large des côtes. La température de surface, observée dans l'infrarouge, est une donnée importante de la dynamique des océans. Elle influe énormément sur la répartition des poissons. La température de surface (SST) est calculée à partir du rayonnement émis sur la surface de la mer. Le rayonnement infrarouge peut traverser quelques millimètres d'eau, ainsi la grandeur mesurée est la température intégrée sur cette fine couche d'eau superficielle.

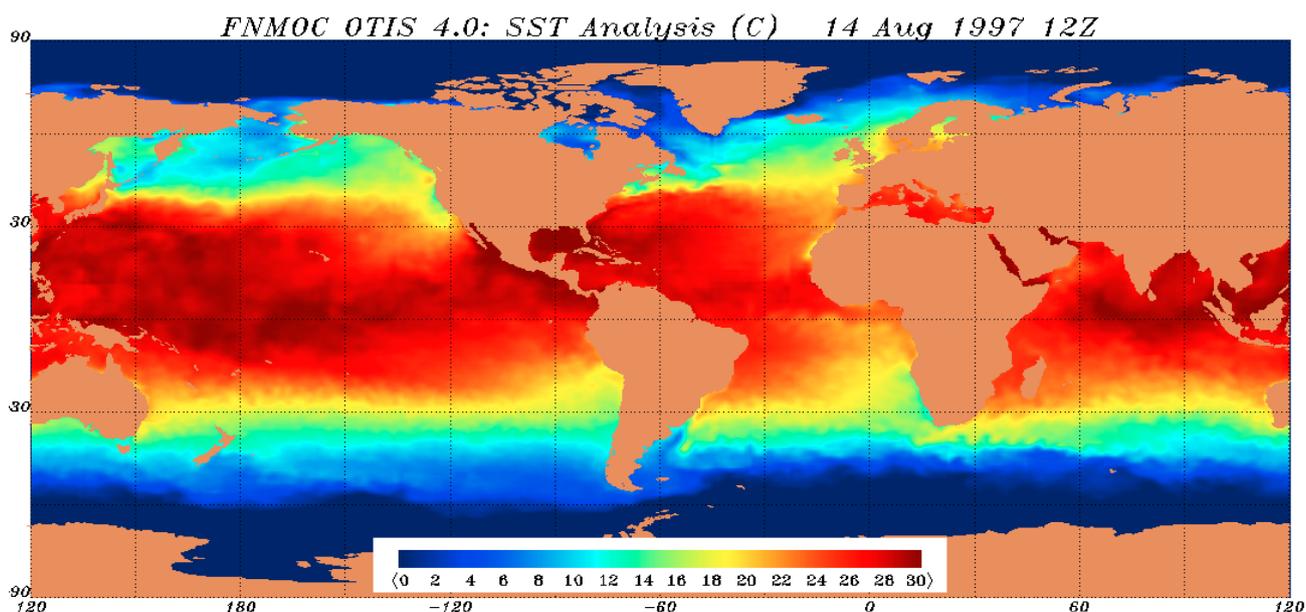


Fig. 61. Image de la température de surface "SST" (NOAA, 1997)

On sait depuis bien longtemps qu'une mer agitée sous l'effet du vent, influe sur la répartition du poisson. Les courants sont en effet en permanence surveillés par les satellites altimétriques tels que Topex/Poseidon, ERS1/2 et Jason-1. En mesurant la hauteur des mers, on déduit le niveau des océans et ses variations.

Les grands courants y imposent leur signature. On observe des creux et des bosses à la surface de l'océan. Les différences d'élévation, de l'ordre de 1 à 2 m, sont évidemment faibles au regard des centaines ou milliers de km parcourus par le courant, si bien qu'elles sont indétectables par l'œil nu.

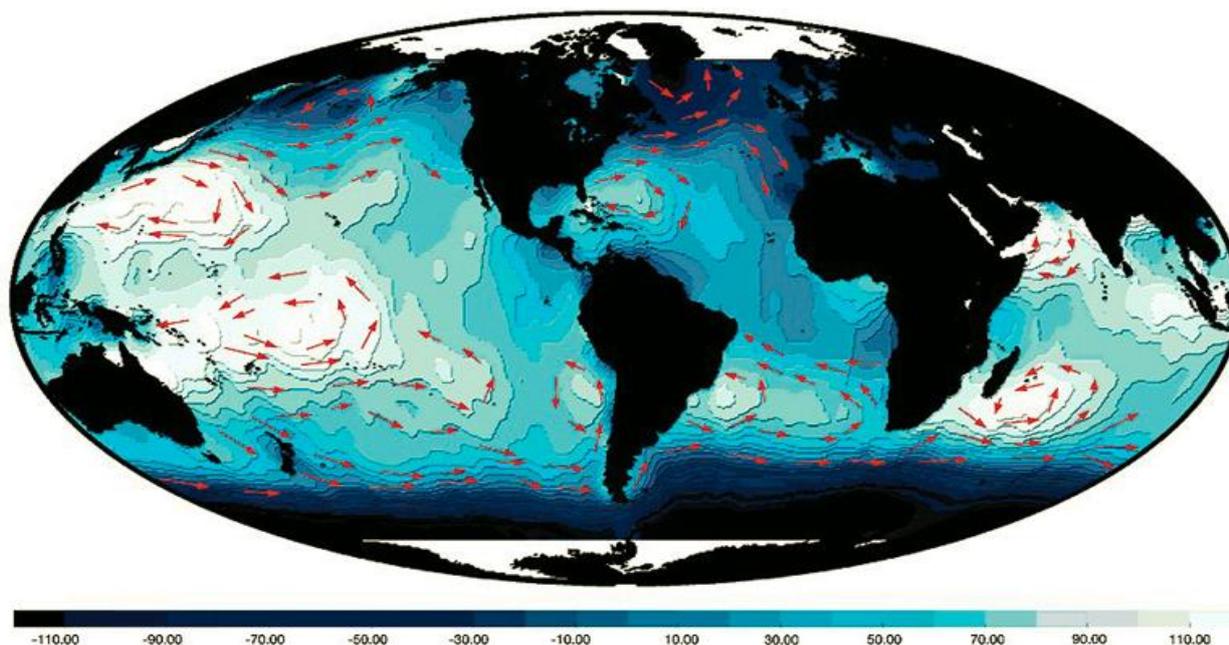


Fig. 62. Les courants océaniques observés par les satellites d'océanographie (d'après CNES)

### 3.14. Conclusion

La géomatique (SIG + télédétection), devient actuellement une activité de recherche et de développement car elle forme un réseau de connexions entre différents domaines scientifiques et technologiques.

La télédétection offre de nombreux avantages tels que le stockage numérique des données, la répétitivité fréquente, la livraison rapide, la possibilité d'intégration dans un SIG et une mise à jour aisée de l'information. La télédétection, de par sa vision synoptique, actualisée et objective sur l'état de la surface terrestre, constitue une source d'information pertinente pour le suivi de l'agriculture à l'échelle régionale et son utilisation dans le cadre des systèmes de suivi de la sécurité alimentaire pourrait être renforcée (Leroux, 2015). La télédétection est un outil d'investigation à associer à d'autres techniques pour l'analyse de l'évolution des couverts végétaux. La télédétection est considérée comme étant un outil performant de travail utilisé souvent pour la connaissance, le

---

contrôle, le suivi et la surveillance des milieux physiques, biotiques et abiotiques. La télédétection se couple avec les SIG d'où ils fournissent une plate-forme appropriée pour l'analyse et la mise à jour des données (Goodchild & Barbara, 2009).

## Références bibliographiques

- ASAL, Agence Spatiale Algérienne (2018). *Utilisation des systèmes spatiaux nationaux dans le développement et le suivi des zones frontalières 13-14 octobre 2018* (ASAL). Disponible sur : [www.interieur.gov.dz/.../MICLATsept2018v3DEF-ilovepdf-compressed.p...](http://www.interieur.gov.dz/.../MICLATsept2018v3DEF-ilovepdf-compressed.p...) (Consulté le 14/02/2019).
- Bekhti, Mohammed and Sweeting, MN. (2008). Power system design and in orbit performance of Algeria's first micro satellite Alsat-1. *Electric power systems research*, 78(7), 1175-1180. <https://openresearch.surrey.ac.uk/esploro/outputs/journalArticle/Power-system-design-and-in-orbit-performance-of-Algerias-first-micro-satellite-Alsat-1/99514324802346>
- Benhamouda F., (2005). Systtème d'analyse et d'aide à la décision de lutte antiacridienne. Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable". 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc. Disponible sur : [http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/03/Doc.%20IS%20n%C2%B020%20Workshop%20Inter.%20TSIG\\_ISDD%20-2006.pdf](http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/03/Doc.%20IS%20n%C2%B020%20Workshop%20Inter.%20TSIG_ISDD%20-2006.pdf)
- Boukerch, I., Hadied, M., Mahmoudi, R., Takarli, B., & Hasni, K. (2012, November). Rigorous geometrical modeling of ALSAT-2A Algerian satellite. In *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVI* (Vol. 8533, pp. 437-445). SPIE. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Rigorous-geometrical-modeling-of-ALSAT-2A-Algerian-Boukerch-Hadied/096acb19de8da84d78fd21452d78ee797c70a8f4> (Consulté le 25/01/2015).
- Bonnet F., & Rochon G. (1992). Précis de télédétection volume 1 : Principes et méthodes. Sainte-Foy : Presse de l'université du Québec/AUPELF, 485 p. Disponible sur : [https://www.scirp.org/\(S\(vtj3fa45qm1ean45vvffcz55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1878582](https://www.scirp.org/(S(vtj3fa45qm1ean45vvffcz55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1878582) (consulté le 12/02/2015).
- Caloz, R., & Collet, C. (2001). *Précis de télédétection-Volume 3 : Traitements numériques d'images de télédétection* (Vol. 3). PUQ. [https://www.researchgate.net/publication/327538872\\_Precis\\_de\\_teledetection\\_-\\_Volume\\_3\\_Traitements\\_numeriques\\_d'images\\_de\\_teledetection](https://www.researchgate.net/publication/327538872_Precis_de_teledetection_-_Volume_3_Traitements_numeriques_d'images_de_teledetection)
- Chehata N. (2017). *Contributions méthodologiques pour la caractérisation des milieux par imagerie optique et LiDAR* (Thèse de doctorat. Université paris-est). Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01494206/document> (Consulté le 19/03/2019).
- Charbonnel A., (2005). Documentation nautique – Support. Les cartes marines. V1.3 – 09/05. 1/14. ENMM Le Havre - France. 14p. Disponible sur: <http://www.ressources.profmarine.fr/polycopies/CahierNav1.pdf> (Consulté le 15/02/2017).
- Chakroun H., (2014). Cours SIG (système d'information géographique). Introduction aux SIG et à la télédétection en génie civile. (Ecole nationale des ingénieurs de Tunisie (ENIT)). Disponible sur: [https://www.academia.edu/5138784/cours\\_SIG\\_syst%C3%A8me\\_dinformation\\_g%C3%A9ographique](https://www.academia.edu/5138784/cours_SIG_syst%C3%A8me_dinformation_g%C3%A9ographique) (Consulté le 12/03/2015).
- CGDD, Commissariat général au développement durable (2009). *CORINE Land Cover France Guide d'utilisation, Service de l'observation et des statistiques, document technique, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire—France*. (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire-France.). Disponible sur:

[https://scholar.google.com/scholar?cluster=17299728741914810312&hl=fr&as\\_sdt=2005&sciodt=0,5](https://scholar.google.com/scholar?cluster=17299728741914810312&hl=fr&as_sdt=2005&sciodt=0,5) (Consulté le 13/03/2012).

- Eckhardt, D. W., Verdin, J. P., & Lyford, G. R. (1990). Automated update of an irrigated lands GIS using SPOT HRV imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(11), 1515-1522. [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1990journal/nov/1990\\_nov\\_1515-1522.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1990journal/nov/1990_nov_1515-1522.pdf)
- Escadafal R. (1989). Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. *Editions de l'ORSTOM, Collections Études et Thèses, Paris*. Disponible sur : <https://core.ac.uk/download/pdf/39865262.pdf> (consulté le 29/08/2016).
- Faivre R. (2018). *Introduction à la réalisation de spatio-cartes* (université de Strasbourg-France). Formation Télédétection, UEH, 10-12 mai 2018. Disponible sur: <https://www.recovery-bservatory.org/drupal/fr/system/files/public/News/20180511%20-%20Intro%20Realisation%20Spatiocarte.pdf> (Consulté le 12/03/2019).
- Faiza K. A. Ahmed R. O. M. D. H. A. N. E., Slim S. L. I. M., & Youssef M. S. (2017). Apport des SIG à l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'Agrosystème d'une grande exploitation conduite en milieu semi-aride (Tunisie). *Algerian journal of arid environment*, 7(02), 58-71. Disponible sur : [https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/16504/1/6.-\\_KHEBOUR-ALLOUCHE\\_Faiza.pdf](https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/16504/1/6.-_KHEBOUR-ALLOUCHE_Faiza.pdf) (Consulté le 12/05/2018).
- Gourmelon F. (2003). La contribution des SIG à la connaissance et à la gestion de l'environnement littoral. *Sciences de l'Homme et Société*. (Université de Bretagne occidentale-Brest.). Disponible sur : <https://hal.inria.fr/tel-00321106/> (Consulté le 25/12/2013).
- Girel, J. (1986). Télédétection et cartographie à grande échelle de la végétation alluviale : exemple de la basse plaine de l'Ain. *P. Ozenda, Documents de Cartographie Écologique*, 29, 45-74. Disponible sur : [https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as\\_sdt=0%2C5&q=Girel+J.+%281986%29.+T%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection+et+cartographie+%C3%A0+grande+%C3%A9chelle+de+la+v%C3%A9g%C3%A9tation+alluviale.+Exemple+de+la+basse+plaine+de+l%E2%80%99Ain.+P.+Ozenda%2C+Documents+de+Cartographie+&btnG=](https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Girel+J.+%281986%29.+T%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection+et+cartographie+%C3%A0+grande+%C3%A9chelle+de+la+v%C3%A9g%C3%A9tation+alluviale.+Exemple+de+la+basse+plaine+de+l%E2%80%99Ain.+P.+Ozenda%2C+Documents+de+Cartographie+&btnG=) (Consulté le 12/08/2014).
- Goodchild MF and Barbara S. (2009). GIS and Cartography. 500–505. University of California, Santa Barbara Affiliate Professor of Geography University of Washington.
- Herbreteau V., Kassié D., Roux E., Marti R., Catry T., Attoumane A., et Tran, A. (2018). Observer la Terre pour appréhender spatialement les inégalités de santé : Regard historique et prospectif sur l'utilisation de la télédétection dans le domaine de la santé. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia*, (37). Disponible sur : <https://journals.openedition.org/confins/15362> (Consulté le 22/08/2019).
- Jensen, J. R. (1996). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective* (No. Ed. 2). Prentice-Hall Inc. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20001911540>
- John O. N. (2017). *Africa in Space: Legal Issues and Responsibilities Related to Space Technology Development Programmes* (United Nations/South Africa Symposium on Basic Space Technology “Small Satellite Missions for Scientific and Technological Advancement”, Stellenbosch, South Africa, 11 – 15 December 2017). Disponible sur: [www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2017/SouthAfrica/slides/Presentation53.pdf](http://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2017/SouthAfrica/slides/Presentation53.pdf) (Consulté le 23/02/2019).
- Koehl M. (2006). G 2006, Oct 2006, France. (Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg). Disponible sur : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00264950/document> (Consulté le 12/05/2014).

- Kouba Y., (2018). Cours de systèmes d'Information géographique, Master. Aménagement urbain Université Larbi Ben M'hidi O.E.B., Algérie. 2018, pp.105. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01878296> (consulté le 19/09/2019).
- Kameche M., Gicquel, AH et loalland D. (2011). ALSAT-2A transfer and first year operations. *Journal of Aerospace Engineering*, 3(2), 67. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/ALSAT-2A-transfer-and-first-year-operations-Kameche-Gicquel/7cbf1e125727d06464998db5c8da142b7a61483d>(Consulté le 19/08/2014).
- Kameche M., et Benmostefa S. (2016). In-flight MTF stability assessment of ALSAT-2A satellite. *Advances in Space Research*, 58(1), 117--130. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117716301041> (Consulté le 02/05/2018).
- Kergomard C. (1990). La télédétection aérospatiale : Une introduction. p. p74. Disponible sur : [https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as\\_sdt=0%2C5&q=Kergomard+C.+%281990%29.+La+a+t%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection+a%C3%A9rospatiale%E2%80%AF&btnG=](https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Kergomard+C.+%281990%29.+La+t%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection+a%C3%A9rospatiale%E2%80%AF&btnG=) (Consulté le 12/08/2013).
- Larrivée S., Lapointe M., & Massé, E. GMT-1005 (2019). Fondements des systèmes d'information géographique. P1. Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique Département des sciences géomatiques. Laval\_Canada. [https://www.scg.ulaval.ca/sites/default/files/Documents/cours/plansdecours/gmt-1005\\_h22\\_15659.pdf](https://www.scg.ulaval.ca/sites/default/files/Documents/cours/plansdecours/gmt-1005_h22_15659.pdf)
- Laurencin B., (2008). Les Systèmes d'Information Géographique Arc View 9.1 et 3D Analyst. ENSA Paris Belleville. Disponible sur: [http://www.paris-belleville.archi.fr/enseignants/hmo/Laurencin/BLaurencin\\_cours\\_SIG\\_VR.pdf](http://www.paris-belleville.archi.fr/enseignants/hmo/Laurencin/BLaurencin_cours_SIG_VR.pdf) (consulté le 20/09/2019).
- Larbi, N., Attaba, M., & Beaufume, E. (2012). ALSAT-2A power subsystem behavior during launch, early operation, and in-orbit test. In *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVI* (Vol. 8533, pp. 453-461). SPIE. Disponible sur : <http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.978701> (Consulté le 14/06/2014).
- Leroux, L. (2015). Suivi et caractérisation des dynamiques de la production agricole en Afrique de l'ouest par télédétection à moyenne résolution spatiale (Doctoral dissertation, AgroParisTech). (AgroParisTech). Disponible sur : <https://agritrop.cirad.fr/579669/> (Consulté le 19/02/2017).
- Lounis, B., & Belhadj, A. (2005). Processus de correction radiométrique relative "PCRR" appliqué aux images Landsat TM multi-dates. In *SETIT, 3rd International Conference. Sciences of Electronic*. [http://www.setit.rnu.tn/last\\_edition/setit2005/image-video/73.pdf](http://www.setit.rnu.tn/last_edition/setit2005/image-video/73.pdf).
- Mariama Zerhouni, A. F., & Hakdaoui, M. (2013). Manuel de télédétection spatiale Telecan. Journal Homepage : [www. Journalijar. com](http://www.journalijar.com). Disponible sur : [https://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2014/07/FR\\_TUTORIAL\\_COMPLETO.pdf](https://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2014/07/FR_TUTORIAL_COMPLETO.pdf) (Consulté le 19/02/2018).
- Martinez, J. M. (2000). *Estimation de la biomasse forestière et caractérisation de la structure verticale des peuplements de conifères par radar VHF et radar sondeurs aéroportés* (Doctoral dissertation, Doctorat Sciences forestières, ENGREF). <https://hal.inrae.fr/tel-02583413>
- Masse, A. (2013). Développement et automatisation de méthodes de classification à partir de séries temporelles d'images de télédétection-Application aux changements d'occupation des sols et à l'estimation du bilan carbone (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III). Disponible sur : [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00921853/file/manuscrit\\_these\\_final\\_antoine\\_masse\\_libredroit.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00921853/file/manuscrit_these_final_antoine_masse_libredroit.pdf) (Consulté le 14/05/2016).

- Mayaux, P., Gond, V., Massart, M., Pain-Orcet, M., & Achard, F. (2003). Évolution du couvert forestier du bassin du Congo mesurée par télédétection spatiale. *BOIS & FORETS DES TROPIQUES*, 277, 45-52. [http://bft.cirad.fr/cd/BFT\\_277\\_45-52.pdf](http://bft.cirad.fr/cd/BFT_277_45-52.pdf)
- Minvielle, E., & Souiah, S. A. (2003). L'analyse statistique et spatiale : statistiques, cartographie, télédétection, SIG. Editions du temps. Disponible sur : [https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as\\_sdt=0%2C5&q=Minvielle+et+Souiah%2C+2003&btnG=](https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Minvielle+et+Souiah%2C+2003&btnG=) (consulté le 19/03/2012).
- Missoumi, A., & Djillali, A. (1999). ArcInfo et la protection des forêts contre les incendies. In *Conférence des utilisateurs*. Disponible sur : <https://www.esrifrance.fr/sig1999/experiences/cnts/cnts.htm>
- Rachedi A., Hadj-Sahraoui N., et Brewer A. (2004). *AlSat-1: First results of multispectral imager* (Proceedings of 20th ISPRS Congress. Istanbul, Turkey). Disponible sur: [A Rachedi, N Hadj-Sahraoui, A Brewer - Proceedings of 20th ISPRS ..., 2004 - Citeseer](#) (Consulté le 12/03/2014).
- Sall A., Toure A., Kane A., & Fall A. N. (2019). Contribution à l'étude de la vulnérabilité des terres de cultures de la région de Thiès (Sénégal) à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG). *Journal of Animal & Plant Sciences*, 41(1), p 6731-6746. Disponible sur : [https://m.elewa.org/Journals/wp-content/uploads/2019/07/1.Sall\\_.pdf](https://m.elewa.org/Journals/wp-content/uploads/2019/07/1.Sall_.pdf) (Consulté le 20/08/2019).
- Scanvic, J. Y. (1983). Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. *Manuels et méthodes-Bureau de recherches géologiques et minières*, (7). Disponible sur : <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=9306818> (consulté le 12/11/2018)
- Serief, C. (2017). Estimate of the effect of micro-vibration on the performance of the Algerian satellite (Alsat-1B) imager. *Optics & Laser Technology*, 96, 147-152. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.05.035> (Consulté le 20/06/2018).
- Sleimi T. (2018). Étude du potentiel de l'imagerie historique Landsat pour la délimitation des cotes des crues de référence: Cas de la rivière Petite Nation. (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). Disponible sur : <http://espace.inrs.ca/7981/> (Consulté le 19/05/2019).
- Souléye, W. A. D. E., Rudant, J., BA, K., & Ndoye, B (2007). Télédétection, SIG et géorisques : applications à l'étude des inondations urbaines de Saint-Louis et du ravinement lié à l'érosion hydrique à Nioro-du-Rip (Sénégal). Disponible sur : [https://www.academia.edu/26374387/T%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection\\_SIG\\_et\\_g%C3%A9orisques\\_applications\\_%C3%A0\\_l%C3%A9tude\\_des\\_inondations\\_urbaines\\_de\\_Saint-Louis\\_et\\_du\\_ravinement\\_li%C3%A9\\_%C3%A0\\_l%C3%A9rosion\\_hydrique\\_%C3%A0\\_Nio-ro\\_du\\_Rip](https://www.academia.edu/26374387/T%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection_SIG_et_g%C3%A9orisques_applications_%C3%A0_l%C3%A9tude_des_inondations_urbaines_de_Saint-Louis_et_du_ravinement_li%C3%A9_%C3%A0_l%C3%A9rosion_hydrique_%C3%A0_Nio-ro_du_Rip)
- Sobrie O., Pirlot M., & Joerin F. (2013). Intégration de la méthode d'aide à la décision ELECTRE TRI dans un système d'information géographique open source. *Revue internationale de géomatique*, 23(1), 13-38.
- Tamali M. (2013). *Système d'Information Géographique*. Master. Algérie. 2013. ? cel-01445409v2 ? 25p. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01445409v2> (Consulté le 12/09/2014).
- Touzi *et al.* (2004). Forest type discrimination using calibrated C-band polarimetric SAR data. *Journal canadien de télédétection* Volume 30, 2004. Disponible sur: <https://doi.org/10.5589/m03-072>

Yousfi *et al.*, (2005). Inventaire des feux des forêts dans le nord de l'Algérie par utilisation des données du satellite Alsat-1. Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable". 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc. Disponible sur : [http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/03/Doc.%20IS%20n%C2%B020%20Workshop%20Inter.%20TSIG\\_ISDD%20-2006.pdf](http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/03/Doc.%20IS%20n%C2%B020%20Workshop%20Inter.%20TSIG_ISDD%20-2006.pdf)