

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة مولاي الطاهر، سعيدة

Université MOULAY Tahar, Saïda



كلية العلوم

Faculté des Sciences

قسم البيولوجيا

Département de Biologie

N° d'Ordre

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

En Ecologie et environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Thème

Diagnostic écologiques des formations forestières dans les monts de Saïda

Présenté par :

Melle : ABDELLI Milouda
SOUIDI Ahlem

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Président

Mmd. HENDI

MCB Université Saïda

Examinateur

Mr ANTEUR Djamel

MCB Université Saïda

Encadreur

Mmd. ADDA -HANIFI Nora

MCA Université Saïda

Année universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



REMERCIEMENT



En premier lieu et avant tout je tiens à remercier DIEU le tout puissant qui nous a donné le courage, la patience et la force de terminer ce travail.

Le travail a été réalisé sous la direction de **Mme HANIFI Nora** Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude pour nous avoir encadré pendant la durée de ce travail, pour sa confiance, sa gentillesse, son encouragement, son soutien qu'il nous a accordé, pour ses remarques pertinentes et son optimisme. Nous sommes reconnaissantes pour le temps qu'elle nous a consacré et toutes les opportunités qu'elle nous a offertes au cours de ce travail.

Nous remercions également les membres du jury. **Mr. Anteur** et **Mme Hendi** d'avoir consacré leur temps à la lecture de ce manuscrit, et d'accepter de juger et d'évaluer ce travail Enfin nous tenons à exprimer mes profonds remerciements à tous ceux qui nous en soutenu de près ou de loin pour la réalisation de ce travail

Dédicace

Je dédie ce modeste travail A ceux que j'aime jusqu'à la frontière de l'imagination.

Ce travail est dédié à mon père, Abdelkader, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension...

À la bougie qui a éclairé mon chemin depuis ma naissance, à celle don j'ai prononcé le premier mot, source de ma vie et de mon bonheur, à ma mère que dieu la protège.

À mes chères sœurs (Oubtisssem, Fatima) qui peut être fière et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Merci pour vos valeurs nobles, votre éducation et votre soutien constant.

Un grand merci pour mon mari Mohamed

Un merci special pour mon cher professeur Mr. Anneur Djamel et ma meilleure amie Abdelli Milouda

Ahlem"

"

Dédicace

*À l'homme de ma vie ; mon roi ; mon chère papa Zadda je te dédie ce travail car vous
été toujours près de moi pour guidé et poussé dans mes études que dieu te me protège.*

*À ma porte de bonheur ; la lune de ma vie Maman qui m'a soutenu durant tous mes
années de formation.*

*À mes sœurs (Zahira ; Fatima ; Aicha ; Rachida ; Phaimaa) qui ont fières de
moi ; ma tante adorée Oum El Kheir. À mes anges Raounek Soudjoud Et Rima
Chams ; mon frère Lahoual.*

Un grand merci à le plu beau personne qui est toujours autour de moi

*Un merci spécial à mon chère professeur Mr. Anneur Djamel et la meilleure copine
Souidi Ahlem*

Milouda

Résumé

Les monts de Saïda sont une chaîne montagneuse d'Algérie située dans l'Ouest du pays et constituant une partie de l'Atlas tellien

L'objectif de notre étude consiste à détecter les changements de occupation de sol des monts de Saïda à partir de données satellitaires multitemporales et l'estimation générale de l'impact de ces changements

La méthode de comparaison diachronique de la classification a été utilisée et l'approche de la classification non supervisée.

Ces résultats ont permis d'identifier le changement temporel et spatial de l'occupation pour une période de 10 ans (de 2011 à 2022).

Mot clé : Télédétection , Occupation De Sol, Cartographie

Abstract

The Saïda mountains are a mountain range in Algeria located in the west of the country and constituting part of the Tell Atlas

The objective of our study is to detect changes in land cover in the Saida Mountains from militant satellite data. The general estimate of the impact of these changes

The method of diachronic comparison of the classification was used the approach of the unsupervised classification.

these results made it possible to identify the temporal and spatial change in occupation for a period of 10 years (from 2011 to 2022).

Key word: Remote sensing, land cover, cartography

ملخص

جبال سعيدة هي سلسلة جبال في الجزائر تقع في غرب البلاد وتشكل جزءاً من تل أطلس.

الهدف من دراستنا هو الكشف عن التغيرات في الغطاء الأرضي في جبال سعيدة من خلال بيانات الأقمار الصناعية القابلة للتقدير العام لتأثير هذه التغيرات تم استخدام طريقة المقارنة الزمنية للتصنيف مع نهج التصنيف غير الخاضع للرقابة.

مكنت هذه النتائج من تحديد التغير الزماني والمكاني في المهنة لمدة 10 سنوات (من

2011 إلى 2022)

الكلمة المفتاحية: الاستشعار عن بعد ، الغطاء الأرضي ، رسم الخرائط

Tables des matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des abréviations	
Liste Des Tableaux	
Liste des Figure	
Liste de Cartes	
1. Introduction Générale	1
2. Mise en contexte	2
3. Problématique.....	3
4. Objectif.....	3
5. Plan de travail	3

Chapitre I : Généralités sur quelques concepts

I.1 Les méthodes de classification de l'occupation des sols	5
I.2 La télédétection	7
I.3 Evolution historique	7
I.4 Fonctionnement des systèmes de télédétection.....	8
I.4.1 Régions spectrales utilisées pour l'observation à distance de la terre	9
I.4.2 Types d'émissions utilisées par la télédétection :	9
I.4.3 Lois du rayonnement électromagnétique :	10
I.4.3.1. <i>Loi de Planck</i>	10
I.4.3.2. <i>Loi de Stefan-Boltzmann</i>	11
I.4.3.3. Réflectivité Spectrale:	11
I.4.3.4 Interactions atmosphériques :	13
I.5 Capteurs et plateformes :	13
I.5.1 Classification des capteurs	13
I.5.2 Résolutions des capteurs :	15
I.5.2 .1 <i>Résolution Spatiale</i> :	15
I.5.2 .2 Résolution spectrale :	16
I.5.2.3 . <i>Résolution radiométrique</i>	16

I.5.2 .4 Résolution temporelle :	16
I.5.2 .4 .1 Plates-formes :	16
I.5.2 .4.1.1 <i>Plates-formes terrestres</i> :	16
I.5.2 .4.1.2 <i>Plates-formes aériennes</i> :	16
I.5.2 .4.1.3 <i>Plate-forme spatiales</i> :	17
I.5.2 .5 <i>Les orbitaux</i> :	17
I.5.2 .6 Différents satellites d'observation de la Terre :	18
I.5.2 .6 Modélisation Radiométrique, Atmosphérique et Géométrique :	18
I.5.2 .7 Outils de traitement d'images de télédétection :	19
I.5.2 .8 Outils de la modélisation de l'occupation du sol :	21
a. Système d'Information Géographique (SIG) :	21
I.5.2 .9 Quelques modèles utilisés dans la simulation de l'occupation du sol :	24
I.5.2 .10 <i>Land Change Modeler (LCM)</i> :	27
I.5.2 .11 Détection Des Changements Par Télédétection :	28
I.5.2 .12 Méthodes pré-classificatoires :	32
I.5.2 .13 Méthodes de classification multi-temporelle :	34
I.5.2 .14 Méthodes post-classificatoires (comparaison des classifications) :	35
I.5.2 .15 Autres méthodes :	36
I.5.2 .16 Avantages et inconvénients des méthodes de détection du changement :	37

Chapitre II : *Etude physic-géographique des mont de saida*

II. Introduction.....	41
II.1 Présentation de la zone d'études.....	41
II.3 Les caractéristiques physiques des monts de saida :	42
II.3.1 Aspect géographique :	42
II.3.2 Les pentes :	43
II.3.3 L'altitude :	44
II.3.4 -L'exposition: :	45
II.3.5 -Hydrologie :	46
II.3.5.1 -Réseau Hydrographique :	46
II.3.5.2 Les Principaux Oueds :	48
II.3.6 L'occupation des sols :	48
II.3 .7 - le Climat :	49
II.3.7.1 La température :	49

II.3.7.2 -Le vent:	50
II.3.8 Gelée	50
II.3.9 . L'Humidité relative de l'air	51

Chapitre III : Méthodologie

III.1 Introduction	53
III.2 Collecte des données	53
III.3 Choix et acquisition des données	53
III.4 Traitement des images	53
III.5 Prétraitements des images	53

Chapitre IV: L'interprétation et l'analyse

IV.1 Introduction	56
IV.2 Classification thématique d'image de télédétection	56
IV.2.1 Classification non supervisée	56
IV.2.2 Classification non supervisée ISODATA.....	57
IV.3 Composition colorée d'une image satellitaire	59
IV.4 Résultat	61
IV.4.1 L'analyse de l'évolution de l'occupation de sol des monts de Saida.....	61
IV.4.1.1 L'état d'occupation de sol en 2011	61
IV.4.1.2 L'état de l'occupation de sol en 2022.....	64
IV.4.2 Changement d'occupation de sol entre 2011 et 2022:	66
Conclusion Général:	70
Références bibliographiques	72

Liste des abréviations

- **Env** : Environnement
- °C : degré Celsius
- U.D: Urtica Dioica
- N.O: Nerium Oleander
- mn : minute.
- ml : millilitre.
- mm : millimètre.
- j : jour.
- kg : killograme.
- mg : milligramme.
- C° : degré Celsius.
- cm : centimètre.
- g: gramme.
- h : heure.
- NdS: nombre de sauts
- NdCa : nombre de carrot.
- 1CC: 1 ml
- S : surface.
- T° : température.
- μm : micrometer
- NdC : Nombre de contraction

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Régions spectrales utilisées pour l'observation à distance de la terre (source Manuel TELCAN, 2013)	9
Tableau 2 : Avantages et inconvénients des plateformes de la télédétection.....	18
Tableau 3 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système catégorisation de traitement d'images.	29
Tableau 4 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système de catégorisation de niveau de traitement (Tiré de Lu et al, 2004)	30
Tableau 5 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système de catégorisation de niveau de traitement.	31
Tableau 6 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de télédétection du changement(Tiré et modifié de Mas, 2000 et Lu et al, 2004)	37
Tableau n°07 : représente les classes des pentes	44
Tableau n°18 : L'occupation des sols des monts de saida.....	48
Tableau n°09 : La vitesse du vent moyenne annuelle et le nombre de jours sirocco moyen de la région d'étude (1983-2012).	49
Tableau n°10 : Direction et fréquence du vent de la région d'étude (1983-2012).	50
Tableau n° 11 : Le nombre de jours de gelée de la région d'étude (1983-2012).	50
Tableau n° 12 : L'humidité relative de la région d'étude au cours de la période (1983-2012).	50
Tableau n13 : les surfaces d'occupation de sol des monts de saida en 11/04/2011	51
Tableau n14 : les surfaces de l'occupation de sol dans la zone d'étude en 27/05/2022.....	62
Figure n 15 : Représentation en camembert d'occupation de sol dans la zone d'étude en 27/05/2022.....	65
Tableau n 16 : représente les changements d'occupation de sol entre 2011 et 2022	66

Liste des Figure

Figure 1 : Schéma général de fonctionnement de télédétection (source manuel TELCAN 2003)	8
Figure 2 : Les sources d'émissions utilisées dans la télédétection (source Manuel TELCAN, 2013)	10
Figure 3 : Longueurs d'ondes appropriées pour la détection d'un phénomène en fonction de sa température (source Manuel TELCAN, 2013)	11
Figure 4 : La signature spectrale de quatre surfaces	12
Figure 5 : Signature spectral des différents objets	12
Figure 6 : Pourcentage du rayonnement absorbé par l'atmosphère (source Manuel TELCAN, 2013)	13
Figure 7 : Télédétection passive et active (source Manuel TELCAN, 2013).	14
Figure 8 : Classification des capteurs selon la forme de télédétection (source Manuel TELCAN, 2013)	14
Figure 9 : Classification des capteurs selon la région du spectre utilisée (Source Manuel TELCAN, 2013)	15
Figure 10 : Résolution spatiale (Source Google)	15
Figure 11 : Formats et données utilisés dans un SIG (Source : Maestriperi 2012).	22
Figure 12 : Filtre de contiguïté 5x5 utilisés dans l'automate cellulaire (source : Eastman, 2006).	26
Figure n°13 : Image de classification non supervisée ENVI.....	57
Figure n°14 : Notification de l'algorithme d'ISODATA sur ENVI.....	63
Figure n15 : Représentation en camembert des surfaces d'occupation des sols dans les zones d'étude en 11/04/2011.....	63
Figure n 16 : Représentation en camembert d'occupation de sol dans la zone d'étude en 27/05/2022.....	65
Figure n 17 : représentation en camembert de changement d'occupation de sol entre 2011 et 2022	67
Figure n 18 : Histogramme représente les changements d'occupation de sol entre 2011 et 2022	68

Liste de Cartes

Carte n°01: Représente la situation géographique des monts de Saida	41
Carte n°2: carte géographique des monts de saida.....	43
Carte n°3 : représente les pentes des mont de saida.....	44
Carte n°4: L'hypsométrique de niveau qui limite des monts de saida	45
Carte n°5: L'exposition des mont de saida.....	46
Carte n°06: Le réseau hydrographique des monts de saida.....	47
Carte n°07: La carte d'occupation du sol de la zone d'étude	48
Carte n°08 : Composition vraie couleur des monts de saida (11/04/2011)	59
Carte n° 09: Composition vraie couleur des monts de saida (27/05/2022)	60
Carte n° 10 : Composition fautive couleur des monts de saida (11/04/2011)	60
Carte n°11 : Composition fautive couleur des monts de saida (27/05/2022)	61
Carte n°12 : ENDVI 2011	61
Carte n°13 : ENDVI 2022	62
Carte n°14: carte d'occupation de sol en 11/04/2011.....	64
Carte n°15 : l'occupation de sol en 27/05/2022	66
Carte n°16 : carte représente les changements d'occupation de sol entre 2011 et 2022.....	67

Introduction

Générale

1-Mise en contexte

L'occupation des terres est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (Foody, 2002). Cette thématique est devenue incontournable dans la plupart des inventaires cartographiques et de suivi des phénomènes environnementaux (Ouattara et al., 2006)

Les monts de Saïda sont une chaînes montagneuse d'Algérie située dans l'Ouest de pays et constituant une partie de l'Atlas tellien.

Les monts de Saïda sont situés dans l'Ouest de l'Algérie², entre Saïda et Frenda, et constituent un relief accidenté et boisé de chênes verts et de pins d'Alep, à la bordure des plaines steppiques au sud³.

De nombreuses sources karstiques prennent naissance dans ce massif montagneux : aïn Zerga, aïn Tifrit, aïn Soltane et aïn Balloul, ainsi que de nombreux cours d'eau : oued Tifrit, oued Sidi Minmoun et oued Saïda⁴.

L'analyse de cette nouvelle occupation constitue l'objet de la présente étude.

2-Problématique

Ce projet de recherche a été établi à partir de l'état actuel de l'environnement des monts de saïda et le besoin de contrôler les changements d'utilisation du sol intense sur ce secteur, ainsi que les difficultés rencontrées pour suivre ces changements par télédétection.

Nous nous appuyons sur une problématique cruciale soit la de traitement d'images satellites qui a un rôle important dans le développement technique économique .

Après le changement climatique et les modes d'utilisation des terres dans l'espace des monts de saïda, ont subi de nombreuses transformations. Cette ouverture soit climatique ou économique entraîne le remplacement des types d'utilisation du sol , tous cela influencent non seulement la qualité de sol des monts de saïda mais encore la qualité de vie et la santé humaine.

Dans ce contexte, il est nécessaire de contrôler ou de planifier le mode d'occupation. Pour le faire, une vérification quantitative des changements spatiotemporels dans l'occupation du sol est nécessaire. Les informations obtenues à partir de la surveillance de l'occupation du sol via les images satellitaires sont toujours utiles dans l'identification des stratégies appropriées à mieux gérer l'état de l'utilisation des terres. Plusieurs méthodes ont été inventées et appliquées pour détecter les changements avec des niveaux divers d'efficacité et seront présentées au chapitre 1. Néanmoins,. Le mixage spectral du pixel est une des contraintes que l'on rencontre dans la classification d'images . Afin de diminuer la confusion à cause des similitudes entre les signatures spectrales de quelques classes thématiques et améliorer la précision globale de la classification, il est donc important de trouver une approche convenable de segmentation des images. . En raison de cela, il y a deux questions qui se posent pour le suivi de ces changements:

1. Comment peut-on extraire un maximum d'information depuis des images dont la résolution spatiale est souvent supérieure à la taille des objets changeant dans le temps?
2. Comment analyser et interpréter ces changements à partir des images diachroniques?

3-objectif :

L'objectif scientifique poursuivi est la détection des changements de l'occupation du sol les mont de saïda entre les années 2011 2022 en utilisant la télédétection. Il s'agit donc d'identifier les changements les monts de saïda à différentes époques à l'aide de l'interprétation d'images captées par des satellites d'observation de la Terre.

De ces analyses, il résultera des images satellitaires transformées en cartes thématiques de l'occupation du sol pour différentes années et ensuite en cartes de changement durant la période observée. Pour y arriver, les deux sous objectifs suivants devront être atteints:

- 1- Établir une méthode pour détecter le changement de l'occupation du sol à partir des données satellitaires multi-sources et multi-temporelles disponibles.
- 2- Identifier les causes physiques et anthropiques de changement de l'occupation du sol.

4-Plan de travail :

ce travail réalisé à partir de l'interprétation des images satellitaires est organisé en trois chapitres :

1-**Premier chapitre**, intitulé "la télédétection", présente la discipline, son fonctionnement, les différents outils utilisés pour extraire de l'information donnée par le système de télédétection et les méthodes de détection de changements.

2-**Deuxième chapitre**, présentation de la zone d'étude dans la situation, les grands traits physiques (le climat, les pentes, géologie...)

3-**Troisième chapitre**, prend en charge matériel et l'outil plus la collecte et les prétraitements des données obtenus à partir des images satellitaires

Chapitre I

Généralités des quelques concepts

I.1 Les méthodes de classification de l'occupation des sols

Les études sur le changement dans l'occupation et l'utilisation du sol sont d'une grande importance car ils permettent de connaître les tendances actuelles dans les processus de l'étalement urbain, et la perte de la biodiversité d'une région déterminée (Lambin et al. 2001)

Il existe des facteurs naturels, comme le climat, le vent, la pluie etc., qui favorisent les variations de la couverture végétale (Thompson et al. 1999). Néanmoins, pendant les dernières décennies, les activités humaines sont le principal déclencheur de la transformation des écosystèmes (Vitousek et al. 1997). Les conséquences les plus évidentes sont la perte du potentiel d'utilisation du sol pour le bien-être humain et la perte d'habitat en général (Velázquez et al. 2002). La procédure la plus efficace pour mesurer le degré de changement de l'environnement est l'étude multi-date de la couverture végétale (Lambin et al. 2001 ;Vågen, 2006). C'est pourquoi, dans ce travail, nous proposons d'évaluer le changement récent de l'occupation du sol dans la Mitidja à partir de l'analyse diachronique des images Landsat pour les dates 2003 et 2016.

Depuis l'avènement des capteurs à haute (HRS) et très haute résolution spatiale (THRS) lancés à partir des années 1990, les méthodes de traitement d'images sont de plus en plus développées. Ces capteurs, qu'ils soient satellitaires ou aéroportés, fournissent des images dont la résolution spectrale est pour la plupart inhérente au domaine d'application visé par la mission du capteur notamment pour ce qui concerne les satellites. En effet, le nombre de bandes spectrales peut varier en fonction des capteurs. De plus, ces données de télédétection sont de plus en plus diversifiées. Elles peuvent répondre aux attentes des utilisateurs finaux par leur disponibilité, coût, fréquence d'acquisition.

Parmi les méthodes de traitement des données de télédétection utilisées aujourd'hui, on distingue principalement les méthodes de classification. La cartographie de la couverture des sols est une application très répandue. De nombreuses études ont été menées dans ce sens et sont disponibles dans la littérature. (Sparfel et al, 2008 ; Hoang et al, 2009 ; Achbun et al, 2011).

La classification est définie comme étant « une représentation abstraite de la situation sur le terrain en utilisant des critères de diagnostic bien définis : les classificateurs », mais aussi « l'ordonnement ou l'agencement des objets dans des groupes ou des ensembles sur la base de leurs relations » (Spécification technique de l'Observatoire du Sahara et du Sahel,

2014). Ainsi, se distinguent deux types de classification : non supervisé (automatique) et supervisé (par apprentissage ou règle de décision).

La première méthode de classification (apparue dans les années 1970) est celle qui est basée sur l'approche pixelaire (ou classification par pixel). Cette méthode dite « classique » permet de regrouper les pixels individuellement en fonction de leur caractéristique radiométrique « contenue dans les valeurs d'une ou plusieurs bandes spectrales ». Plusieurs méthodes portant sur cette approche se sont développées, telles que les méthodes de K-Means, cluster Isodata et celles utilisant des distances ou encore par maximum de vraisemblance... etc.

Cependant, la classification issue de cette méthode montre ses limites quant à l'application aux zones très hétérogènes comme le milieu urbain (Thi-Thanh-Hiên et DongChen, 2013), les zones spécifiques comme le littoral mais aussi à l'utilisation des images à haute et très haute résolution (Sparfel et al, 2008). « Plus la résolution spatiale est fine, plus l'hétérogénéité des objets à extraire croît, rendant les méthodes spectrales de moins en moins performantes ». (Sparfel et al, 2008) Ainsi, l'information spectrale à elle seule ne permet pas de discriminer les différentes classes d'occupation des sols. Ce qui nécessitait la prise en compte d'autres informations permettant de caractériser le pixel dans son voisinage. (Blaschke et Strobl, 2001). Afin de corriger les limites de la méthode précédente, plusieurs auteurs dont T. Blaschke (Blaschke, 2001, 2009) ont contribué à l'introduction et au développement d'une seconde méthode, appelée « orienté objet ».

A la différence de la classification par pixel, la méthode orienté objet regroupe les pixels selon leur appartenance à des régions homogènes en tenant compte à la fois de leurs caractéristiques spectrales, spatiales, morphologiques, texturales, contextuelles, temporelles et thématiques. L'objectif principal est de gommer l'effet « poivre et sel » présent dans la classification des méthodes traditionnelles. (Blaschke, 2009).

Ainsi, ces groupes de pixels sont considérés comme des objets pour lesquels on peut accéder à leur propriété.

Cette méthode est actuellement implémentée dans plusieurs logiciels du marché (ENVI, ERDAS, ...) mais c'est le logiciel Cognition qui propose une version qui se rapproche de l'interprétation humaine. (Navulur, 2007) La démarche de la classification sous logiciel se fait en deux étapes : segmentation et classification.

I.2 La télédétection

La télédétection spatiale est une discipline scientifique qui intègre un large éventail de compétences et de technologies utilisés pour l'observation, l'analyse et l'interprétation des phénomènes terrestres et atmosphériques. Ses principales sources sont les mesures et les images obtenues à l'aide de plates-formes aériennes et spatiales. Comme son nom même l'indique, la télédétection est l'acquisition de l'information à distance, sans contact direct avec l'objet étudié. Dans le présent chapitre nous allons essayer de donner un

aperçu général sur cette discipline depuis sa création jus qu' à aujourd'hui, son fonctionnement et les différents outils utilisés pour extraire l'information données par les systèmes de télédétection.

I.3 Evolution historique

L'histoire des techniques de la télédétection peut être découpée en cinq grandes époques (Mindoro et all., 2013) :

- De 1856, date à laquelle pour la première fois un appareil photographique a été installé de façon fixe à bord d'un ballon, à la première guerre mondiale ou se déroule l'époque des pionniers pendant laquelle sont explorées les possibilités de la photographie aérienne verticale pour la cartographie. Les lois fondamentales de la stéréoscopie et des photogrammétriques ont découvertes à la fin du XIXe siècle.

- De la première guerre mondiale à la fin des années 50, la photographie aérienne devient un outil opérationnel pour la cartographie, la recherche pétrolière, la surveillance de la végétation. On assiste à un progrès continu de l'aviation, des appareils photographiques et des émulsions (couleur, infrarouge noir et blanc, infrarougefaussecouleur). Les méthodes de la photo-interprétation sont précisées et codifiées.

- La période qui commence en 1957 et s'achève en 1972 marque les débuts de l'exploration de l'espace et prépare l'avènement de la télédétection actuelle. Le lancement des premiers satellites, puis de vaisseaux spatiaux habités à bord desquels sont embarqués des caméras, révèle l'intérêt de la télédétection depuis l'espace. Parallèlement, les radiomètres imageurs sont mis au point et perfectionnés, de même que les premiers radars embarqués à bord d'avions.

La première application opérationnelle de la télédétection spatiale apparaît dans les années 60 avec les satellites météorologiques de la série ESSA . - Le lancement en 1972 du satellite ERTS (rebaptisé ensuite Landsat 1), premier satellite de télédétection des ressources terrestres, ouvre l'époque de la télédétection moderne. Le développement

constant des capteurs et des méthodes de traitement des données numériques ouvre de plus en plus le champ des applications de la télédétection et en fait un instrument indispensable de gestion de la planète, et de plus en plus, un outil économique.

- Depuis les années 70, on assiste à un développement continu de la télédétection, marqué notamment par :

- L'augmentation de la résolution spatiale des capteurs, déjà évoquée.
- La diversification des capteurs qui utilisent des domaines de plus en plus variés et spécialisés du spectre électromagnétique. Dans les années 90, on assiste ainsi à la multiplication des satellites équipés de capteurs actifs (on en parlera par la suite), radars en particulier. Dans le domaine du rayonnement visible et infrarouge, les capteurs à très haute résolution spectrale sont aujourd'hui d'utilisation courante dans leur version aéroportée et font leur apparition à bord de satellites.

I.4 Fonctionnement des systèmes de télédétection

L'acquisition d'information à distance implique l'existence d'un flux d'informations entre l'objet observé et le capteur. Le porteur de cette information est un rayonnement électromagnétique, ce qui peut être émis par l'objet ou venir d'un autre organisme (le soleil) et avoir été réfléchi par celui-ci. Tous les corps (planètes, êtres vivants, objets inanimés) émettent un rayonnement électromagnétique, la quantité et le type de rayonnement émis dépendent largement de la température (TELCAN, 2013).

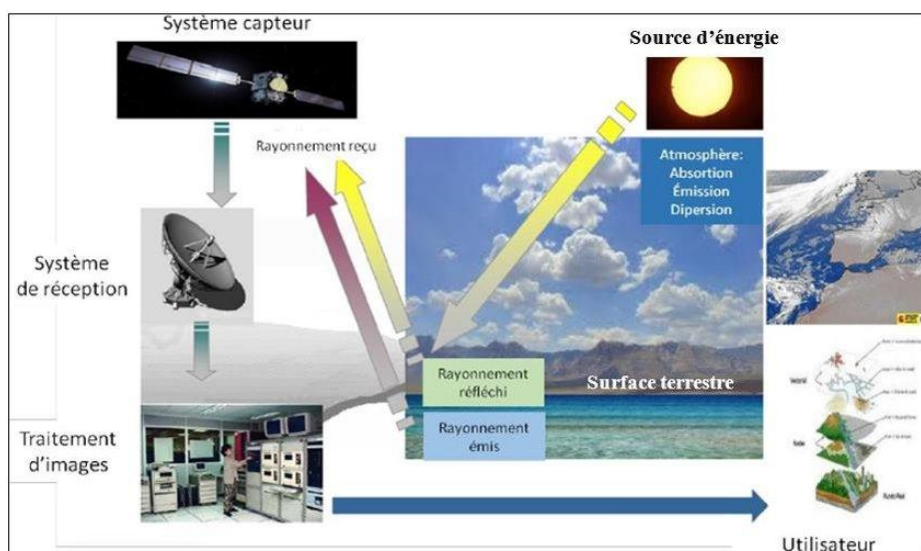


Figure 1 : Schéma général de fonctionnement de télédétection (source manuel TELCAN 2003)

I.4.1 Régions spectrales utilisées pour l'observation à distance de la terre

Spectre visible (0,4-0,7 μm) : C'est la gamme de fréquence que peut supporter l'œil—humain. Elle est subdivisée en trois groupes : Red (rouge), Green (vert), Blue (bleu).

Infrarouge proche (0,7-1,1 μm) : Appelé IR réfléchi, il renseigne sur l'énergie solaire—des corps réfléchissants, ce spectre est utilisé en télédétection de la même façon que le rayonnement visible.

Infrarouge moyen (1,1 -8 μm) : C'est un mélange de rayonnements solaire et—d'émission, il affecte de manière significative l'atmosphère et employé pour mesurer les concentrations de vapeur d'eau, ozone, aérosols, etc.

Infrarouge thermique (8-14 μm) : Rayonnement émis par les organismes eux-mêmes,—il permet de déterminer la température d'un corps (IR thermique) et les images peuvent être disponibles à tout moment de la journée.

Micro-ondes (1 μm -1m) : Cette bande présente un intérêt croissant dans la—télédétection du fait de sa faible interaction avec l'atmosphère et sa transparence pour les nuages. Les capteurs actifs sont généralement utilisés dans cette bande.

Tableau 1 : Régions spectrales utilisées pour l'observation à distance de la terre (source Manuel TELCAN, 2013)

Nom	Intervalle de longueur d'onde	Source de radiation	Surfac d'intéret
Visible	0,4---0,7 μm	Solaire	Reflectance
Proche infrarouge	0.7 – 1.1	Solaire	Reflectance
Ondes courtes	1.1 – 3	Solaire	Reflectance
Ondes moyennes	3 – 5	Solaire – Thermique	Reflectance ; Temperature
Infrarouges thermique	8 – 14	Thermique	Température
Micro-onde , Radar	1mm – 1m	Passive : Thermique Active : Artificiel	Température ; Rugosite

I.4.2 Types d'émissions utilisées par la télédétection :

Les sources d'émissions utilisées dans la télédétection sont d'origine du rayonnement réfléchi de la surface de la terre qui est émis par le soleil, ce rayonnement dépend des caractéristiques de la surface (température par exemple) et l'environnement.

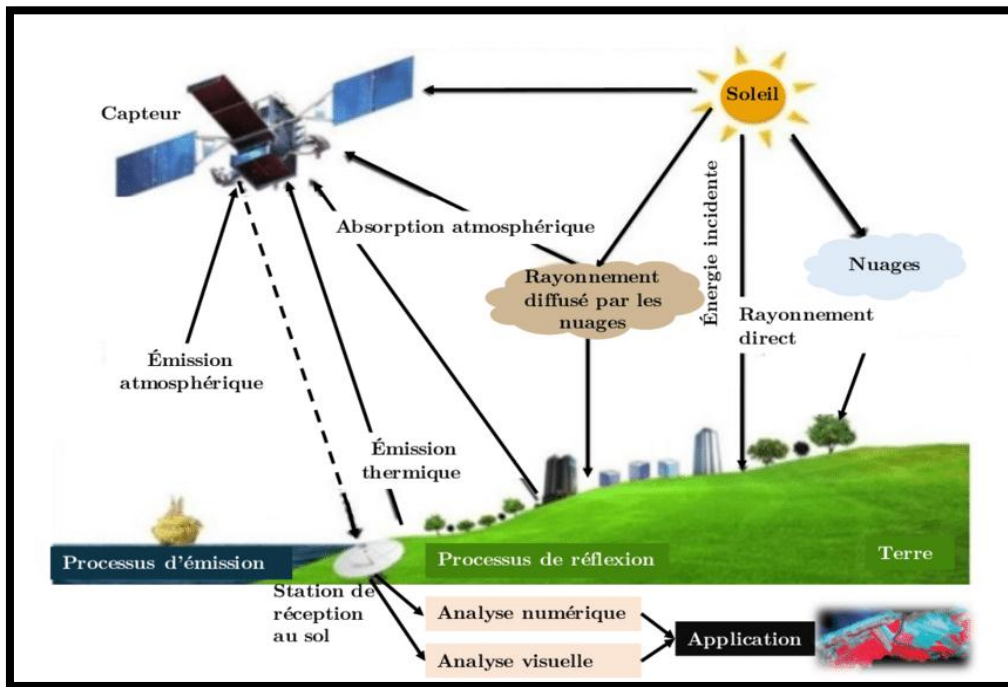


Figure 2 : Les sources d'émissions utilisées dans la télédétection (source Manuel TELCAN, 2013)

I.4.3 Lois du rayonnement électromagnétique :

I.4.3.1. Loi de Planck

Elle définit la distribution de la luminance énergétique spectrale du corps noir en fonction de la température thermodynamique donc tout objet avec $T > 0^\circ\text{K}$ émet de l'énergie.

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{2hc/\lambda kT} - 1}$$

Avec :

C : vitesse de la lumière ($3.108m.s^{-1}$)

h : constante de Planck ($6,625 \cdot 10^{-34}J.s$)

k : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$)

T : température du corps noir en Kelvins

Loi du déplacement de Wien

Pour une température donnée, il existe une longueur d'onde pour laquelle l'énergie électromagnétique est maximale

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{4.76kT} = 2,898 \cdot 10^{-3} T$$

Avec :

λ_{\max} : longueur d'onde du maximum d'émission, exprime en metre

c : vitesse de la lumiere ($3 \cdot 10^8 m. s^{-1}$)

h : constante de planck ($6.625 \cdot 10^{-34} J.s$)

k : constante de boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$)

T : temperature du corps noir en Kelvins

Nous pouvons donc sélectionner la bande appropriée pour la détection d'un phénomène si nous connaissons sa plage de températures.

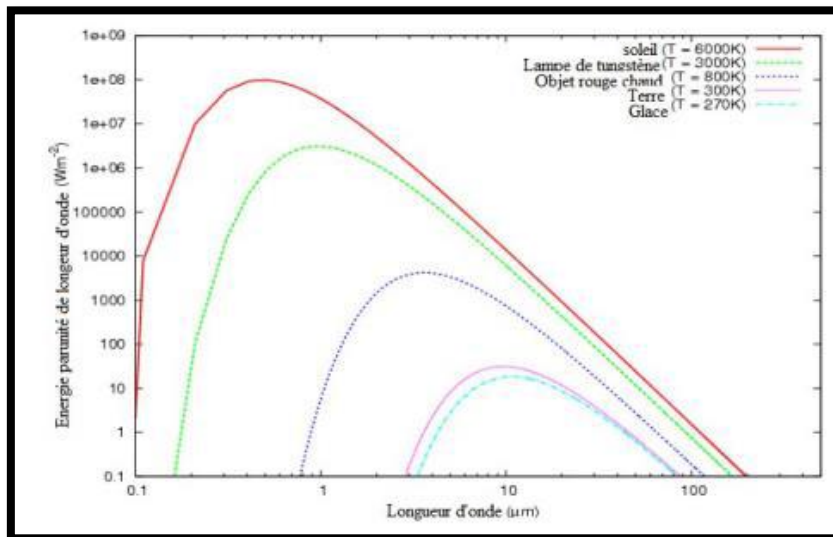


Figure 3 : Longueurs d'ondes appropriées pour la détection d'un phénomène en fonction de sa température (source Manuel TELCAN, 2013).

1.4.3.2. Loi de Stefan-Boltzmann

Établit que l'excitante énergétique d'un corps en watt par mètre carré est liée à sa température exprimée en kelvin par la relation : **$MT = \sigma T^4$**

Avec :

MT : L'exitance totale (énergie émise par unité de surface, en $W.m^{-2}$) du corps noir

σ : La constante de stefan- Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} J.K^{-4}.m^{-2}.s^{-1}$)

T : la température du corps noir en Kelvins

Où est la constante de Stefan-Boltzmann, et l'émissivité (flux radiatif émis par un élément de surface à température donnée, rapporté à la valeur de référence qu'est le flux émis par un corps noir à cette même température) est un coefficient sans unité, compris entre 0 et 1, et qui est l'unité pour un corps noir.

1.4.3.3. Réflectivité Spectrale :

La réflectance, également nommée facteur de réflexion, est la proportion de la lumière réfléchi par la surface d'un matériau. Elle est donc un rapport entre le flux lumineux réfléchi et incident.

La réflectance d'une surface varie en fonction de la longueur des ondes qui la frappent et s'exprime généralement comme un pourcentage.

Ainsi, tout corps réel a une émissivité et une réflectivité qui varient avec la longueur d'onde
SIGNATURE SPECTRALE.

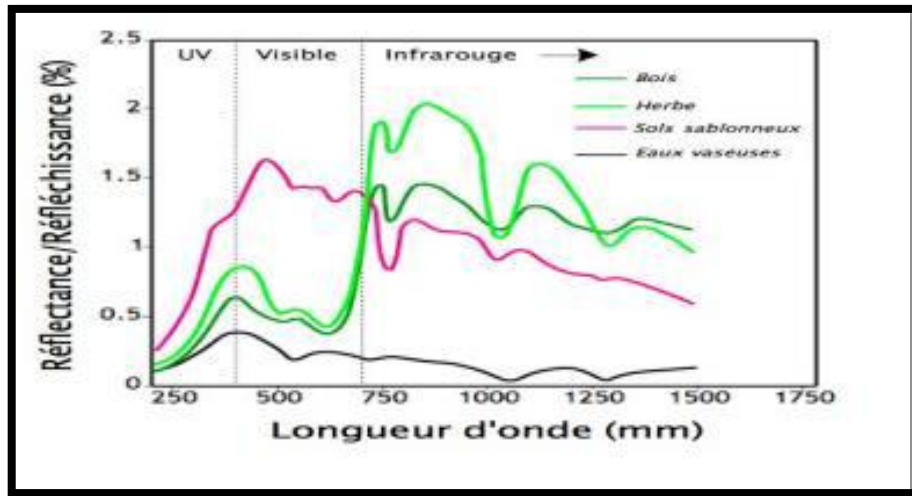


Figure 4 : La signature spectrale de quatre surfaces

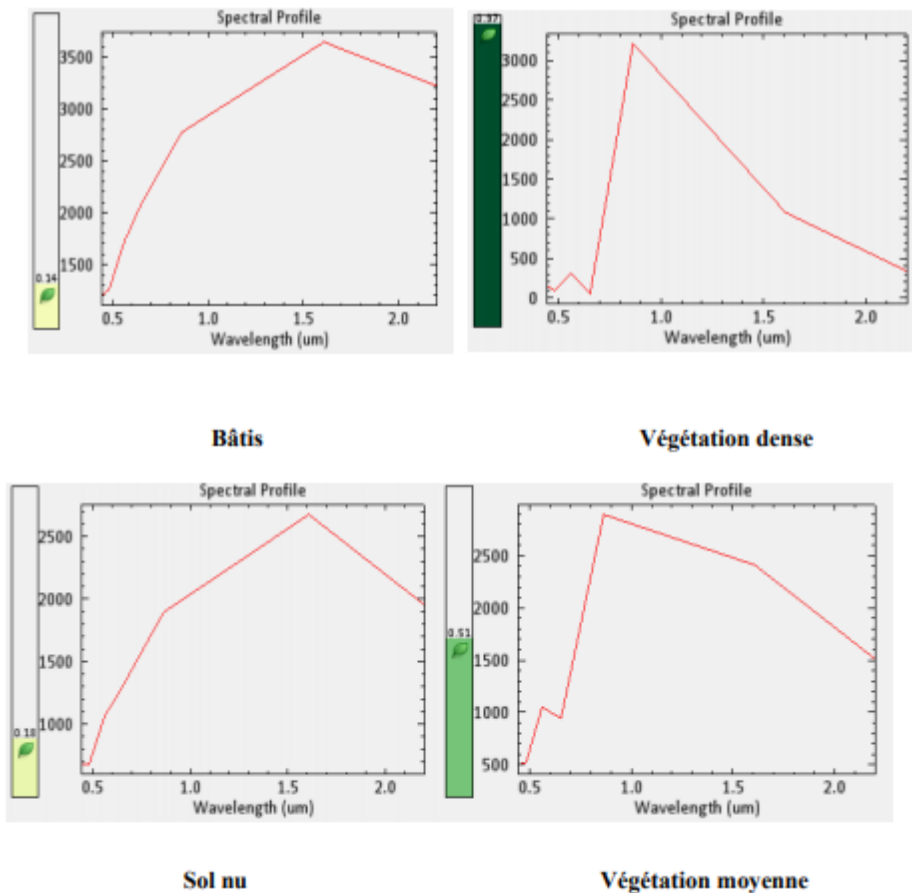


Figure 5 : Signature spectral des différents objets

I.4.3.4 Interactions atmosphériques :

L'atmosphère est un mélange de gaz, elle est divisée en plusieurs couches, les 80 premiers kilomètres contiennent plus de 99% de la masse totale de l'atmosphère de la Terre. Lorsque le rayonnement EM traverse l'atmosphère, il peut être absorbé ou diffusé par les particules de l'atmosphère et elle émet également IR thermique.

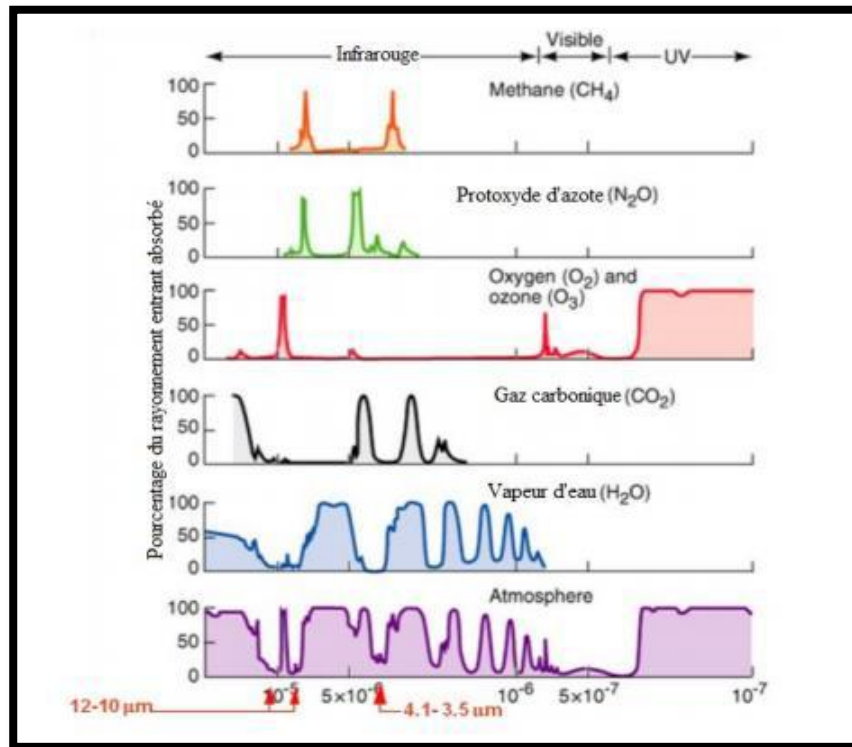


Figure 6 : Pourcentage du rayonnement absorbé par l'atmosphère (source Manuel TELCAN, 2013).

I.5 Capteurs et plateformes :

Le capteur spatial est un instrument qui recueille l'énergie radiative provenant de la scène visée et délivre un signal électrique correspondant et mesurable.

I.5.1 Classification des capteurs :

a. Selon la source de rayonnement :

Les différents types de capteurs utilisés dans le domaine de la télédétection spatiale sont les suivants :

- Capteur actif : capteur auquel est incorporé ou associé un émetteur qui irradie la scène dans la bande spectrale du récepteur exemple : le radar et le lidar (à rétrodiffusion).
- Capteur de luminescence : capteur actif dans lequel la réception a lieu dans une bande spectrale distincte de celle de l'émission.

- Capteur d'orientation : appareil qui mesure des angles ou des vitesses angulaires de déplacement entre les axes d'un engin spatial et des axes de référence.
- Capteur en peigne : capteur dont le détecteur est constitué par de nombreuses cellules-détectrices alignées qui reçoivent simultanément l'énergie radiative en provenance de la scène.
- Capteur passif : capteur qui reçoit une énergie émise sans que lui-même irradie la scène. Un appareil photographique sans flash est un capteur passif.
- Capteur solaire : dispositif qui reçoit le rayonnement solaire et en transforme- l'énergie en électricité

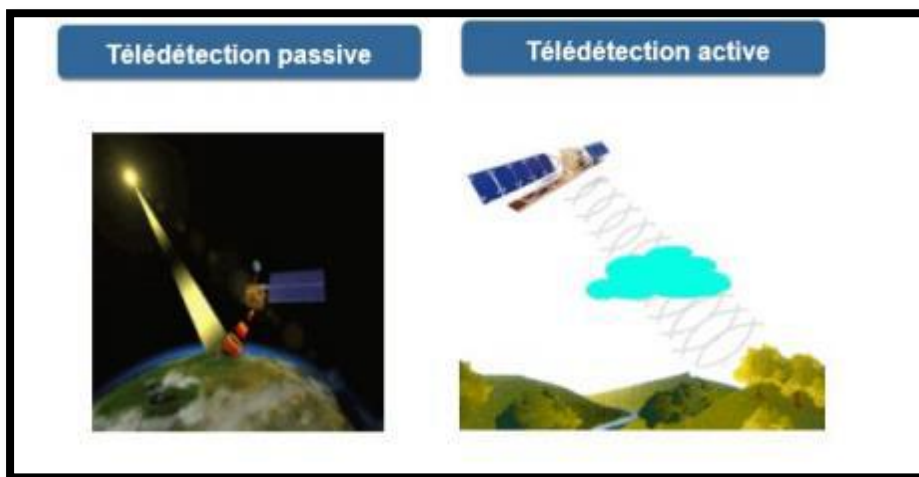


Figure 7 : Télédétection passive et active (source Manuel TELCAN, 2013).

b Selon la forme de télédétection (formes d'acquisition d'information avec capteurs) :

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

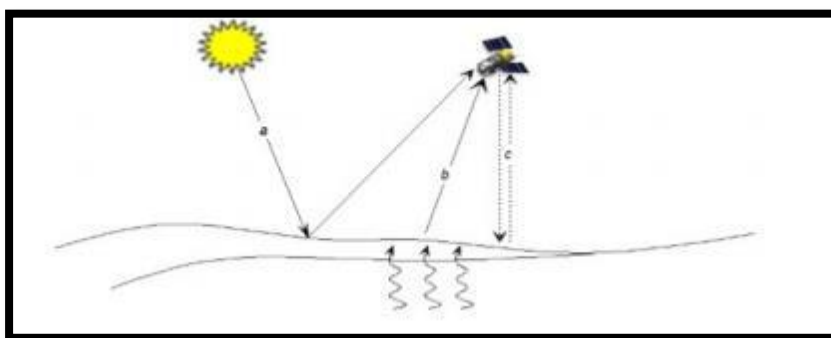


Figure 8 : Classification des capteurs selon la forme de télédétection (source Manuel TELCAN, 2013)

C- Selon la région du spectre utilisée

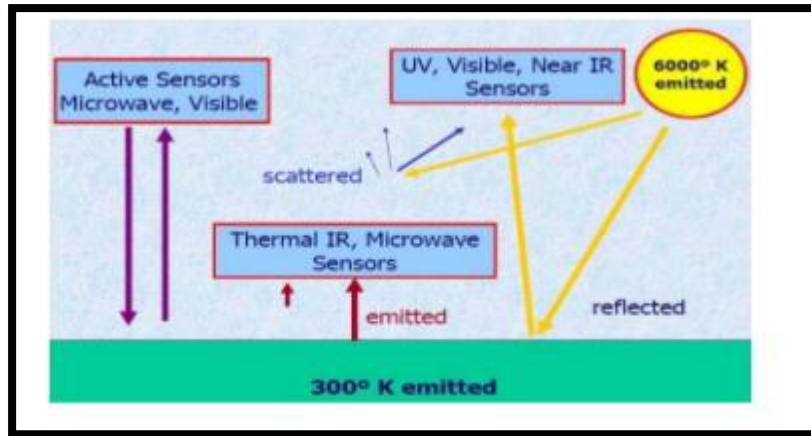


Figure 9 : Classification des capteurs selon la région du spectre utilisée (Source Manuel TELCAN, 2013)

I.5.2 Résolutions des capteurs :

I.5.2 .1 Résolution Spatiale :

Elle donne une indication de la taille du pixel de l'image avec une faible séparation entre les objets qui peuvent être résolus par le capteur.

- Haute résolution spatiale : 0.5 - 4 m.
- Moyenne résolution spatiale 4 - 30 m.
- Faible résolution spatiale 30 - 1000 m.

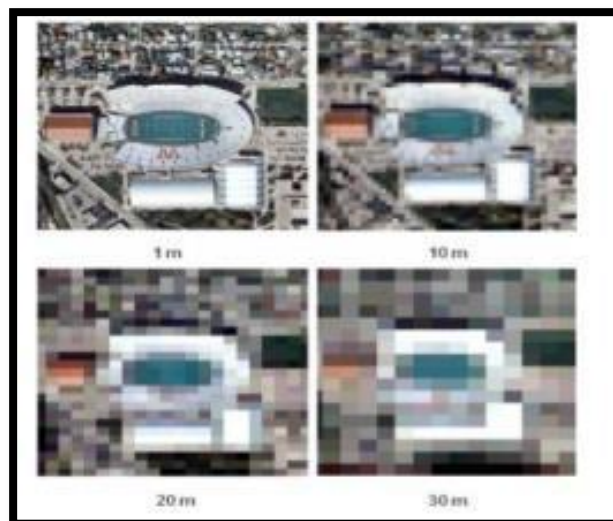


Figure 10 : Résolution spatiale (Source Google)

I.5.2 .2 Résolution spectrale :

La résolution spectrale indique le nombre de bandes spectrales dans lesquelles le capteur peut capturer des radiations. Cependant le nombre de bandes n'est pas le seul aspect important de la résolution spectrale, la position des bandes dans le spectre électromagnétique est aussi un aspect clé.

I.5.2.3 . Résolution radiométrique :

La résolution radiométrique est la sensibilité d'un détecteur aux variations de l'intensité détectée de l'énergie électromagnétique émise, réfléchi ou diffusée. Il existe différents niveaux d'intensité qui peuvent être détectés par le capteur dans une bande.

I.5.2 .4 Résolution temporelle :

La résolution temporelle précise la fréquence de révision du satellite pour un emplacement spécifique (en fonction de la latitude et de la largeur du SWATH).

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).

Les différents intervalles de la résolution temporelle se regroupent ainsi :

- Haute résolution temporelle : < 1 - 3 jours
- Moyenne résolution temporelle : 4 - 16 jours.
- Faible résolution temporelle : > 16 jours

I.5.2 .4 .1 Plates-formes :**I.5.2 .4.1.1 Plates-formes terrestres :**

Ce type de plate-forme est utilisé principalement à des fins d'expérimentation et d'étalonnage, elles ont une résolution spatiale élevée. Généralement un bras télescopique est fixé à un camion ou à un véhicule tout-terrain et à l'extrémité duquel le capteur est installé.

I.5.2 .4.1.2 Plates-formes aériennes :

A- **Les ballons** : Ils sont constitués en général d'une membrane très mince que l'on gonfle avec un gaz plus léger que l'air : l'air chaud, l'hélium ou l'hydrogène. Ils sont peu utilisés, sauf en météorologie. Leurs altitudes varient entre 2 et 40 Km.

B- **Les Avions** : Ce sont des plates-formes d'emploi très souple, mais dépendent largement des conditions météorologiques.

I.5.2 .4.1.3 Plate-forme spatiales :

Les plateformes spatiales ou satellitaires sont des vaisseaux en orbite terrestre qui se déplacent selon une ellipse dont un des foyers est occupé par le centre de la Terre. Les déplacements du satellite répondent aux seules forces de gravité suivant les lois de Kepler.

Facteurs pour la sélection d'une plateforme :

- L'étendue de la zone à couvrir.
- La vitesse de développement des phénomènes observés.
- Les caractéristiques fonctionnelles des instruments et des capteurs.
- La disponibilité et le coût des données.

I.5.2 .5 Les orbitaux :

L'orbite est la trajectoire qui décrit un corps spatial autour de la Terre. Le mouvement du satellite autour de la Terre est principalement déterminé par la force d'attraction entre les deux corps.

a. Orbite héliosynchrone :

Le plan de l'orbite reste fixe par rapport à l'axe Terre soleil.

- Altitudes (résolution) de 500 à 1 500 Km.
- Le satellite passe au-dessus d'un point géographique quelconque approximativement à la même heure locale (héliosynchronisme)
- Recouvrement presque complet de la Terre (sauf les régions polaires).Inclinaison-orbitale : quasi-polaire ($>90^\circ$)

Exemple : LANDSAT, SPOT...

Le satellite reste constamment au-dessus d'un point fixe de la Terre. Une orbite géostationnaire est forcément équatoriale (son plan d'orbite se confond avec le plan équatorial) et circulaire, son altitude est environ 36 000 Km.

Elle permet la surveillance constante d'une partie de la terre, soit entre les parallèles de $81,3^\circ$ nord et sud. Applications : météo et télécommunications.

Exemple: GEOS (NOAA Geostationary Operational Environmental Satellite), METEOSAT

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des plateformes de la télédétection

Type de plateformes	Avantages	Inconvénients
Aériennes	Résolution spatiale élevée	Le territoire couvert est assez limité Coûts relativement élevés
Spatiales	Résolution temporelle élevée Couverture globale et périodique sur de vastes zones de la Terre. Observation multi-échelle. Information sur les régions non visibles du spectre. Traitement numérique des images	Interaction des données avec l'atmosphère Faible résolution spatiale

b. Orbite circulaire quelconque :

Survole la Terre à la même altitude. L'excentricité, qui est le rapport de la distance des foyers au grand axe de l'ellipse, devient nulle.

Exemple : ERS-1, RADARSAT, SEASAT

L'Annexe I regroupe les différents types d'orbites et leurs domaines d'utilisations

I.5.2 .6 Différents satellites d'observation de la Terre :

Il existe différents satellites utilisés pour l'étude des ressources terrestres : MÉTÉOSAT, NOAA, LANDSAT... Certains possèdent des capteurs spécifiques dans l'infrarouge thermique, Tandis que d'autre possèdent des capteurs dans les hyperfréquences : ERS, RADARSAT, JERS ...

I.5.2 .6 Modélisation Radiométrique, Atmosphérique et Géométrique :

La complexité technique des systèmes de télédétection actuels, le volume de données disponibles et les différents niveaux de traitement liés à l'obtention des paramètres géophysiques exigent l'établissement d'une hiérarchie des procédures qui permettent la génération de produits d'exploitation (haut niveau) d'utilité pour les utilisateurs finaux spécifiques et pour la communauté scientifique. En règle générale, seule une faible proportion de l'ensemble des données disponibles est traitée au plus haut niveau en augmentant généralement le coût de niveau des données.

- **Sources d'erreurs d'observation spatiale :**

Les images acquises par les capteurs placés à bord des satellites contiennent, en plus des erreurs radiométriques liées aux caractéristiques de l'instrument et de la présence de l'atmosphère, des distorsions géométriques. Celles-ci peuvent se produire à cause du mouvement relatif entre le satellite, le capteur d'exploration et la terre provoquant des

erreurs de déplacements des pixels dans l'image obtenue. Les caractéristiques d'exploration du capteur,

courbure de la Terre et les variations non contrôlées dans la position et l'orientation de la plate-forme, produisent des erreurs géométriques de différents nature et complexité.

- **Les différents types de prétraitement :**

Le type et le nombre de niveaux hiérarchiques de prétraitement dépend évidemment du système de télédétection considéré. La bonne organisation des niveaux hiérarchiques dans les principaux systèmes de télédétection (Landsat, SPOT, NOAA...) a permis la création des bases de données d'images cohérentes et fiables.

- **Les différents types de prétraitement sont :**

- **Étalonnage radiométrique :** Consiste à changer les niveaux digitaux aux valeurs de radiance ou des valeurs de température de brillance pour obtenir les paramètres géophysiques ou pour comparer les images de différents capteurs.

- **Correction atmosphérique :** Prend en considération la contribution du rayonnement atmosphérique qui arrive au capteur.

- **Correction géométrique :** consiste à corriger les distorsions dans les images reçues liées à la courbure et la rotation de la Terre, l'exploration du capteur et les variations de la plateforme.

- **Détection de nuages :** Consiste à masquer correctement les pixels nuageux pour assurer que les paramètres géophysiques obtenus sont représentatifs de la surface de la terre.

I.5.2.7 Outils de traitement d'images de télédétection :

Les informations recueillies par les capteurs de télédétection sont traitées et analysées à l'aide des logiciels connus comme les outils de traitement.

Il existe un certain nombre de logiciels libres et beaucoup d'autres commerciaux qui traitent ce genre d'information (TELCAN, 2013).

a. Outils commerciaux :

- 🕒 **ENVI :** Programme axé sur le traitement et l'analyse des images de toutes sortes. Il est assez flexible avec les formats de lecture et semble très amiable à l'utilisateur. Il utilise le langage IDL et il permet d'intégrer des modules supplémentaires.

- 🕒 **ERDAS :** Probablement le plus grand programme d'implantation commerciale, en étant un standard pour les formats d'échange, notamment avec les SIG. Il est disponible pour une grande variété de plates-formes. Il peut être programmé à l'aide du Model Maker.

⌚ **ESRI** : ArcGIS est un ensemble de produits SIG. Ils sont regroupés en plusieurs applications pour la capture, l'édition, l'analyse, le traitement, la conception, l'impression et la publication de l'information géographique. ArcGIS Desktop, gamme d'applications SIG, est l'un des plus utilisés, compris ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene et ArcGlobe, en plus de diverses extensions.

⌚ **Idrisi** : Outil qui intègre de nombreux utilitaires d'analyse numérique d'image, et pour le bas prix, a été largement utilisé dans l'enseignement de la télédétection. Il a été développé par l'Université Clark (USA).

⌚ **E-Cognition** : Programme qui intègre de multiples aspects de l'analyse du contexte et de la morphologie mathématique. Il est idéal pour la reconnaissance des modèles spatiaux.

⌚ **ER-Mapper** : Programme australien qui reprend la plupart des caractéristiques communes en matière de télédétection, en étant très efficace dans la gestion des images volumineuses en intégrant des algorithmes virtuels et des systèmes innovants de compression

□ . **PCI-Geomatica** : Nouvelle version du programme canadien PCI, qui incorpore dans un schéma plus intégré ses paquets d'analyse numérique d'images, l'ortho rectification, la production des cartes et SIG. Il fournit des outils d'analyse très puissants grâce à sa connexion avec le Centre Canadien de Télédétection. On peut utiliser une version de démonstration limitée, appelée Freeview.

□ **DRAGON** : Programme à faible coût en environnement Windows pour l'analyse numérique d'images. Il est très approprié pour un cadre éducatif.

□ **Miramon** : Programme de SIG et télédétection développé par CREAM de l'Université de Barcelone. Faible coût et des nombreuses fonctionnalités

b. Outils gratuits :

☒ **Grass** : Programme axé sur SIG et traitement d'image. Développé pour UNIX, sur différentes plates-formes, mais il existe des versions pour Linux et Windows (winGRASS). Il a été initialement développé comme un outil militaire de l'armée américaine. Parmi les organisations qui l'utilisent on souligne NASA, NOAA, USGS, etc.

□ **Orfeo-Monteverdi** : Orfeo Toolbox (OTB) est une bibliothèque de traitement d'images de télédétection développé par le CNES en 2006 pour de faciliter l'utilisation des images de différents capteurs. En particulier la constellation Orpheus (Pléiades et Cosmo-SkyMed). Monteverdi est la plus robuste et opérationnel.

- **SeaDAS** : Logiciel de la NASA pour la visualisation, le traitement et l'analyse des images de capteurs de Couleur de l'Océan. Il prend en charge les principales missions de la NASA et de l'ESA récemment.
- **Multispec** : Programme développé par l'Université de Purdue, un pionnier dans les années 70. Il est très approprié pour l'environnement d'apprentissage, parce qu'il a peu de requis matériel.
- **SPRING** : Programme développé par l'INPE (Institut national de recherche spatiale du Brésil). Il a une longue liste de fonctionnalités, mais est essentiellement orientée vers l'environnement SIG. Des versions en portugais, anglais et espagnol.

Agences et organismes publics de télédétection :

Il existe plusieurs agences et organismes de télédétection qu'on trouve au niveau national (PNOT-PNT), européen (ESA) et mondial (NASA). Les différentes agences spatiales continuent à parier sur la télédétection avec de nouvelles missions qui permettent son application dans de nombreux secteurs stratégiques.

I.5.2 .8 Outils de la modélisation de l'occupation du sol

a. Système d'Information Géographique (SIG)

Selon Fischer (1993), un Système d'Information Géographique (SIG) peut être défini comme Un système informatique permettant de représenter et d'analyser toutes les choses qui existent Sur terre ainsi que tous les évènements qui s'y produisent. Autrement dit, il permet la collecte, Le stockage, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale. Ainsi, les SIG aident à la description de la réalité, à la prise de décision, à la résolution de problèmes complexes de planification et de gestion.

Le SIG regroupe dans un même ensemble une base de données et un ou plusieurs logiciels de traitement de l'information. Il facilite la possibilité de faire des requêtes en interrogeant les jeux de données et de les mettre à jour (Béguin et Pumain, 2009).

Le stockage de l'information géographique se fait sous deux formats de couches de données que sont les formats «vecteur» et «raster» (figure 11). Les données utilisées dans les SIG proviennent de sources diverses à savoir : les images satellitaires (télédétection), les bases de Données géo référencées (GPS), les données numérisées, etc.

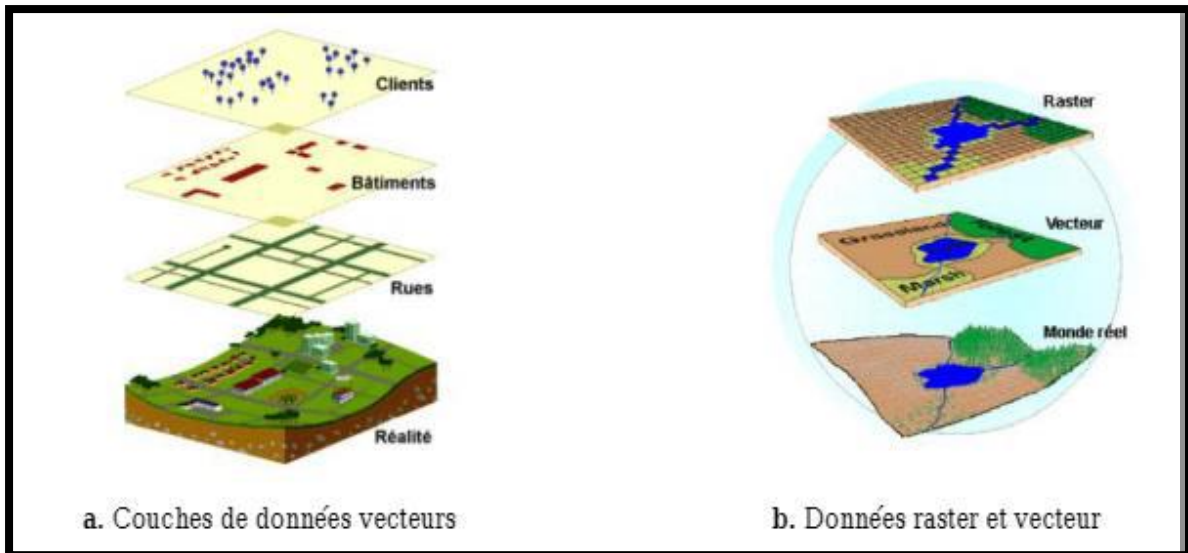


Figure 11 : Formats et données utilisés dans un SIG (Source : Maestriperi 2012).

b. Imagerie satellitaire

* Définition et description

L'image se définit comme la représentation bidimensionnelle d'un objet, produite par la Réflexion ou la réfraction de la lumière, ou plus simplement une matrice (Wiederkehr, 2013).

L'imagerie satellite (ou satellitaire) qualifie une imagerie de télédétection recueillie par les Satellites artificiels (Spot, Landsat, Ikonos, Terra, etc.) en orbite autour de la terre ou d'autres planètes. Les images existent dans certaines longueurs d'onde (ultra-violet, visible, infrarouge, Etc.) qui peuvent être combinées en vue de différentes interprétations. Elles intègrent tout le Processus de télédétection consistant à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement Électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information sous forme d'image,

Pour ensuite mettre en application cette information (Robin, 1995 ; CCT, 1999). L'imagerie satellitaire utilise, comme outils, les vecteurs et les capteurs. Les vecteurs (où Plateformes) sont des appareils (grues, avions, satellites, navettes spatiales, etc.) porteurs de dispositifs de détection que sont les capteurs (caméras, radars, etc.). On distingue les capteurs passifs des capteurs actifs. Les premiers renvoient à la télédétection passive et mesurent des rayonnements réfléchis ou retransmis par un objet illuminé par une source d'énergie naturelle, comme le soleil. Pour la télédétection active, les capteurs produisent leur propre énergie. Il s'agit notamment des satellites radars mesurant un rayonnement d'origine artificielle réfléchi par une cible (Robin, 1995).

les images satellitaires présentent quatre caractéristiques essentielles (Wiederkehr, 2013) à savoir :

- La résolution spatiale indiquant la taille du plus petit objet perceptible dans une image, Appelé pixel ;
- La résolution spectrale indiquant l'ensemble des fréquences des rayonnements électromagnétiques captées par le capteur ;
- La résolution radiométrique correspondant à la gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible ;
- La résolution temporelle correspondant à la fréquence d'acquisition des images par le Vecteur au-dessus d'une zone donnée.

- **Domaines d'application**

Les images satellitaires, grâce à leur vue synoptique, sont un outil important dans l'analyse et la cartographie des phénomènes dynamiques tels que l'occupation du sol, les incendies ainsi que dans la planification et la gestion des ressources naturelles.

Selon Robin (1995), le CCT (1999), Girard et Girard (1999), les applications de l'imagerie satellitaire couplée aux SIG sont très diverses. Ils peuvent s'utiliser dans les domaines de :

- La météorologie et la climatologie, pour l'étude de la nébulosité, la mesure des Températures, etc. ;
- L'océanographie, dans l'analyse de la couleur des océans, dans l'étude de la dynamique des océans, pour la mesure des températures de surface de la mer, etc. ;
- L'agriculture, dans la classification des types de cultures, pour la surveillance des cultures et l'évaluation des dommages, l'estimation de la production totale d'une récolte, la cartographie des caractéristiques du sol, etc. ;
- La foresterie, pour l'observation de la dynamique du couvert forestier, la cartographie de coupe à blanc, pour la surveillance de l'état sanitaire, de la qualité et de la stratification des forêts, la mesure de la biomasse, l'évaluation des puits de carbone, la détection des feux actifs, etc.

c. Modèles et Simulation

- **Définition**

Un modèle représente un idéal ou un prototype donné, qui peut soit servir de référence, soit être reproduit. Il est aussi défini comme une représentation « simplifiée » de l'objet réel

(Processus, ensemble de phénomènes, etc.). Il se focalise uniquement sur l'intérêt de l'objet, ignore les détails et sélectionne l'espace et le temps adéquats (**Coquillard et Hill, 1997**).

La modélisation est la conception d'un modèle. Il a pour objectifs de (i) expliquer (Comprendre), (ii) décrire (résumer) les données et (iii) prédire (ou simuler) le fonctionnement d'un phénomène. La simulation, quant à elle, consiste en la mise en action du modèle (**Coquillard et Hill, 1997**).

Cependant, par simple commodité, nous utilisons les termes modélisation et simulation l'un pour l'autre, en nous référant à un usage fréquent du terme simulation qui sous-entend l'immersion du modèle dans le temps.

Dans cette étude, nous simulerons l'occupation du sol, notre variable étudiée.

I.5.2.9 Quelques modèles utilisés dans la simulation de l'occupation du sol :

Pour simuler l'occupation du sol, plusieurs modèles sont utilisés. Parmi les plus utilisés et/ou diffusés, on peut citer : CA_MARKOV sur IDRISI (**Eastman, 2006**), Land Change Modeler (Disponible sur IDRISI et comme extension d'ArcGIS) (**Eastman, 2006**), DINAMICA EGO (**Soares-Filho et al. 2002**) et CLUE-S (**Verburg et al. 2002**).

Cellular Automata (CA) - Markov CA_Markov est un outil puissant pour la description et la spatialisation des phénomènes dynamiques. Il permet de simuler les états futurs d'un phénomène en fonction des règles de transition de l'état passé à l'état présent, de l'état présent et de la proximité spatiale des états du phénomène. Ce modèle se déroule en trois phases, à savoir :

- ❖ L'analyse des chaînes de Markov
- ❖ L'évaluation multicritère
- ❖ L'application des automates cellulaires (cellular Automata).

□ Analyse des chaînes de Markov

Les chaînes de Markov, processus stochastiques, prédisent l'avenir des modes d'utilisation des terres en se basant sur l'observation des évolutions du passé et l'état présent (Eastman, 2006).

L'algorithme se base sur l'état de la variable modélisée aux instants d'apprentissage $t-1$ et t et calcule les sorties suivantes :

- Une matrice de probabilités de transition ;
- Une matrice de surfaces de transition ;

□ Un ensemble d'images de probabilités conditionnelles (une image par état de la variable).

Les probabilités conditionnelles finales sont obtenues par multiplication des probabilités conditionnelles avec le résultat de la soustraction ($1 -$ l'erreur proportionnelle). L'erreur proportionnelle exprime la probabilité que l'état de la variable dans les cartes d'entrée soit vrai. Une erreur proportionnelle égale à zéro exprimerait la confiance totale dans les événements de la phase d'apprentissage.

La matrice de probabilités de transition de sortie est le résultat de la matrice des deux images D'entrée ajustée par leur erreur proportionnelle. Elle permet de décrire les tendances de changement sous forme de probabilité de transition d'un état d'occupation du sol à un autre. La matrice de surfaces de transition est obtenue par multiplication de chaque colonne de la matrice de probabilités de transition par le nombre de pixels correspondant dans l'image D'entrée à la date t .

Les limites de l'analyse markovienne sont caractérisées par la non-spatialisation de ces transitions (**Paegelow et al. 2004 ; Paegelow et Camacho-Olmedo, 2005 ; Eastman, 2006**).

□ **Evaluation multicritère (EMC)**

L'analyse multicritère est une méthode qui permet d'orienter un choix sur la base de plusieurs critères communs. Cette méthode est essentiellement destinée à la compréhension et à la résolution de problèmes de décision. Les critères sont l'élément de base décisionnel. Ils peuvent être évalués ou mesurés. Ils se composent de deux types de variables : les facteurs et les contraintes.

Les contraintes peuvent s'appliquer à tous les états de la variable modélisée (occupation du sol) ou être spécifiques à certains états. Elles agissent de manière booléenne sur la possibilité de la réalisation des états dans l'espace : "vrai" ou "faux". Les pixels codés "faux" auront la probabilité d'état zéro.

Les facteurs, quant à eux, regroupent les variables environnementales agissant de manière nuancée sur la probabilité de réalisation d'un état de la variable étudiée (occupation du sol).

Pour chaque facteur, la probabilité par état varie entre 0 et 255 dans la matrice des pixels. L'objectif de l'EMC est de fournir des cartes d'aide à la décision pour chaque état de la variable. Pour cet usage de l'espace, la procédure générera une carte d'aptitude ou de probabilité que l'on peut qualifier de carte décisionnelle. L'EMC se déroule en plusieurs étapes dont les principales sont la catégorisation des couches "critères" en facteurs et

contraintes, la standardisation des facteurs (transformation des unités d'origine en indice d'aptitude) par recours à des fonctions d'appartenance (linéaire, sigmoïde, etc.) de la logique floue (Fuzzy) et la pondération des facteurs (par la matrice de Saaty) et leur agrégation pour obtenir la carte d'aptitude (Eastman, 2006).

□ Application des automates cellulaires

Un automate cellulaire consiste en une grille régulière de "cellules" contenant chacune un "état" choisi parmi un ensemble fini et qui peut évoluer au cours du temps. L'état d'une cellule au temps $t+1$ est fonction de l'état au temps t d'un nombre fini de cellules appelé son "voisinage". À chaque nouvelle unité de temps, les mêmes règles sont appliquées simultanément à toutes les cellules de la grille, produisant une nouvelle "génération" de cellules dépendant entièrement de la génération précédente (Coquillard et Hill, 1997). Ils permettent de prendre en compte l'interaction spatiale dans les processus de simulations. Ils traitent la variable étudiée comme un système dynamique dans lequel l'espace, le temps et les états de ce système sont discrets (Paegelow et al. 2004 ; Eastman, 2006). Un filtrage par application d'un filtre classique de contiguïté 5x5 aux règles de transition issues de l'analyse markovienne permettant d'éliminer les occurrences isolées (Eastman, 2006). La figure 12 présente le filtre appliqué dans l'automate cellulaire.

0	0	1	0	0
0	1	1	1	0
1	1	1	1	1
0	1	1	1	0
0	0	1	0	0

Figure 12 : Filtre de contiguïté 5x5 utilisés dans l'automate cellulaire (source : Eastman, 2006).

Les valeurs de sortie sont des nombres réels entre 0 et 1. On applique le filtre sur des images booléennes de chaque état (catégorie d'occupation du sol) prédit par l'analyse de Markov. On obtient alors des images de probabilité pondérées qui sont multipliées avec les images d'aptitude produites par EMC et qui matérialisent la base de connaissances. Le résultat obtenu (image réelle) est converti en nombres entiers 0-255. En résumé, le CA favorise des pixels dont l'état est à la fois probable et qui sont proches des pixels / zones ayant une probabilité élevée pour le même état.

I.5.2 .10 *Land Change Modeler (LCM)*

Le modèle LCM a été développé par IDRISI afin d'étudier l'occupation du sol, de projeter leur dynamique dans le futur et d'en évaluer l'impact sur la biodiversité (Eastman, 2006). Une première estimation des changements (pertes, gains, changements nets, constance) est réalisée par la création de graphiques et de cartes de changements. Cette phase d'analyse permet la mise en place de sous-modèles de transition potentielle entre plusieurs catégories d'occupation du sol, tout en tenant compte des variables statiques ou dynamiques.

Les variables, qui sont intégrées à chaque sous-modèle, sont préalablement évaluées avec le coefficient V de Cramer, afin de connaître leur pouvoir explicatif. Pour modéliser les changements d'occupation et d'utilisation des sols, LCM utilise soit la technique des réseaux neuronaux artificiels multicouches (Multi-Layer Perceptron ou MLP), soit une régression logistique. Le réseau neuronal est recommandé, car il est plus performant que le modèle de régression multiple, notamment dans les systèmes complexes et non linéaires (Coquillard et Hill, 1997), mais peut conduire à « un sur-ajustement de la relation probabilité de changement / variables explicatives et du poids respectif des variables aux caractéristiques de la période de calibrage » (Eastman, 2006). Un réseau neuronal de type perceptron multicouche est constitué d'unités (ou noeuds) interconnectées de manière hiérarchique, avec une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées qui jouent le rôle d'une boîte noire, et la couche de sortie.

La procédure de spatialisation des changements d'utilisation et d'occupation du sol se fait par affectation multi-objectif (MOLA), qui se couple à l'estimation de la quantité de changement effectuée par des chaînes de Markov. L'évaluation multi-objective permet de prendre en compte la totalité des conversions afin de lister les catégories d'occupation du perdant en Surface et celles en gagnant sur les premières. Le résultat est une carte de transition potentielle pour chaque transition (Eastman, 2006).

- *Dinamica EGO*

Dinamica EGO est un modèle de simulation de la dynamique de l'environnement mis au point par le Laboratoire de Télédétection de l'Université fédérale de Minas Gerais (Brésil). C'est un logiciel libre qui regroupe les outils SIG traditionnels avec plusieurs opérateurs pour simuler les phénomènes spatiaux. Le modèle, du calibrage à la validation, suit un flux de données sous forme de diagramme permettant de créer des modèles en connectant des algorithmes via leurs ports. Comme dans CA_Markov et LCM, la quantité de changement dans Dinamica est calculée à l'aide de chaînes de Markov, synthétisée sous

forme d'une matrice de transition, généralement obtenue par la comparaison de cartes d'occupation et d'utilisation des sols à deux dates différentes

La matrice de transition entre la date de t et $t-1$ obtenue en superposant les deux cartes d'occupation des sols, indique la surface (ou le nombre de pixels) pour chaque transition. La matrice de transition est transformée en taux de transition annuel pour projeter les changements sur une base annuelle en multipliant les matrices des vecteurs propres, leurs inverses et les valeurs propres entre elles.

Cette matrice peut être transformée en une matrice de probabilité de transition qui permet de Réaliser des projections pour une ou plusieurs dates futures (dates $t+1$). Dinamica calcule une carte de probabilité en utilisant la méthode des poids d'évidence. Ces poids peuvent éventuellement être modifiés en utilisant un algorithme générique pour améliorer la concordance entre les cartes de probabilité de changement et les cartes d'occupation et d'utilisation des sols utilisées pour le calibrage du modèle (**Soares-Filho et al. 2002**).

CLUE-S

CLUE-S (Conversion of Land-Use and its Effects at Small regional extent) (**Verburg et al, 2002**) permet de simuler un ensemble de scénarii hypothétiques relatifs aux changements dans l'utilisation des terres. Les paramètres de départ les plus importants sont un ensemble de forces motrices spatialement explicites pour le changement de l'occupation des terres, quelques règles de conversion,

les restrictions spatiales et les changements attendus dans les différentes catégories d'utilisation des terres. Pour modéliser les changements futurs dans l'utilisation des terres, il est indispensable de connaître les paramètres qui déterminent la répartition spatiale des différents types d'utilisation des sols. Avec CLUE-S, pour quantifier les changements, l'utilisateur doit fournir les quantités (nombre de pixels) des catégories d'occupation des sols pour chaque année de simulation. Pour l'évaluation de la probabilité de changement, CLUE-S utilise des cartes qui expriment l'aptitude pour chacune des catégories d'occupation et d'utilisation des sols. CLUE-S requiert d'utiliser une méthode statistique (régression logistique multi-variée) provenant de programmes informatiques indépendants (**Verburg et al. 2002**).

I.5.2 .11 Détection Des Changements Par Télédétection

Les méthodes de détection des changements

La détection de changement est le processus identifiant des différences dans l'état d'un objet, d'une surface et d'un processus en l'observant en des temps différents

(Abuelgasim et al. 1999). Plusieurs méthodes et techniques de détection des changements ont été développées depuis quelques décennies pour identifier des secteurs de changement avec le temps et pour caractériser la dynamique de paysage. Ces méthodes sont présentées dans quelques articles de synthèse comme: **Coppin et Bauer (1996)**, **Jensen (1996)**, **Lunetta et Elvidge (1998)**, **Mas (2000)**, **Hall et Hay (2003)**, **Coppin et al. (2004)**, **Blaschke (2004)**, **Desclée et al. (2004)**, **Lu et al (2004)** et **Walter (2006)**, Ces revues nous montrent qu'avec l'évolution des méthodes et des critères de classification forts différents dans le raffinement et la complexité, la façon de catégoriser varie d'un auteur à l'autre. On trouve trois principaux systèmes de catégorisation. Ils sont décrits ci-dessous. Le premier système classifie les principales méthodes de détection des changements en fonction des catégories de traitement d'images. Elles sont décrites par Jensen (1996, 2005), Lunetta et Elvidge (1998), Mas (2000) et sont présentées au tableau 3

Tableau 3: Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système catégorisation de traitement d'images.

Catégorie	Sous-catégorie	Technique
Pré classification (accentuation d'image)	Opération ponctuelle	Différence d'images Différence d'indices de végétation Division d'images Analyse par vecteur de changement
Pré classification (accentuation d'image)	Opération globale + ponctuelle Opération globale	Régression d'images Transformation Tasseled Cap Analyse en composantes principales (ACP)
Classification multodate	Classification multodate directe	Classification non dirigée Classification dirigée Classification visuelle
Post -classification	Comparaison d'images classifiées indépendamment	Classification non dirigée Classification hiérarchique Classification dirigée Classification visuelle
Post -classification	Images classées/autres sources	Comparaison avec cartes thématiques
Hybride	Combinaison de méthodes	
Autres approches	Systèmes-experts	

Le second système groupe et catégorise les méthodes de détection des changements non seulement en six catégories principales de technique mais encore selon leur niveau de

complexité (du niveau plus simple -1 au niveau plus complexe-5). Le tableau 4 illustre les catégories du second système (Lu et al, 2004).

Tableau 4: Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système de catégorisation de niveau de traitement (Tiré de Lu et al, 2004)

Catégorie	Technique	Niveau de complexité
Catégorie 1 : Algèbre	1. Différence d'images	1
	2. Régression d'images	1
	3. Division d'images	1
	4. Différence d'indices de végétation	3
	5. Analyse par vecteur de changement	1
	6. Soustraction de fond (Background subtraction)	
Catégorie 2 : Transformation	7. Analyse en composantes principales	2
	8. Tasseled Cap	2
	9. Gramm-Schmidt	3
	10. Chi-square	3
Catégorie 3 : Classification	11. Post-classification	2
	12. Analyse combinée spectral-temporelle	3
	13. Expectation-maximization (EM) detection	3
	14. Détection de changement non dirigée	3
	15. Hybride	5
	16. Réseaux neuronaux artificiels (artificial neuralnetwork-AIVIV)	
Catégorie 4 : Modèles avancées	17. Modèle de réflectivité de Li-Strahler	5
	18. Modèle des mélanges spectraux	5
	19. Méthode de paramètre biophysique	5
Catégorie 5 : SIG	20. Méthode d'intégration du SIG et de la télédétection	4
	21. Approche SIG	4
Catégorie 6: Analyse visuelle	22. Interprétation visuelle	1
Catégorie 7: Autres techniques	23. Mesure de la dépendance spatiale	
	24. Système basé sur la connaissance de vision	
	25. Méthode de production du secteur	
	26. Combinaison de trois indicateurs: l'indice de	

	végétation, la température de surface de terre et la structure spatiale 27. Changement des courbes 28. Modèles linéaires généralisés 29. Approche basée-courbe-théorème 30. Approche basée-structure 31. Méthode basée-statistique spatiale	
--	--	--

Le troisième système catégorise ces méthodes en trois niveaux de techniques de traitement: interprétation visuelle, les méthodes basées-pixel et les approches basées-objet (Desclée et al, 2006). En considération du système de catégorisation de Deer (1998), un résumé des méthodes en trois grands niveaux (tableau 5): pixel, élément et objet a été fourni par Hall et Hay (2003). Le niveau de pixel se rapporte aux valeurs numériques de chaque bande d'image, aux calculs simples entre les bandes correspondantes comme la différence ou le ratio d'image. Le niveau d'élément est un niveau avancé du traitement, qui implique de transformer les propriétés spectrales ou spatiales de l'image (l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse de texture, ou l'indice de végétation). L'objet est le niveau le plus avancé du traitement.

Tableau 5 : Récapitulation des méthodes de détection des changements selon le système de catégorisation de niveau de traitement.(Modifié de Hal et Hay ,2003)

Niveaux	Méthodes
Pixel	Analyse par vecteur de changement Analyse d'endmember Différence d'images Division d'images Regression images
Élément	Texture locale Analyse en composantes principales Analyse de forme Indice de végétation Undeletes
Objet	Intelligence artificielle Réseaux neuronaux artificiels Classification directe de multi-temporelle Système expert Comparaison post-classification (logique floue) Comparaison post-classificatoire

La description des méthodes selon la première catégorisation et queues novellas méthodes de la deuxième catégorisation sent decries ci-decoys.

I.5.2 .12 Méthodes pré-classificatoires

La plupart des méthodes de détection de changement appartiennent à cette catégorie (tableau 3). Elles se basent sur les changements radiométriques entre deux images prises à des dates différentes. Afin que le processus d'extraction de l'information sur les changements devienne plus facile et plus efficace, les données diachroniques sont transformées en une nouvelle image. La distribution des valeurs radiométriques des pixels sur l'histogramme de cette image nous permet de trouver les pixels changés ou non changés. D'autre part, la nouvelle image peut être interprétée ou analysée soit visuellement soit numériquement pour extraire l'information sur les changements. La technique d'analyse numérique la plus utilisée à cette fin est celle du seuillage. Enfin, la carte des changements est établie par une classification. Selon Lunetta et Elvidge (1998) et Mas (2000), les méthodes dans cette catégorie, se divisent en général en deux types d'opération pour produire la nouvelle image de changements: les opérations ponctuelles (au niveau pixel à pixel) et les opérations globales (au niveau de toute l'image).

Les méthodes décrites ici-bas sont basées sur des opérations ponctuelles dont la différence d'images, la différence d'indices de végétation, la division d'images, et l'analyse par vecteur de changement. Elles font aussi appel à des méthodes algébriques :

□□ La différence d'image est une des méthodes les plus utilisées pour détecter des changements. Elle implique de soustraire les valeurs d'une image donnée à celles d'une deuxième image qui a été superposée à la première afin de produire une nouvelle image de changement où les valeurs positives et négatives représentent des pixels changés tandis que les valeurs zéros indiquent des pixels non changés.

Généralement, cette méthode utilise une seule bande spectrale. Dans le cas où plusieurs bandes sont utilisées, elles sont soustraites deux par deux pour produire plusieurs bandes résiduelles qui sont analysées séparément (Nelson, 1983) ou bien une seule bande de sortie est créée et reçoit la valeur de la somme des différences radiométriques calculées pour chaque bande spectrale (Mas, 2000). Quelles seront les bandes utilisées? Celles-ci sont déterminées par la nature du changement que l'on veut mettre en valeur et dépendent de la zone d'étude. Par exemple, dans une étude sur la détection de la défoliation forestière, Nelson (1983) trouve qu'une différence de ratio MSS7/MSS5 donne de meilleurs résultats qu'avec les bandes spectrales originelles (Lu et al, 2004). Par contre, Chavez et Mackinnon (1994) détectent mieux les changements de végétation en milieu aride et semi-aride en

utilisant la bande visible rouge (Mas, 2000). Cependant, il y a quelques limites dans cette méthode: la difficulté de l'identification de la nature du changement, le seuil requis pour distinguer les pixels changés et non changés ainsi que la grande sensibilité à la qualité de la superposition des images.

❖ En divisant pixel à pixel deux images prises à deux dates différentes, la méthode de la division d'image va donner une image de changement qui représente le rapport de la luminance des objets. Dans les zones non changées, ces rapports sont de 1, alors que celles où il y a des changements présentent des valeurs soit supérieures soit inférieures à 1. Cette méthode a les mêmes limites que la différence d'images.

❖ L'analyse par vecteur de changement est une technique qui se base sur les variations radiométriques dans l'espace de x variables spectrales qui constituent un vecteur de changement. **Lunetta et Elvidge (1998)** ont défini le vecteur de changement comme la différence de vecteur entre le temps-trajectoire successive, représentée comme un vecteur dans l'espace multidimensionnel de mesure. L'amplitude de ce vecteur indique l'importance du changement et sa direction contient des informations sur le type de changement. Malgré le fait qu'elle donne la nature du changement, cette méthode a aussi ses limites soit: la sensibilité au défaut géométrique, la sensibilité à l'existence des pixels mélangés et la sensibilité à la différence radiométrique entre les images d'entrée (Lunetta et Elvidge 1998). L'analyse des vecteurs de changement pour déterminer le type de changement est complexe car les vecteurs sont très nombreux (**Mas, 2000**).

Quant aux méthodes basées sur des opérations globales, elles incluent des méthodes comme la régression d'image, l'analyse en composantes principales et la transformation de Tasseled Cap:

❖ la régression d'image est une des méthodes pour différencier le changement à partir du non-changement. Cette méthode emploie une image comme variable explicative pour la deuxième image. C'est-à-dire que si on a deux images à deux dates différentes, on suppose que la majeure partie de la première image (date 1) est inchangée et les valeurs radiométriques de cette image sont une fonction linéaire des valeurs des pixels de la deuxième image (date 2).

Une régression des moindres carrés est employée pour déterminer la fonction linéaire entre les valeurs de l'image de la date 1 et de l'image de la date 2. Cette régression linéaire donne une nouvelle image -l'image déduite de la fonction de régression (I_r). L'image de différence (qui contient l'information sur les changements) est déterminée entre l'image I_r et la véritable image (date 1) en utilisant la technique de différence d'images ou celle de

division d'images. Par l'utilisation de la technique de régression, les effets défavorables de diverses conditions atmosphériques et/ou angles du soleil sont réduits (Coppin et al, 2004; Cromwell, 1983).

❖ L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique pour identifier la structure entre les variables et une technique pour réduire la dimensionnalité des données. Pour la détection de changement, l'ACP identifie la structure entre les images multi temporelle multi-spectrales. La première composante principale correspond aux pixels qui ne démontrent pas de changement, tandis que la deuxième composante (ou plusieurs des dernières composantes) identifie les pixels changés. Selon Lunetta et Elvidge (1998), l'ACP est efficace pour la comparaison globale des données multi-temporelles et peu sensible aux problèmes de superposition des images.

❖ Comme l'ACP, la transformation de Tasseled Cap est une technique linéaire de transformation de données qui permet d'obtenir de nouvelles bandes (indices) correspondant à la luminance du sol, à la verdure et à l'humidité. Ces bandes sont ensuite soustraites pour produire des images de changement. Cette méthode est particulièrement utile pour indiquer les changements de la couverture forestière (Coppin et Bauer, 1996; Mas, 2000; Léa et al, 2004).

I.5.2 .13 Méthodes de classification multi-temporelle

Ces méthodes se basent sur la classification, visuelle ou numérique, d'une image en réunissant les données de plusieurs dates. En ce qui concerne la classification visuelle, elle consiste à fournir des compositions colorées à partir de la même bande spectrale d'images prises à des dates différentes. Les changements sont reconnus par l'apparition de couleurs différentes. C'est-à-dire que les pixels où les zones ont changé apparaissent en couleur tandis que ceux non changés sont présentés en ton de gris. Il y a deux avantages à cette méthode. Premièrement, la capacité de regarder deux, même trois images (dates) de télédétection en même temps. Deuxièmement, le fait que les compositions multi temporelles peuvent être établies à partir de canaux obtenus pas des opérations arithmétiques entre bandes spectrales. Cependant, il y a quelques problèmes rencontrés en utilisant cette méthode: il n'y a pas de patron d'interprétation bien défini et elle ne fournit pas d'information quantitative sur la nature des changements.

Le rassemblement des pixels en classes qui contiennent les objets recherchés est le but des méthodes de classification numérique. Celles-ci se basent sur la similitude radio métrique pour trouver et puis regrouper les objets dont les caractéristiques radiométriques sont les mêmes dans le temps. Il y a plusieurs types de classifications numériques, on

décrira ici deux types communs: la classification dirigée et la classification non dirigée. La classification dirigée suppose que l'on connaît la localisation de certaines zones d'entraînement dans l'image et les classes objets correspondants à l'aide de travaux sur le terrain, l'interprétation des photos aériennes, l'analyse des cartes et l'expérience de l'analyste. L'entraînement est une étape importante par rapport à ce type de classification. Son but vise à définir les propriétés des signatures spectrales de chacune des classes thématiques au moyen d'échantillons de l'image de classes connues (Bénie, 2004). C'est pourquoi, elle joue un rôle principal dans la recherche des objets identiques et affecte directement le résultat de la classification. Cette étape différencie la classification dirigée de la classification non dirigée. Contrairement à la classification dirigée, dans la classification non dirigée, les objets sont regroupés par proximité de leurs signatures spectrales, et on vérifie par la suite à quoi ils correspondent dans l'image. L'analyste peut ne rien savoir de la nature des subdivisions ou des classes qui en résultent (Bonn et Rochons, 1992). La classification non dirigée, en fait, se fait par utilisation d'un critère de performance ou bien par seuillage d'histogramme (Bénie, 2004).

En général, avec les méthodes de classification multi-temporelle, l'entraînement ou l'identification des classes sont compliqués et elles donnent des résultats médiocres (Mas, 2000).

I.5.2 .14 Méthodes post-classificatoires (comparaison des classifications)

Ces méthodes sont basées sur la classification de deux scènes de différentes dates évaluées sur une base de pixel-par-pixel et rapportées par un tableau de statistique faisant appel à une matrice de changement. L'exactitude de la détection de changement dépend de la précision de chacune des classifications et de la superposition des images. Ces méthodes ont tendance à surestimer la quantité de changements et donnent des résultats médiocres (Mas, 2000). Cependant, à cause de leur simplicité et parce qu'elles rendent compte de la nature des changements, ces méthodes sont couramment employées dans de nombreuses études, surtout pour détecter les changements de l'occupation du sol. Pour obtenir de meilleurs résultats et limiter les erreurs, certains auteurs combinent une méthode de comparaison de classification à une autre méthode. Par exemple, l'analyse de texture, la différence d'image, l'analyse par vecteur de changement ou la logique floue. Ces dernières années, on utilise souvent la classification orientée objets pour classifier des images. Au lieu d'analyser des pixels indépendamment de leur endroit, des pixels contigus semblables sont groupés en objets en regardant certains facteurs comme: l'information voisine, l'échelle, l'endroit et la distance. L'intérêt de cette méthode est qu'elle vient améliorer les

techniques de segmentation d'images, qui permettent de diviser une image satellite en régions continues et homogènes faisant appel à des objets.

I.5.2 .15 Autres méthodes

❖ Grâce à sa flexibilité, la méthode hybride de détection de changement combinant des aspects de changement de seuil et de classification d'images a montré un potentiel élevé pour identifier des secteurs de changement (Prenez et Tritz, 2004; Lunetta et Elvidge, 1998). En réalité, cette combinaison permet de réduire l'erreur inhérente à l'analyse thématique de changement d'une image typique.

❖ L'application de la méthode des réseaux neuronaux artificiels (artificiel neural network ANN) a gagné une attention considérable comme une alternative aux approches conventionnelles. Cette méthode se base aussi sur des images classifiées. Elle a été employée dans divers études de détection des changements comme: le changement de l'occupation du sol (Abuelgasim et al, 1999), de l'urbain (Liu et L'atropa, 2002) et de la couverture de la forêt (Hesse et Schmullius, 2003). Selon ces auteurs, l'exactitude de la classification obtenue par l'approche ANN est meilleure que celles des autres approches (K-moyen ou maximum de vraisemblance). En fait, elle est capable d'intégrer des données multi-sources de capteurs et le contenu complémentaire de l'information dans un procédé de classification (par exemple l'information se base sur l'objet, l'analyse de texture et l'information spectrale).

❖ Systèmes experts à base de connaissances et intelligence artificielle (Knowledge-based expert system or artificiel intelligence): cette méthode permet d'intégrer non seulement l'information spectrale du changement mais les autres caractéristiques des objets. De ce fait, elle permet de surmonter certaines des limitations des classificateurs statistiques.

❖ Les méthodes basées sur système d'informatique géographique (SIG) inclus l'intégration de SIG et la télédétection et le pur SIG. Cette méthode permet de superposer directement les différentes sources de données en détectant les changements: des données du SIG sur l'image ou seulement des diverses données actuelles et passées du SIG (carte de l'utilisation des terres, carte topographie, etc.). Elle permet aussi de transférer les images traitées dans un système de base de données SIG. La plupart des applications de cette méthode se concentrent sur le changement de la zone urbaine vu qu'elle donne de meilleurs résultats que les méthodes traditionnelles par rapport à la complexité du paysage urbain (Lu et al, 2004).

I.5.2 .16 Avantages et inconvénients des méthodes de détection du changement

Malgré qu'elles soient catégorisées ou nommées par des noms différents, les méthodes de détection de changement se basent sur l'hypothèse que les changements d'occupation du sol se traduisent en des variations de la radiance et que ces variations sont importantes en comparaison de celles causées par d'autres facteurs concernant l'environnement (conditions atmosphériques, inclinaison solaire, humidité du sol ou état phénologique de la végétation) (Mas, 2000). Ainsi, la sélection des périodes des images devient une étape importante. Il faut choisir des scènes prises lors de périodes où la variabilité spectrale entre les différentes cultures et les autres couverts est grande (Savary et al, 2005). Afin d'éviter des variations de radiance dues à la différence du calendrier agricole, on doit nécessairement prendre des images prises à la même date (où même saison) pour une étude de détection des

changements d'occupation du sol. Cromwell (1983) et Jensen (1996) ont aussi montré que les méthodes de détection numérique de changement subissent l'influence des caractéristiques des capteurs (temporelles, spatiales, spectrales et radiométriques). D'autre part, les études de Collin et Woodcock (1996), Ridd et Liu (1998) et Civco (2002), constatent que dans le même environnement, différentes approches peuvent donner des cartes de changement différentes. Ils ont prouvé que la méthode mise en œuvre peut affecter profondément les évaluations qualitatives et quantitatives du changement. Le choix de la méthode appropriée prend donc une importance considérable. Il faut bien connaître les avantages et les inconvénients de chacune, lesquels sont présentés au tableau 6. Ces facteurs permettent de choisir la méthode la plus appropriée pour un traitement d'images spécifique afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

Tableau 6 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de télédétection du changement (Tiré et modifié de Mas, 2000 et Lu et al, 2004)

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Différence	Simplicité de mise en œuvre	Sensibilité à la qualité des corrections géométrique et radiométrique. Analyse délicate de l'image accentuée. Pas d'information sur la nature du changement.
Ratio	Réduction les impacts de l'angle du soleil, de l'ombre et de la topographie	Distribution non-normale du résultat souvent critiquée.

Vecteur de changement	Capacité de traiter tout nombre de bandes spectrales désirées. Information sur la nature du changement.	Sensibilité à la qualité des corrections géométrique et radiométrique. Complexité des données. Difficulté à identifier les changements trajectoires de l'occupation du sol.
Régression	Moindre sensibilité à la correction radiométrique. Réduction des impacts du capteur et des différences environnementales entre deux images acquises à deux périodes différentes de l'année.	Moindre sensibilité à la correction radiométrique. Réduction des impacts du capteur et des différences environnementales entre deux images acquises à deux périodes différentes de l'année.
ACP	Correction radiométrique non nécessaire. Moindre sensibilité à la superposition des images.	Interprétation difficile des composantes. Pas d'information sur la nature du changement.
ACP sélective	Correction radiométrique non nécessaire. Moindre sensibilité à la superposition des images.	Pas d'information sur la nature du changement
Classification multi - temporelle visuelle	Correction radiométrique non nécessaire. Moindre sensibilité à la superposition des images. Avantages de l'interprétation visuelle	Information sur la nature du changement difficile à extraire.
Classification multi-temporelle numérique	Correction radio métrique non nécessaire. Moindre sensibilité à la superposition des images. Possibilité d'identifier la nature du changement.	Complexité de la phase d'apprentissage (classification dirigée) ou de l'identification a posteriori des classes spectrales (classification non dirigée).
Comparaison post classificatoire	Correction radiométrique non nécessaire. Identification de la nature du changement. Possibilité d'intégrer des données de nature différente.	Grande sensibilité à la qualité des classifications utilisées. Grande quantité d'heures et d'expertise à créer des classifications
Autres méthodes		
Hybride	Exclusion des pixels non-changés de la classification afin de réduire les erreurs de classification.	Choix des seuils à classifier. Complexité à identifier le changement trajectoire.
Réseaux neuronaux artificiels (artificiel neural network - ANN)	Capacité d'estimer les propriétés des données se basant sur des échantillons d'entraînement.	Longue d'entraînement. période Sensibilité à la quantité des données d'entraînement utilisées Les fonctions d'ANN ne sont

		pas toujours disponibles dans les logiciels de traitement d'images commerciaux.
SIG (Système d'informatique géographique)	Support au processus d'interprétation et d'analyse. Capacité de mettre à jour directement l'information de l'utilisation des terres dans le SIG. Intégration de photos aériennes de l'utilisation des terres récentes et anciennes et d'autres données cartographiques.	Sensibilité à la qualité des différentes sources de données utilisées. Sensibilité à l'exactitude de la géométrie des données SIG et du système de classification utilisé.

Chapitre II :

Etude physic-géographique des mont de Saïda

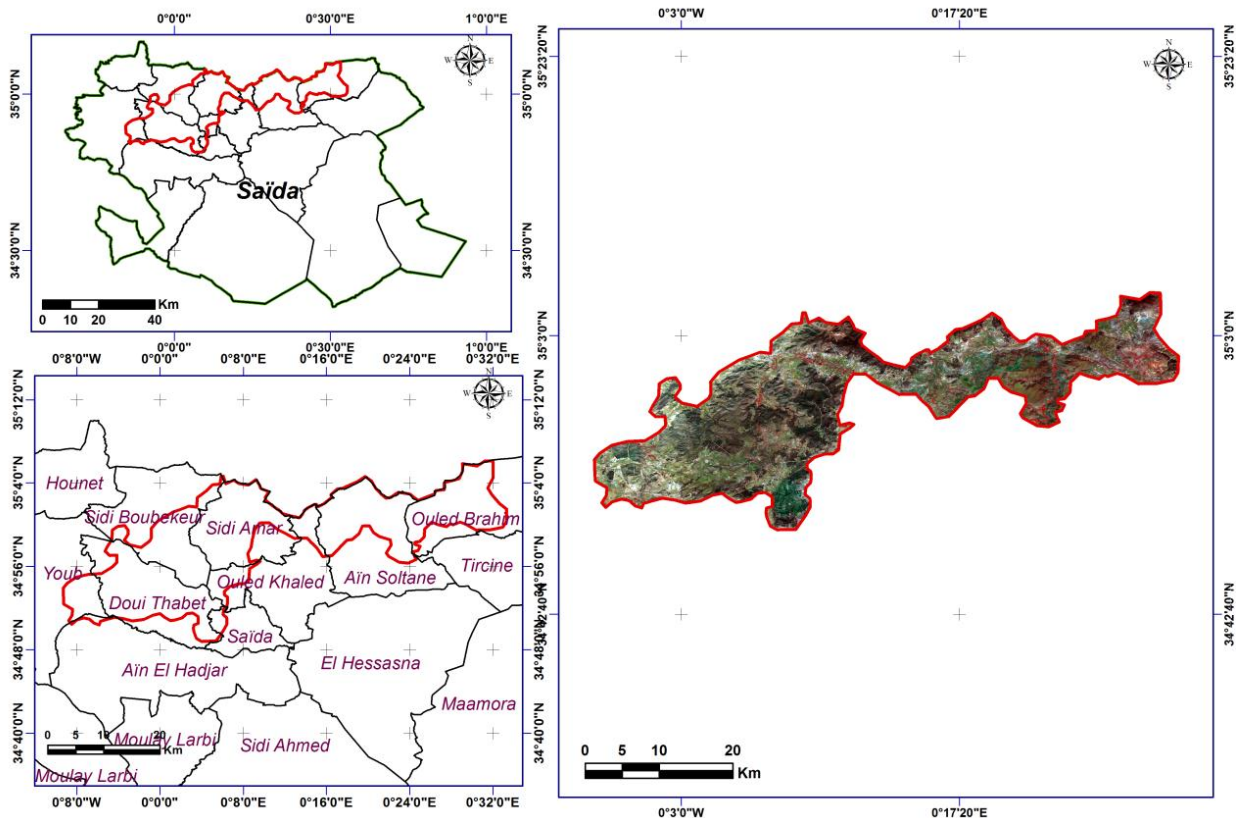
II. Introduction

Le but de cette physico-géographique est de caractérisé les monts de saïda , afin d'aborder et cartographie les changements d'occupation des sols .

II.1 Présentation de la zone d'études

Les monts de Saïda sont situés dans l'Ouest de l'Algérie², entre Saïda et Freneda, et constituent un relief accidenté et boisé de chênes verts et de pins d'Alep, à la bordure des plaines steppiques au sud³.

De nombreuses sources karstiques prennent naissance dans ce massif montagneux : aïn Zerga, aïn Tifrit, aïn Soltane et aïn Balloul, ainsi que de nombreux cours d'eau : oued Tifrit, oued Sidi Minmoun et oued Saïda.(carte n°1)



Carte n°01: Représente la situation géographique des monts de Saïda

II.3 Les caractéristiques physiques des monts de Saïda

II.3.1 Aspect géographique :

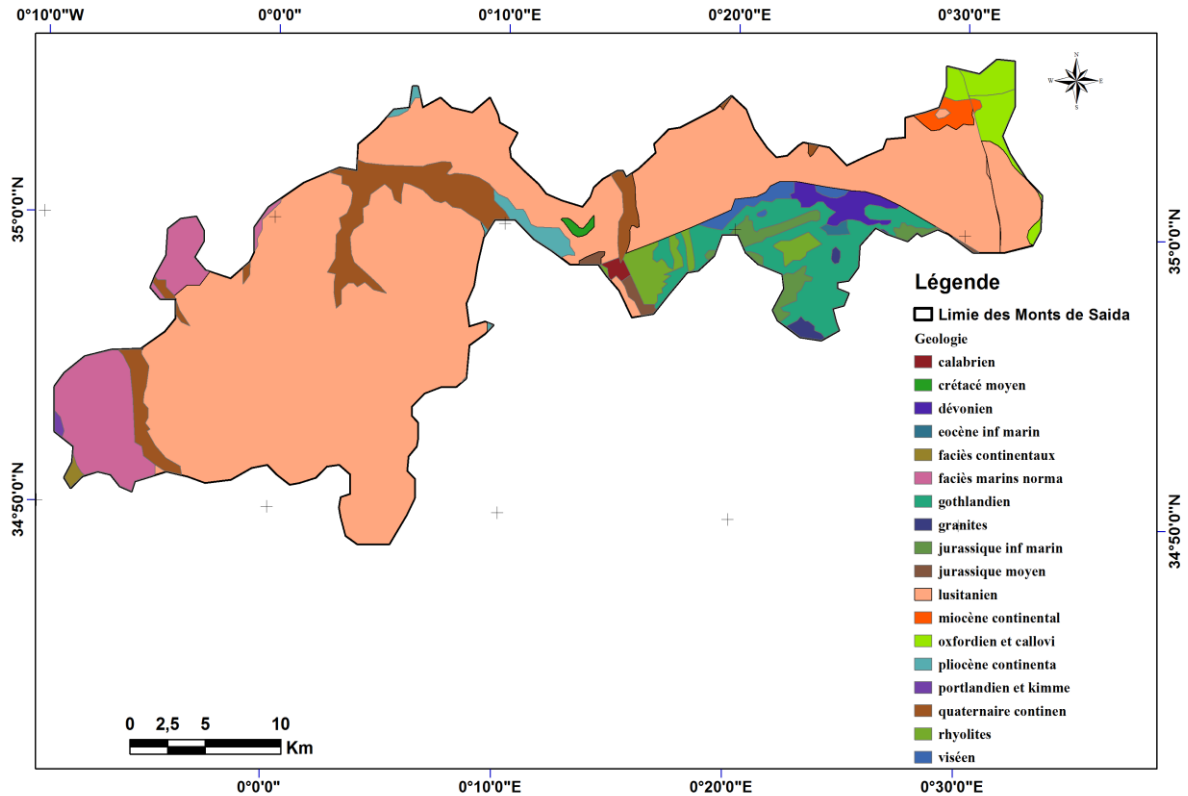
Entre l'Atlas Tellien au Nord, d'âge secondaire et les Hauts Plateaux Oranais au Sud, d'âge tertiaire, se dessine une unité géologique d'âge secondaire, orientée sensiblement Est-ouest, l'unité est constituée par les Monts de Saïda, les Monts de Frenda et les Monts du Djebel Nador. Dans toute cette zone, le substratum secondaire est profondément enfoui sous la dépression des Chotts, se relève progressivement avant de disparaître de nouveau, brusquement cette fois au Nord, contre l'Atlas Tellien.

Les monts de Saïda forment à la limite Nord des hautes plaines oranaises le prolongement vers l'Est des Monts de Daïa. Constituant une unité géologique et géographique assez précise, ils sont limités au Nord par les chaînes telliennes des Monts de Beni Chougrane et au Nord-Est par les monts de la Mina.

Ainsi, les Monts de Saïda forment un quadrilatère limité :

- Au Nord, par des Monts de Mina et par la dépression de la plaine d'Eghris c'est-à-dire pratiquement par les Villages Froha et Ain Fekan.
- A l'Ouest, par le haut cours de l'Oued Saïda, l'Oued Berbour et la partie moyenne de l'Oued falette suivant le méridien 0°.
- Au Sud, par les derniers affleurements jurassiques bordant la dépression du Chott Chergui au Sud de Sidi Ahmed.
- A l'Est par les plateaux constituant les Monts de Frenda.

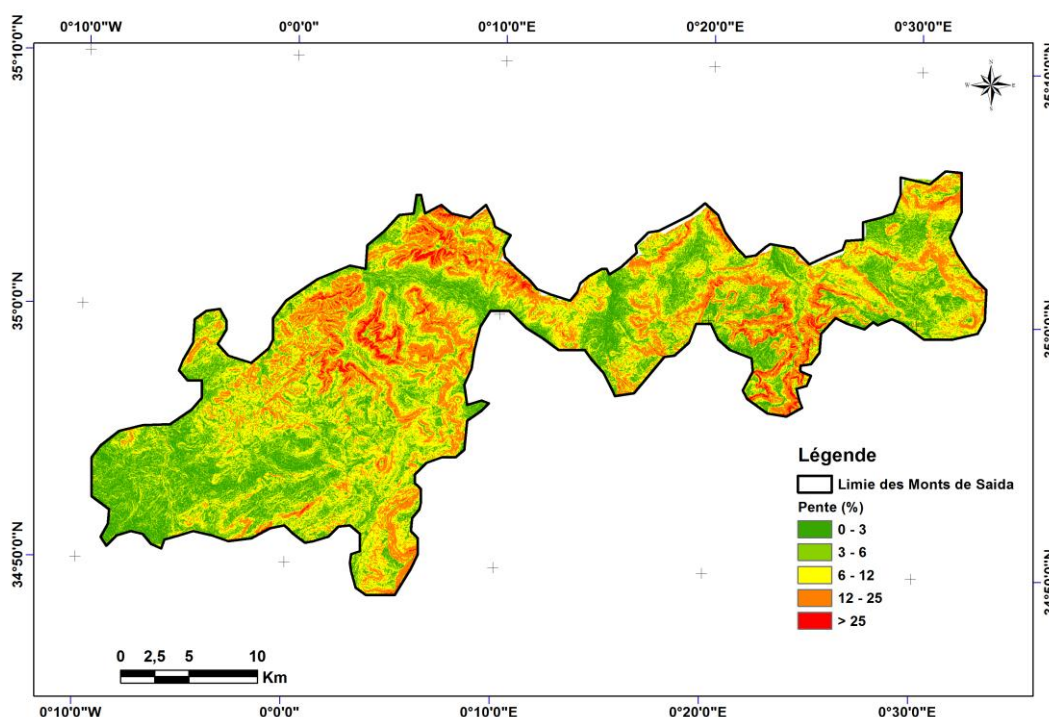
Les Monts de Saïda sont formés essentiellement par un anticlinal à grand rayon de courbure orienté Ouest, Sud-ouest, Est, Nord-est parallèlement à l'axe des Chaînes telliennes et à la dépression des Chotts. Ils font suite à l'anticlinal des Monts de Daïa et s'abaissent et s'atténuent vers l'Est pour passer aux sub-tabulaires des Monts de Frenda. (Ameur, 1999; in Kfifa 2013)



Carte n°2: carte géographique des monts de saïda

II.3.2 Les pentes :

D'une manière générale, la topographie des monts de Saïda est relativement plane car les classes de pentes inférieures à 13 % occupent environ 84 % de la superficie totale des monts (**carte n°2**). Soit 62 620 ha de la superficie totale des monts de Saïda, et occupent surtout les communes de Saïda, Doui Thabet, Sidi Amar, Sidi boubkeur et Ouled Khaled. Le reste soit 16 % du territoire 11940 ha ont une inclinaison bien marquée avec néanmoins une classe intermédiaire 10-25 % relativement importante. La partie de la zone dont la pente est supérieure 12,5 % est caractérisée le plus souvent les zones de piémonts, se sont le prolongement des massifs montagneux de la wilaya de Saïda, elles sont considérées sensibles aux phénomènes d'érosion et leurs conséquences. Ce sont généralement des terrains de parcours et des terrains forestiers. La région où les pentes dépassent les 25%, également les hauts piémonts et les zones montagneuses, de forte inclinaison. Ces terrains sont généralement boisés et s'étendent sur l'ensemble des massifs de la wilaya.



Carte n°3 : représente les pentes des mont de saïda

Tableau n°07 : représente les classes des pentes

Classe des pentes	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
0 à 3 %	15280	20,49
3 à 12,5 %	47340	63,49
12,5 à 25 %	11200	15,02
+25%	740	0,99
Total	74560	100

II.3.3 L'altitude :

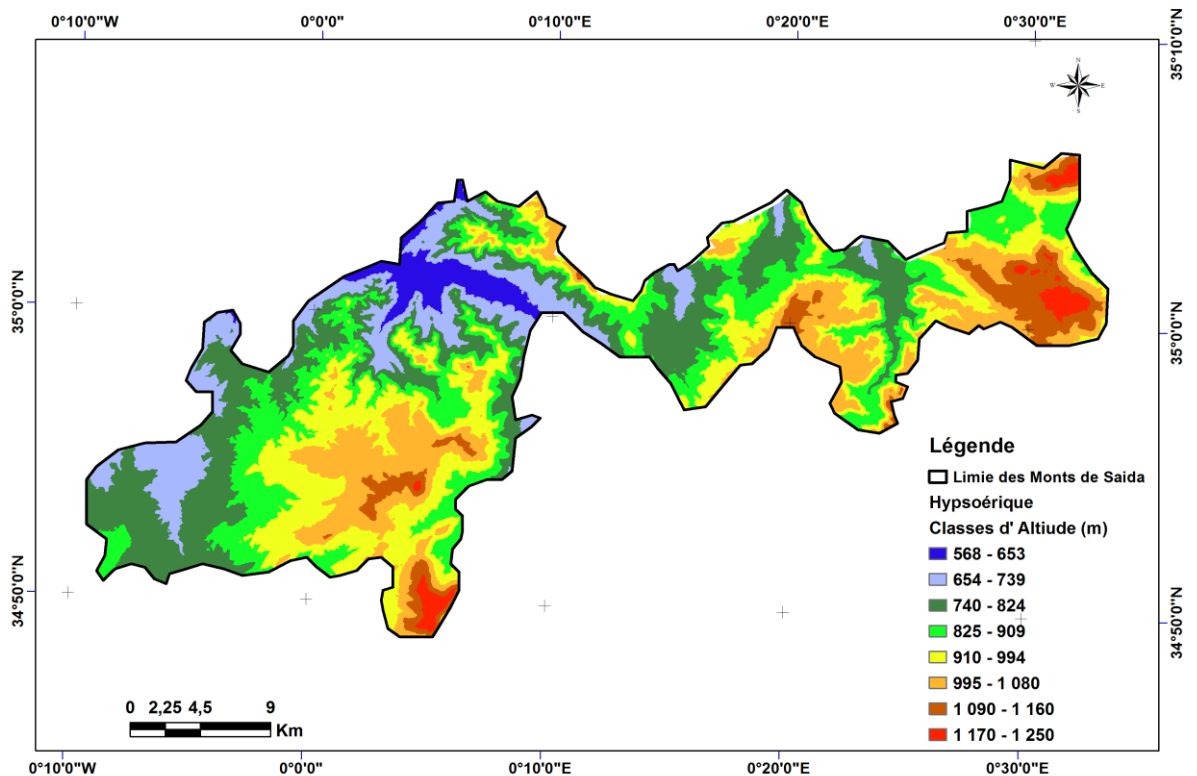
Les monts de Saida se caractérisent par différentes classes d'altitude. Ainsi, les classes d'altitudes retenues sont décrites comme suit :

Classe 1 : entre 500 et 750 m : Cette classe est la moins représentée, elle caractérise 27,88 % de la superficie totale des monts, où la topographie est généralement plane. Ce sont généralement les fonds de vallées et les zones des piémonts.

Classe 2 : entre 750 et 850 m : Cette classe caractérise un relief vallonné, formé de plateau ou de bas piedmonts de collines. Cette classe occupe 22,96 % de la surface des monts.

Classe 3 : entre 850 et 1080 m: Cette classe est dominante dans le massif montagneux, elle couvre 43 % de la surface totale.

Classe 4 : altitude supérieure à 1100 m : Cette classe représente à peu près 3% de la superficie totale ; elle se localise au sud de la région d'étude dans la commune de Doui Thabet et à l'Est dans la commune d'Ouled Brahim.

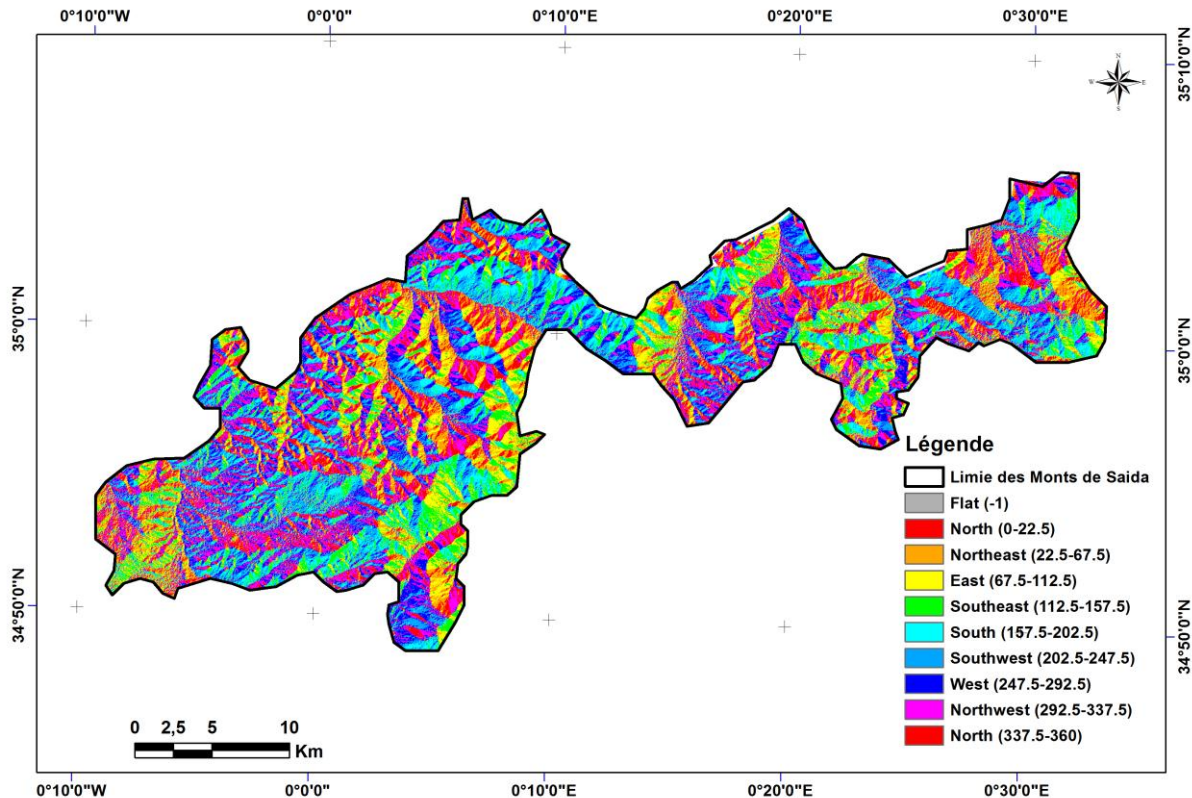


Carte n°4: L'hypsométrique de niveau qui limite des monts de saida

II.3.4 -L'exposition:

L'effet de l'exposition est particulièrement important et se traduit la différence entre le versant nord et versant sud des montagnes, ou entre les deux flancs d'une vallée lorsque celle-ci à une direction générale est-ouest. La présence d'une falaise exposée au sud protège les terrains situés à son pied contre les vents du nord, concentre la lumière et détermine un climat local sensiblement plus chaud que celui du reste de la région (**Ozenda, 1986**).

De par sa situation géographique et surtout son relief, les expositions sud et est dominant contribuant à augmenter l'ensoleillement et par conséquent l'évaporation. L'exposition nord bénéficiant des vents frais et humides et de la brise marine est moindre par rapport aux autres expositions.



Carte n°5: L'exposition des mont de saïda

II.3.5 -Hydrologie

II.3.5.1 -Réseau Hydrographique :

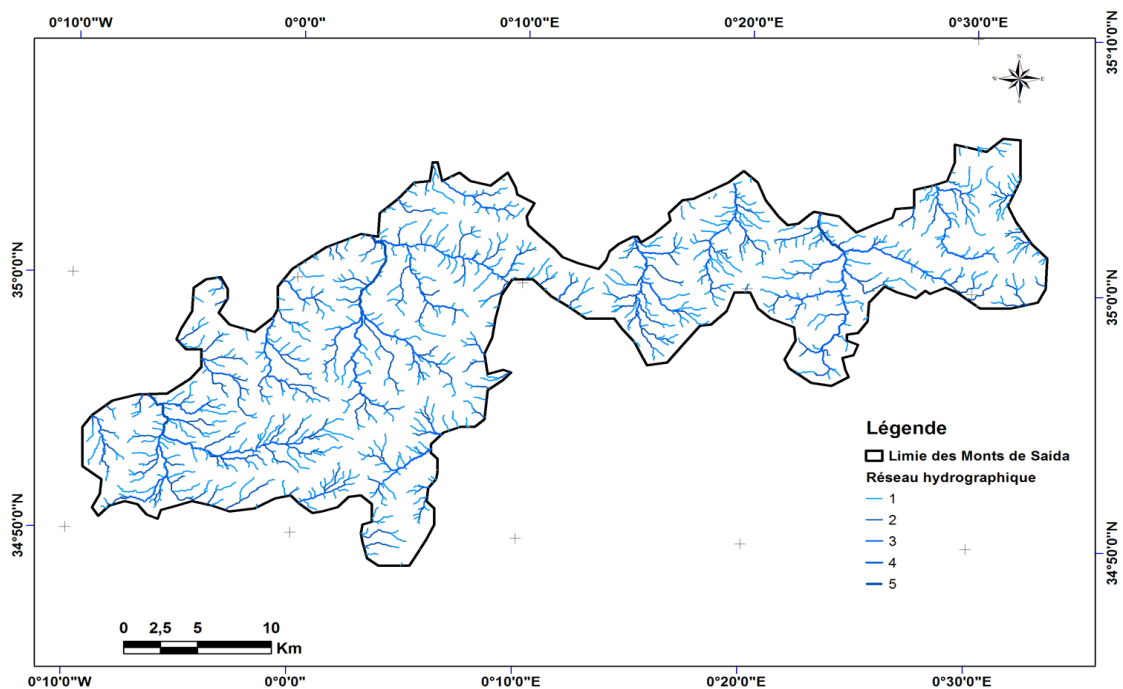
L'hydrographie de la région permet de distinguer plusieurs bassins superficiels où l'écoulement se fait vers le nord exception faite du bassin du Chott Echergui où l'écoulement se fait vers le sud. La nature essentiellement carbonatée des roches qui constituent la zone d'étude a permis aux oueds de ces bassins de creuser des vallées très encaissées et des lits très profonds et étroits, leur solidité a favorisé la dissolution en profondeur donnant une véritable région Karstique. Lorsque les affleurements sont marneux ou argileux, le relief devient beaucoup plus mou, il s'agit des croupes très arrondies subissant un ruissellement intense et une forte érosion. A ce propos **DESCHAMPS (1973)**, note : « Etant donné la disposition du plateau de Saïda, légèrement

bombé au centre et descendant en pente douce vers ses bordures, l'hydrographie de la région permet d'y distinguer plusieurs bassins superficiels ».

Bassin de l'oued Saida : il s'agit du haut cours de l'oued Saida, celui-ci prenant sa source près d'Ain El Hadjar (Ain-Tebouda Sud-ouest de Ain El-Hadjar). La superficie du plateau dolomitique intéressée par ce bassin est d'environ 115 Km². L'oued est pérenne. A Charrier, la superficie du bassin est de 560 Km². Ses nombreux affluents dont les plus importants sont oued Nazreg, Oued Massif, oued Taffrent sont alimentés également à partir de ressources de ruissellement sur les hauteurs des montagnes.

Bassin de l'oued Tiffrit : Il s'agit du haut cours de l'oued Taria. L'oued Tiffrit prend sa source au plateau de Hassasna avec l'oued Foufot, il présente un écoulement pérenne. La partie du plateau Dolomitique couverte par ce bassin peut être évaluée à 600 Km². A Taria, il couvre 1806 Km². Il s'écoule dans une vallée assez profonde aux berges parfois escarpées, de nombreux affleurements viennent grossir l'écoulement ces cours d'eaux tel que l'oued Belloul et l'oued Minouma. L'oued Berbour à l'ouest des montagnes, qui est un important apport des oueds Bouatrous, Fourhalzid, conflue avec l'oued Sefioun pour donner l'oued de Hounet.

Bassin de l'oued El Abd : il s'agit du haut court de l'oued El Abd, celui-ci prend sa source au Djebel Derkmous. Il présente un écoulement pérenne. A Takhemaret, la superficie du bassin versant de l'oued El Abd est de 560 Km



Carte n°06: Le réseau hydrographique des monts de saïda

II.3.5.2 Les Principaux Oueds :

Ils sont au nombre de sept : oued Sefioun, oued Berbour, oued Saida, oued Sidi Mimoun, oued Hassa, oued Guernid et oued El Abd. Partant des données exploitées de divers documents disponibles, les écoulements du principal bassin versant de l'espace «Chott Chergui » auquel appartient la région Hauts Plateaux ouest, sont évalués de façon sommaire et estimés à un volume de 240 à 300 Hm³ / an.

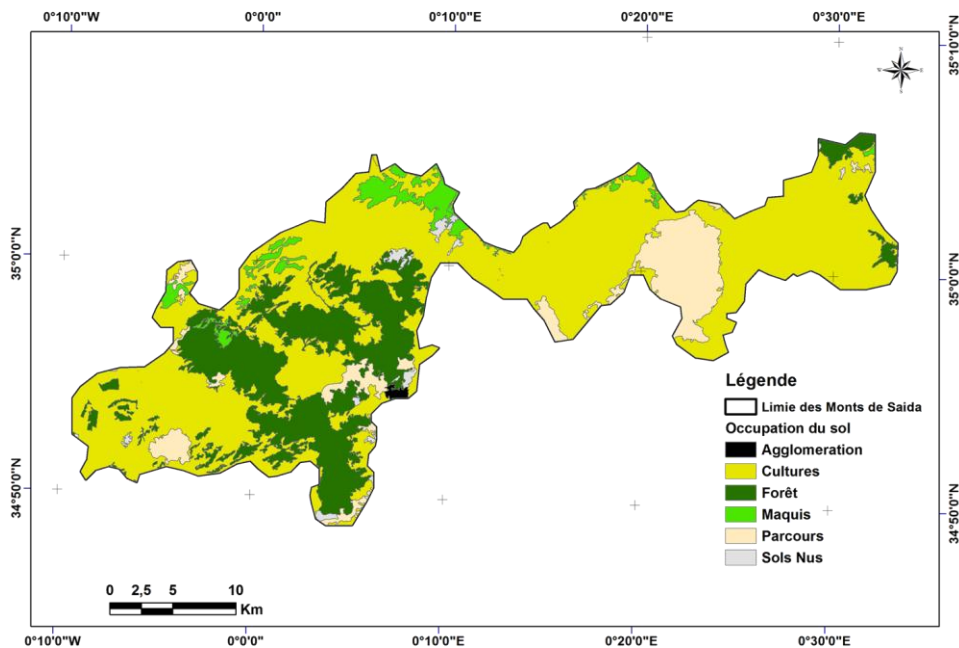
II.3.6 L'occupation des sols :

L'occupation du sol de la wilaya de Saida présente des similitudes avec l'occupation nationale et trouve ses origines dans l'absence de politique globale en matière d'organisation du territoire et d'utilisation des sols, l'analyse de cette occupation présente quelques aspects particuliers et des caractéristiques en relation avec les conditions du milieu naturel qui constituent des facteurs limitant (Labani, 2005).

Un équilibre entre les trois espaces : agricole, forestier et pastorale conférant a la wilaya une vocation assez complexe et difficilement maitrisable (Tableau n°08)

Tableau n°08 : L'occupation des sols des monts de saïda

Occupation du sol	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Terres agricoles	26789	34.04
Terres forestières	174361	26.17
Terres de parcours	253679	38.08
Terres improductives	11426	01.71



Carte n07: La carte d'occupation du sol de la zone d'étude

II.3 .7 - le Climat :

Le climat est l'ensemble des actions de l'atmosphère : humidité, Pluie, température, vents. C'est l'élément naturel sur lequel l'homme n'a aucune influence directe (sauf le cas particulier des irrigations). C'est un facteur essentiel du développement des plantes, de la formation et de l'évolution des sols .ses principales composantes ont une influence importante sur l'érosion (**GRECO J, 1966**). Donc Le facteur climatique est toujours important dans n'importe quelle étude (agriculture, paysage, utilisation des sols...), il constitue un élément déterminant dans le développement de cette zone du point de vue agriculture, paysage et activités humaines. Les données utilisées sont celle de la de stations météorologique de Rebahia (Saida).

Le climat dans la région de Saida est sec et chaud en été et froid en hiver, avec Une pluviométrie faible et irrégulière (353 mm) avec un régime pluviométrique du type Semi aride et une grande irrégularité interannuelle et inter-saisonnière.

La saison sèche s'étale sur environ 6 mois, et avec un étage bioclimatique semi-aride frais. Des températures fortes en saison estivale et basse en saison hivernale.

II.3.7.1 La température :

Les données thermométriques caractérisant la région d'étude durant la période (1983-2012) recueillis dans la station météorologique de Rebahia, sont représentées dans le(tableau n°09)

Tableau n°09: la température moyennes mensuels et minimales et maximales de la zones d'étude (2013)

Mois	Sept	Octo	Nove	Dese	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout
T° moy max (°C)	30	25	18	15	14	15	18	21	26	32	36	36
T° moy min (°C)	15	12	07	04	03	03	05	07	10	15	18	19
T° moy (°C)	23	18	13	10	8	08	09	12	18	14	23	23

D'une manière générale, les températures moyennes mensuelles varient d'une saison à l'autre révélant ainsi la présence de deux saisons :

□ Une saison chaude s'étalant de Mai à Octobre dont les mois les plus chauds sont : Juillet et Août M = 36 °C.

□ Une saison froide s'étalant de Novembre jusqu'à Avril dont la température la plus basse $m = 3^{\circ}\text{C}$ durant le mois de Janvier et Février.

II.3.7.2 -Le vent :

Le vent et un déplacement d'air né des différences de pression entre deux points d'une même plante horizontale (TABEAUD M, 1998). Dans la région d'étude, la valeur de la vitesse du vent n'est pas constante tout au long de l'année mais sa variation mensuelle reste très peu prononcée (tableau 10).

Tableau n° 10: La vitesse du vent moyenne annuelle et le nombre de jours sirocco moyen de la région d'étude (1983-2012).

Mois	Sept	Octo	Nove	Dese	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout
Vent Moy (m/s)	2.3	2.3	2.6	2.6	2.8	2.8	2.8	3.0	2.8	2.8	2.6	2.6
Sirocco	1	2	0	0	0	0	1	1	3	3	3	3

(Station Météorologie Rebahia, Saida, 2013).

Tableau n°11: Direction et fréquence du vent de la région d'étude (1983-2012).

Direction	N	N.E	E	S.E	S	S.O	S	N
Fréquence %	14.7	2.2	1.4	2.9	10.6	3.2	7.2	8.9

Les vents bénéfiques sont ceux de l'Ouest et du Nord-ouest (avec respectivement 7.2 % et 8.9 % des fréquences), ces vents déplacent des masses d'air instable charge d'humidité laquelle se transforme en précipitations au contacts des massifs. Par contre des vents violant et chauds sévissent dans le désert appelé sirocco, se déplacent vers le Nord en période de basse pression en méditerranée (en été et printemps avec une fréquence de 10.6).

II.3.8 Gelée :

Sur une période de 30 ans (1983-2012), la moyenne annuelle des gelées est de 39 jours (tableau 16). Les mois de Décembre, Janvier et Février sont les mois les plus froids de l'année d'étude, coïncidant avec le plus grand nombre de jours avec gelée

Tableau n° 12 : Le nombre de jours de gelée de la région d'étude (1983-2012).

Mois	Sept	Octo	Nove	Dése	Jan	Fevr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
Nbr de Jours Gel	0	0	2	9	12	10	04	02	0	0	0	0

(Station Météorologie Rebahia, Saida, 2013)

II.3.9 . L'Humidité relative de l'air

Les données caractérisant l'humidité relative de l'air de la région d'étude au cours de la période (1983-2012) sont reportées sur le (tableau 13)

Tableau n° 13 : L'humidité relative de la région d'étude au cours de la période (1983-2012).

Daïra Saida	(Ouled-Khaled)
Daïra Ain El-Hadja	(Moulay Larbi - Sidi-Ahmed)
Daira Sidi-Boubekeur	(Sidi-Amar)
Daïra EI-Hassasna	(EI-Maamoura – skhouna)
Daïra Ouled-Brahim	(Tircine - Ain Soltane).
Daïra Youb	(Doui thabet- Hont).

CHAPITRE III

Méthodologie

III.1 Introduction

Comme nous l'avons cité précédemment, les images acquises par les capteurs placés à bord des satellites contiennent des erreurs radiométriques et atmosphériques liées aux caractéristiques de l'instrument et de la présence de l'atmosphère, d'où la nécessité d'une démarche de prétraitement des données que nous allons traiter dans ce chapitre.

III.2 Collecte des données

Dans le cadre de notre étude nous devons nous questionner sur le type d'images à utiliser (résolution spatiale, spectrale, capteur utilisé,...), mais ce choix dépendra fortement de la disponibilité de ces dernières. Le site Earth Explorer de l'USGS fournit des images téléchargeables gratuitement du programme Landsat qui offre toute une gamme de capteurs et donc d'images depuis près de 45 ans. Le programme a été lancé en 1972 et il est composé de 8 satellites qui n'ont cessé de s'améliorer au cours du temps, initialement équipés du capteur MSS (Multi Spectral Scanner), puis TM (Thematic Mapper), ETM + (Enhanced Thematic Mapper Plus), le plus récent est aujourd'hui équipé du capteur OLI (Operational Land Imager). De plus, la résolution spatiale s'est largement améliorée puisqu'elle est passée de 80m pour Landsat 1 à 30m pour Landsat 5, 7 et 8 (15m pour la bande du panchromatique), contrairement aux images Spot, Ikonos ou Quickbird qui, malgré leurs excellentes résolutions, restent encore aujourd'hui très chères pour des recherches qui ne disposent pas forcément de grands moyens financiers.

III.3 Choix et acquisition des données :

La sélection des images dans le cas de notre étude, doit se faire sur la base de critères similaires, notamment au niveau de la saison d'acquisition afin d'avoir un meilleur contraste entre les espaces végétalisés et les sols nus.

III.4 Traitement des images :

Avant d'entamer notre travail nous devons appliquer des modifications nécessaires pour chaque image. La première correspond à l'extraction de la zone de travail sur chaque image des dates retenues afin de pouvoir les superposer. Ainsi, il est important de réduire cette emprise à celle qui englobe l'ensemble de bassin versant de l'Oued Mekerra afin d'alléger les traitements à venir à l'aide du même masque.

III.5 Prétraitements des images :

Le prétraitement d'image est une étape importante dans la télédétection, il vise à obtenir des bonnes valeurs de l'énergie réfléchie ou émise sur un point quelconque de la surface terrestre. Les traitements les plus fréquents sont

* Correction radiométrique.

* Correction atmosphérique.

Les corrections radiométriques et atmosphériques, aussi appelés étalonnage d'image, visent à obtenir un paramètre physique indépendant des conditions d'éclairage et même des conditions atmosphériques, ce qui nous permet d'utiliser des images de différentes époques pour détecter les changements.

Pour traiter les images obtenues nous allons utiliser le logiciel ENVI (ENvironment for Visualizing Images).

Chapitre IV:

Résultats et Discussions

IV.1 Introduction

Afin de détecter les changements de l'occupation du sol au des monts de saida , il est nécessaire d'étudier son occupation du sol dans deux dates différentes. D'une manière générale, l'utilisation de la télédétection dans le cadre des études de l'occupation des sols est assez récurrente. Son efficacité semble indéniable pour étudier l'évolution spatiotemporelle de phénomènes naturels ou anthropiques, et la précision grandissante des images obtenues par les capteurs ne font qu'améliorer les résultats. Ainsi, l'occupation du sol peut non seulement être observée, mais elle peut surtout être extraite grâce à différents traitements (classification) basés sur la réponse spectrale des pixels. Dans le chapitre présent nous allons générer une carte thématique des classes d'intérêt à partir des données numériques pour enfin détecter le changement de l'occupation du sol de la plaine au cours des 11 dernières années

IV.2 Classification thématique d'image de télédétection

Classifier une image en télédétection consiste à rassembler l'ensemble des pixels de l'image en un nombre limité de classes correspondant aux grands éléments structuraux de l'image, c'est donc établir une cartographie de l'image en s'appuyant sur les valeurs radiométriques des pixels. Les méthodes de classification les plus communes peuvent être séparées en deux grandes catégories : les méthodes de classification non supervisée et les méthodes de classification supervisée.

IV.2.1 Classification non supervisée

La classification non supervisée comme la définie (Lebarbier et al. 2008) désigne un corpus de méthodes ayant pour objectif de dresser ou de retrouver une typologie existante caractérisant un ensemble de N observations à partir de P caractéristiques mesurées sur chacune des observations. Par typologie, on entend que les observations, bien que collectées lors d'une même expérience, ne sont pas toutes issues de la même population homogène, mais plutôt de K populations. Il existe une très large famille de méthodes dédiées à la classification non supervisée, dans le cadre de notre étude nous allons appliquer deux algorithmes les plus répandues : ISODATA et K-means.

IV.2.2 Classification non supervisée ISODATA

Cet algorithme calcule les moyennes des classes uniformément réparties dans l'espace des niveaux de gris et regroupe les pixels restants de façon itérative en utilisant la technique de la distance minimale. À chaque itération on recalcule les moyennes et on classe à nouveau les pixels en tenant compte des nouvelles moyennes. La fusion, l'éclatement ou l'annulation itérative des classes sont effectués à base des paramètres d'entrée fixant certains seuils. Tous les pixels sont associés à la classe qui leur est la plus proche à moins qu'un écarttype ou une distance seuil soit spécifié, et auquel cas certains pixels pourraient être non classifiés s'ils ne remplissent pas le critère choisi. Ce processus continue jusqu'à ce que le nombre de pixels dans chaque classe ne change plus d'une valeur supérieure au seuil fixé pour le nombre de pixels par classe, ou jusqu'à ce que le nombre maximal d'itérations soit atteint (Akono et al. 2005). Pour effectuer la classification non supervisée dans logiciel ENVI on va au menu Toolbox on choisit la commande Unsupervised Classification

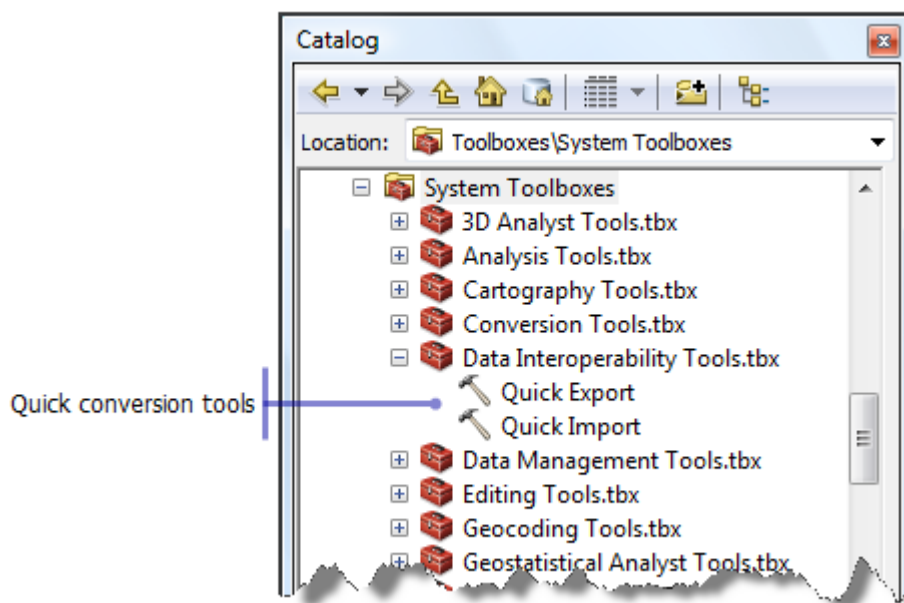


Figure n °13 : Image de classification non supervisée ENVI

En choisissant cet algorithme la fenêtre de configuration du classificateur s'affiche.

On sélectionne le nombre de classes à définir. Cette gamme est requise parce que l'algorithme regroupe et divise les pixels en fonction des seuils. On introduit ensuite le nombre maximum d'itérations et le seuil de changement. Ce dernier est utilisé pour terminer le processus itératif si le nombre de pixels dans chaque classe varie de moins que le seuil. On introduit le nombre minimum de pixels requis pour former une classe. Enfin, on introduit la distance minimale entre les moyens de chaque classe, également dans niveaux numériques, et les couples combinables maximales.

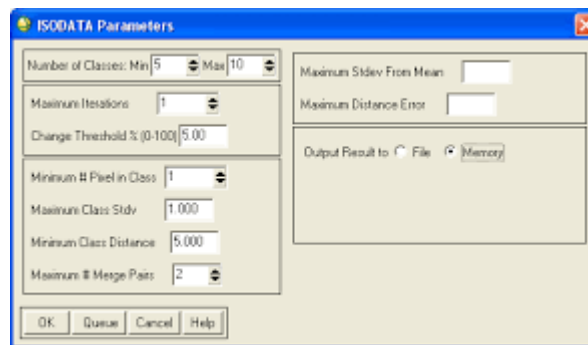
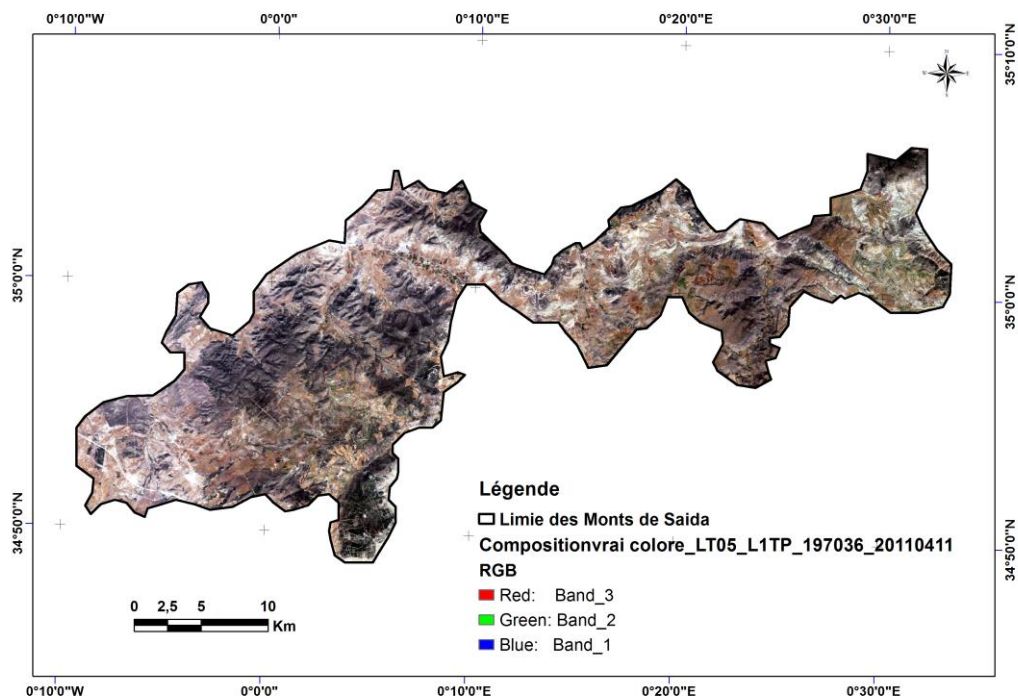


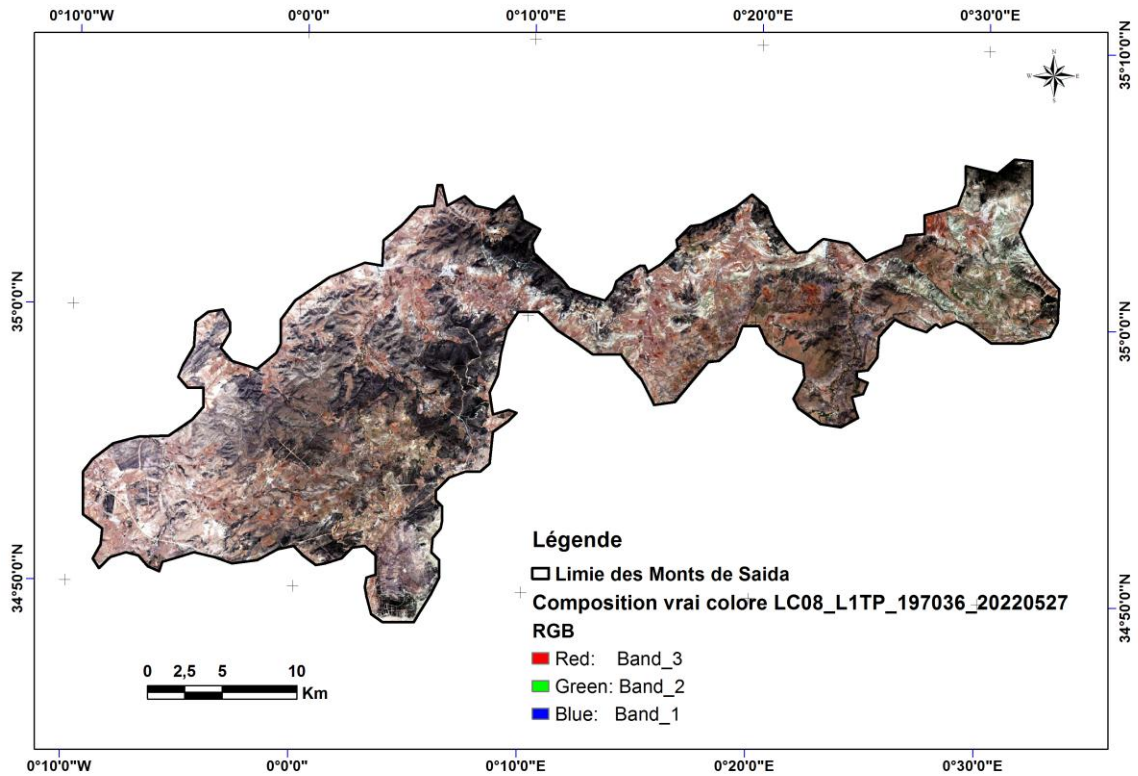
Figure n°14 : Notification de l'algorithme d'ISODATA sur ENVI

IV.3 Composition colorée d'une image satellitaire

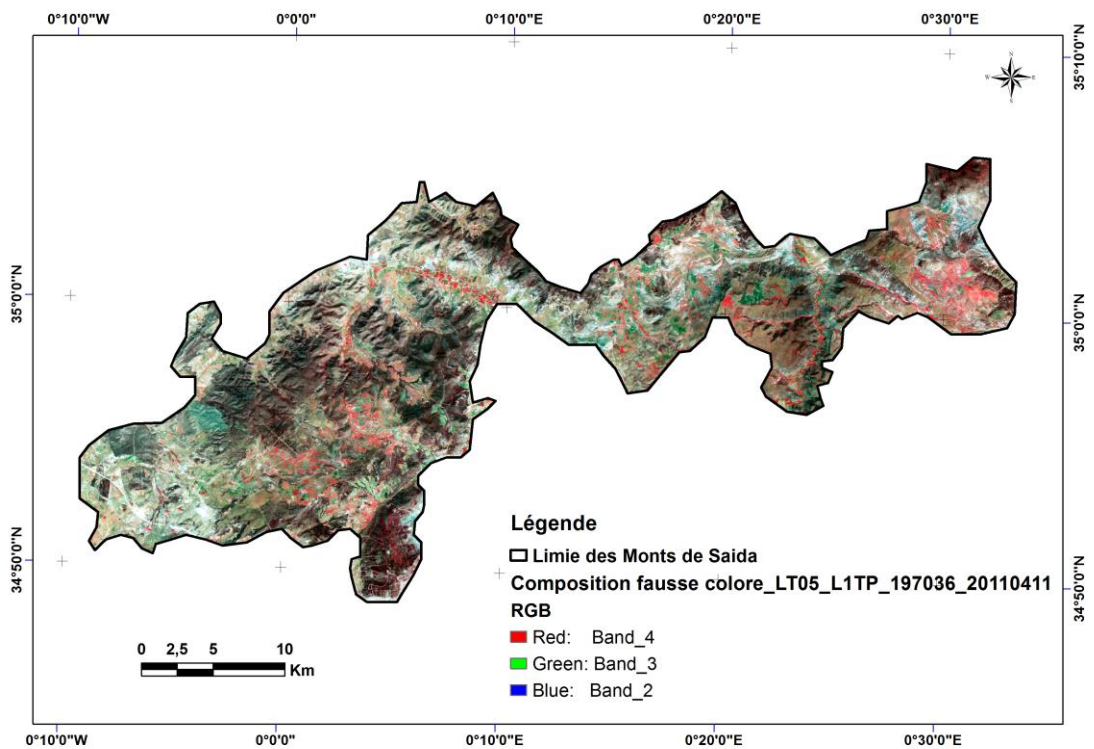
La composition colorée a consisté à combiner des informations que contiennent trois bandes en les affichant simultanément dans les trois couleurs primaires (rouge, vert et bleu). L'objectif de cette opération est d'avoir une synthèse d'informations en vue de faire une bonne discrimination des types de formations végétales. Au terme de plusieurs combinaisons, la composition colorée TM et ETM+ 4-5-3 a été choisie, car elle présente les meilleures discriminations des types d'occupation du sol (Chatelain, 1996, Girard et Girard, 1999 ; Oszwald, 2005). Le choix du périmètre à visiter a été fait en tenant compte de l'accessibilité et de la représentativité de toutes les classes de végétation définies par l'affichage en fausse couleur des images satellitaires.



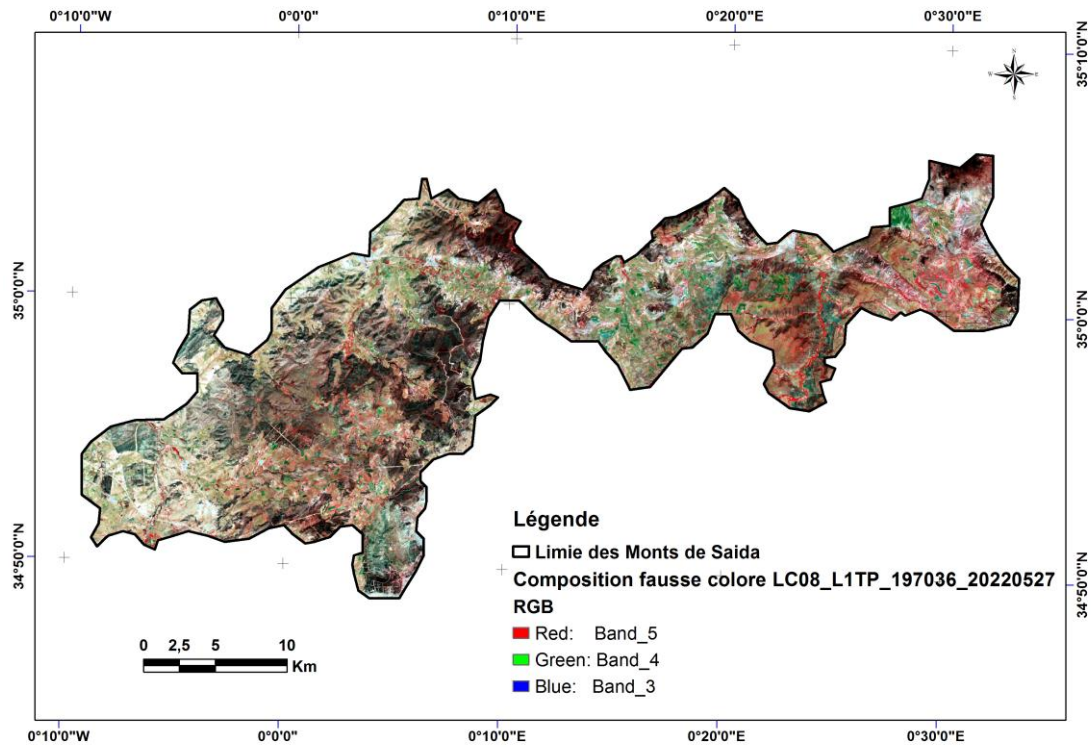
Carte n°08 : Composition vrai colore des monts de saïda (11/04/2011)



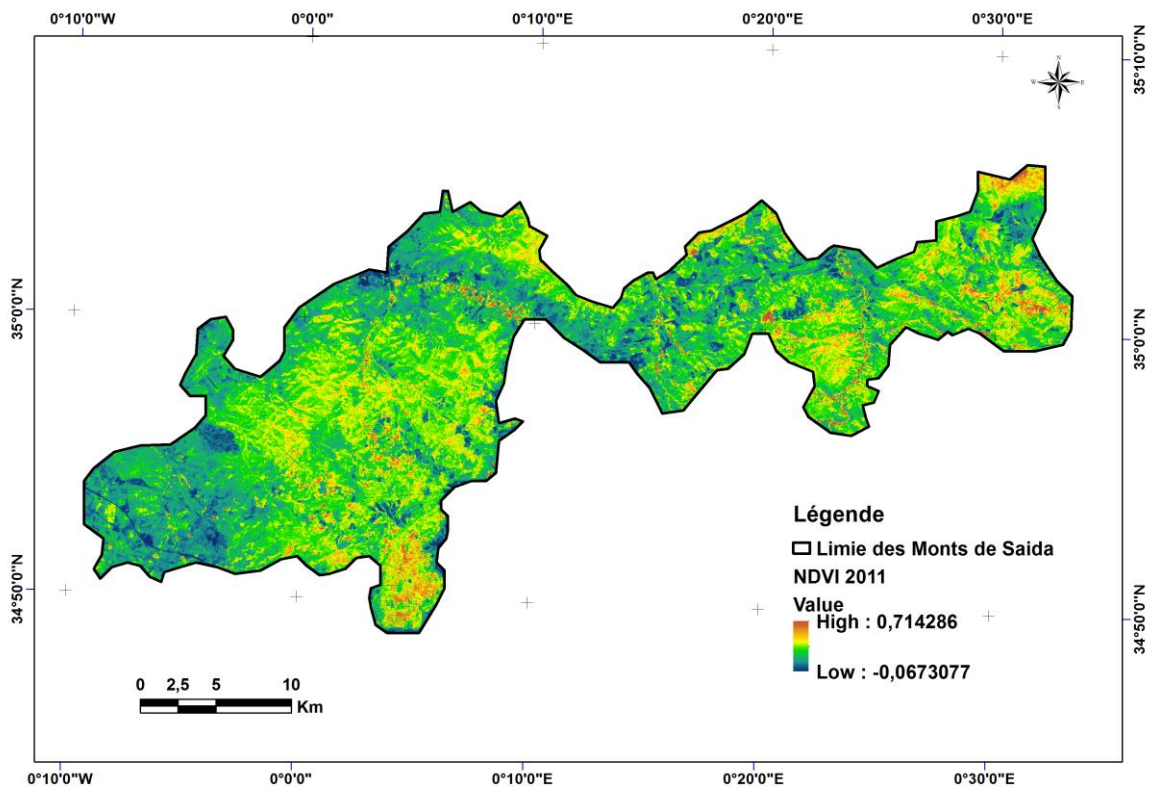
Carte n° 09: Composition vrai colore des monts de saida (27/05/2022)



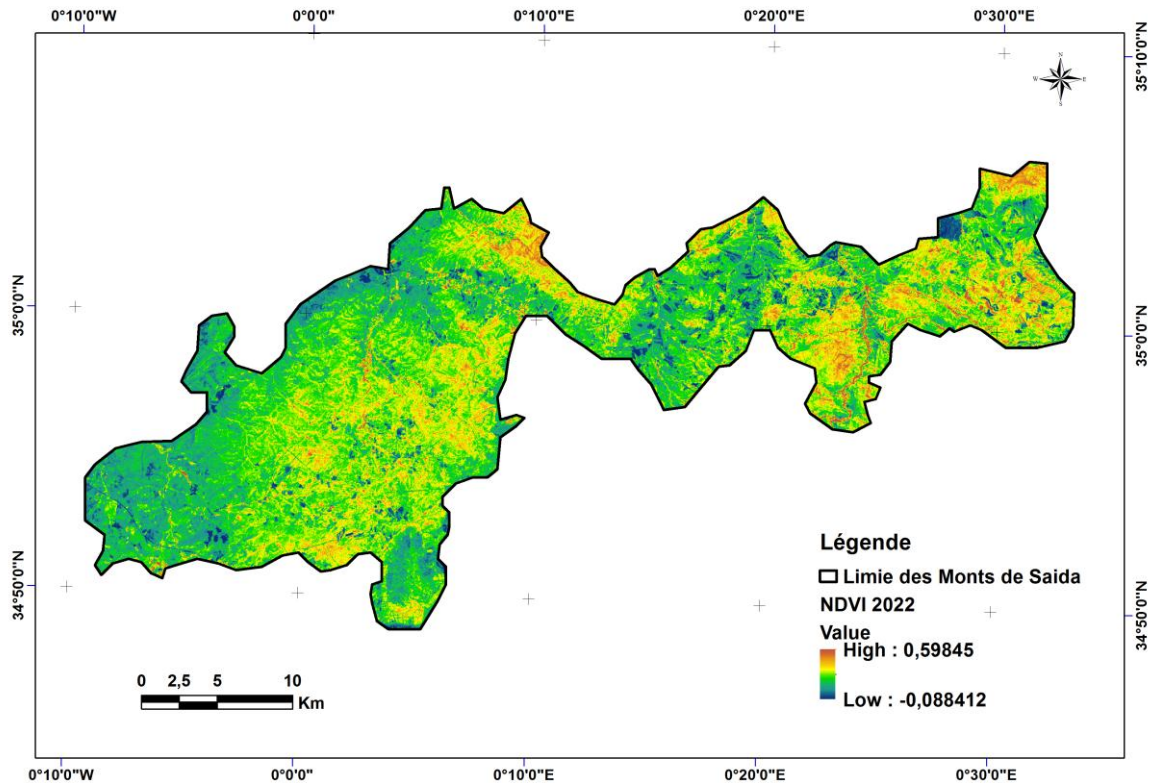
Carte n° 10 : Composition fausse colore des monts de saida (11/04/2011)



Carte n°11 : Composition fausse colore des monts de saïda (27/05/2022)



Carte n°12 : ENDVI 2011



Carte n°13 : ENDVI 2022

IV.4 Résultat

IV.4.1 L'analyse de l'évolution de l'occupation de sol des monts de Saida:

L'analyse de l'évolution de l'occupation du sol passe la présentation de la carte de 2011 et de celle de 2022 ainsi que de leurs statistiques respectives. Un croisement des deux cartes d'occupation du sol du Bassin Versant Centre de 2011 et de 2022 donnera une carte des changements et une matrice qui traduira l'évolution des différentes classes entre ces deux dates.

IV.4.1.1 L'état d'occupation de sol en 2011 :

À cette date, l'occupation du sol est dominée par les zones de végétation spontanée . Au total, les thèmes se répartissent ainsi :

Forets : couvrent une superficie de 8384.76 hectares, soit 11 % de la superficie du région des monts de saida

Matorral : :couvre une superficie de 14650.65 hectares, soit 20% de la superficie du région du monts de saida

Maquis : couvrent une superficie de 11109.1 hectares, soit 15 % de la superficie du région du monts de saida .

Culture : couvre une superficie de 7654.1 hectares, soit 10 % de la superficie du région du monts de saida

Parcoure : nu couvre une superficie de 6507.81 hectares, soit 9% de la superficie du région du monts de saida

Sol Nu: couvre une superficie de 11911.32 hectares, soit 16% de la superficie du région du monts de saida

L'eau :couvre une superficie de 10910.16 hectares, soit 15% de la superficie du région du monts de saida

Urbain : couvre une superficie de 2363.04 hectares, soit de 4% de la superficie du region du monts de saida

Tableau n14 : les surfaces d'occupation de sol des monts de saida en 11/04/2011

CLASS_NAME	Surface(ha)	POURCENTAGE
Forets	8384.76	11%
Matorral	14650.65	20%
Maquis	11109.1	15%
Culture	7654.1	10%
Parcoure	6507.81	9%
Sol Nu	11911.32	16%
L'eau	10910.16	15%
Urbain	2363.04	4%
	73490.94	

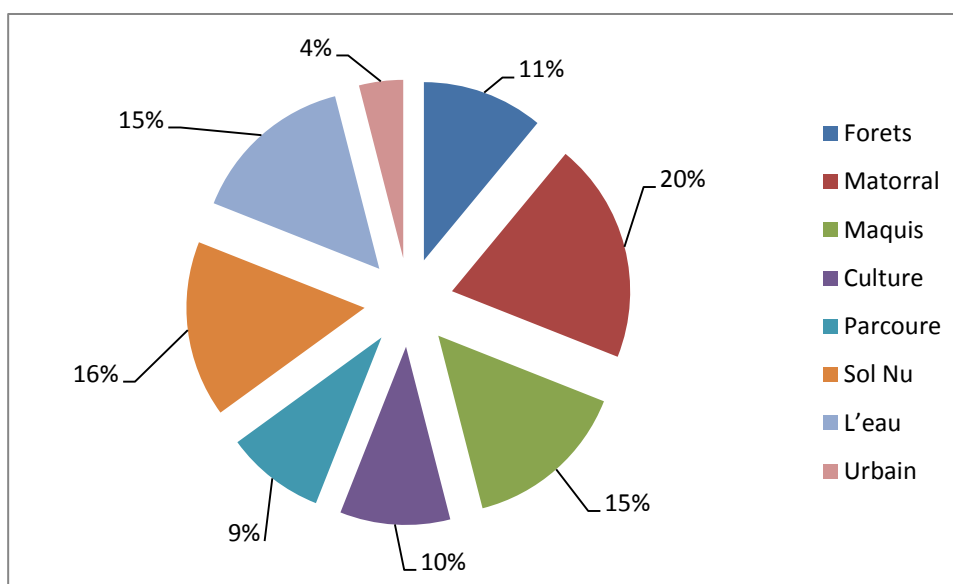
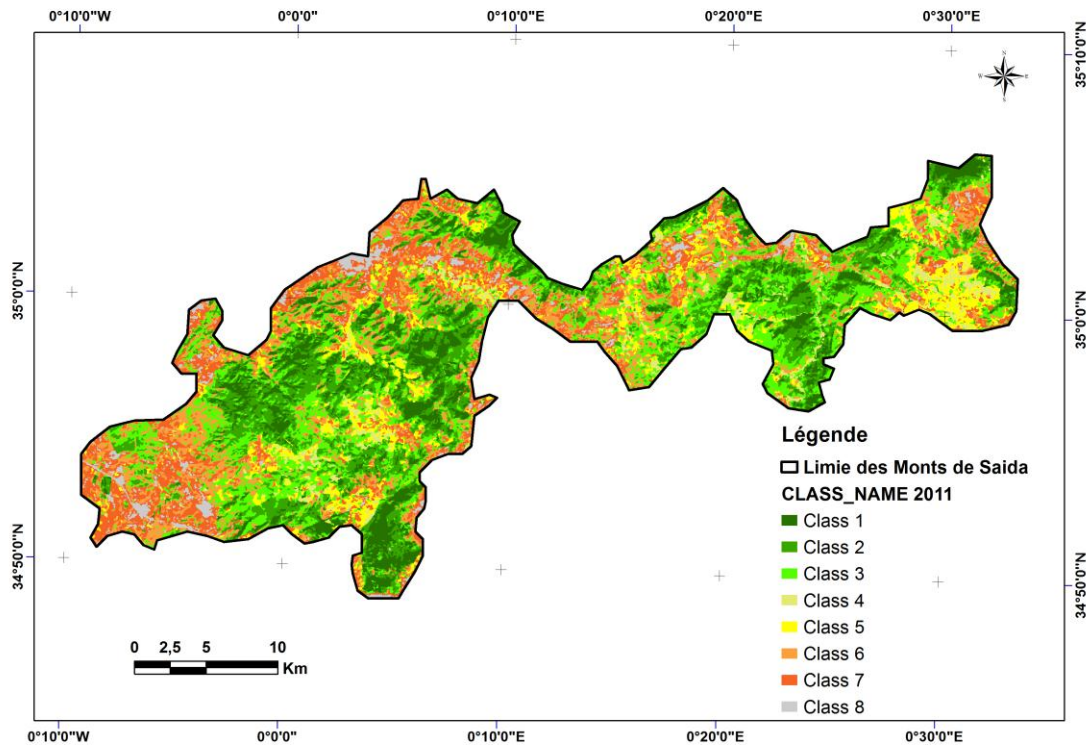


Figure n15 : Représentation en camembert des surfaces d'occupation des sols dans les zones d'étude en 11/04/2011



Carte n 14: carte d'occupation de sol en 11/04/2011

VI.4.1.2 L'état de l'occupation de sol en 2022 :

En ce qui concerne l'état de l'occupation du sol en 2022. Au total, les thèmes se répartissent :

Forêts : couvrent une superficie de 7797.51 hectares, soit 10 % de la superficie du région du monts de saida .

Matorral :couvre une superficie de 10508.67 hectares, soit 14% de la superficie du région du monts de saida .

Maquis : couvrent une superficie de 12874.41 hectares, soit 18 % de la superficie du région du monts de saida

Culture : couvre une superficie de 8880.93 hectares, soit 12 % de la superficie du région des monts de saida

Parcours :couvre une superficie de 7065.45 hectares, soit 10% de la superficie du région du monts de saida

Sol Nu : couvre une superficie de 13.98.06 hectares, soit 18% de la superficie du région du monts de saida

L'eau :couvre une superficie de 10102.14 hectares, soit 14% de la superficie du région du monts de saida

Urbain : couvre une superficie de 3162.33 hectares, soit 4% de la superficie du région des monts de saida.

Tableau n15 : les surfaces de l'occupation de sol dans la zone d'étude en 27/05/2022

CLASS_NAME	Surface(ha)	POURCENTAGE
Forets	7797.51	10%
Matorral	10508.67	14%
Maquis	12874.41	18%
Culture	8880.93	12%
Parcoure	7065.45	10%
Sol Nu	13098.06	18%
L'eau	10102.14	14%
Urbain	3162.33	4%
	73489.5	

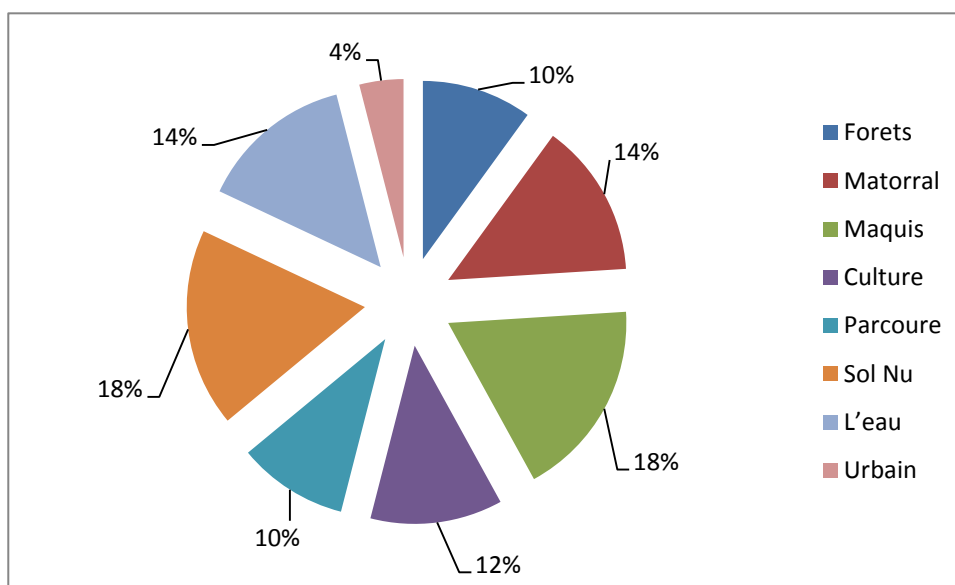
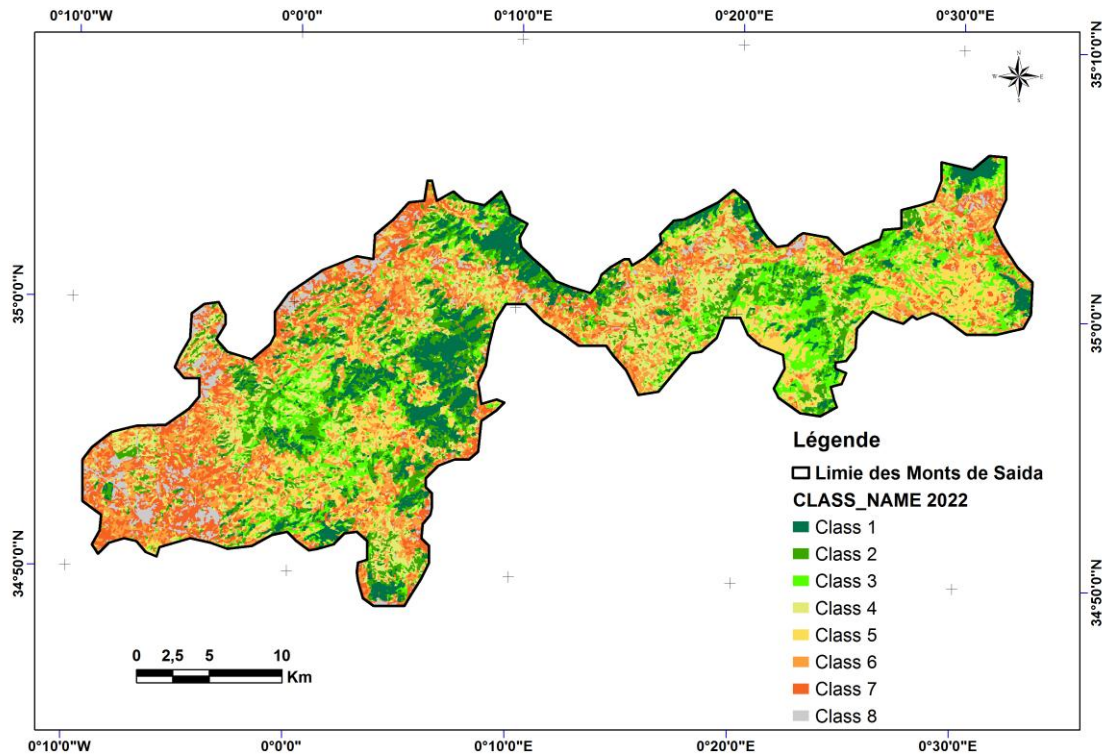


Figure n 16 : Représentation en camembert d'occupation de sol dans la zone d'étude en 27/05/2022



Carte n15 : l'occupation de sol en 27/05/2022

VI.4.2 Changement d'occupation de sol entre 2011 et 2022:

La matrice des changements générée par le croisement des cartes d'occupation du sol de 2011 et de 2022 de les monts de saida montre une évolution au niveau des différentes unités d'occupation du sol.

Globalement, comme nous le montre la carte des changements 94 % de la région n'ont pas subi de changements, ce qui correspond à une superficie de 69112.6049 ha sur une surface totale de 73457.5948 ha. À cela, s'ajoutent une superficie de 4344.9899 ha qui a modifie soit de changement régressive d'une superficie 1237.3981 ha (2%) et de changement progressivement d'une superficie 3107.5918 ha (4%)

Tableau n 16 : représente les changements d'occupation de sol entre 2011 et 2022

Changement régressive	1237.3981
Changement progressive	3107.5918
Aucun changement	69112.6049

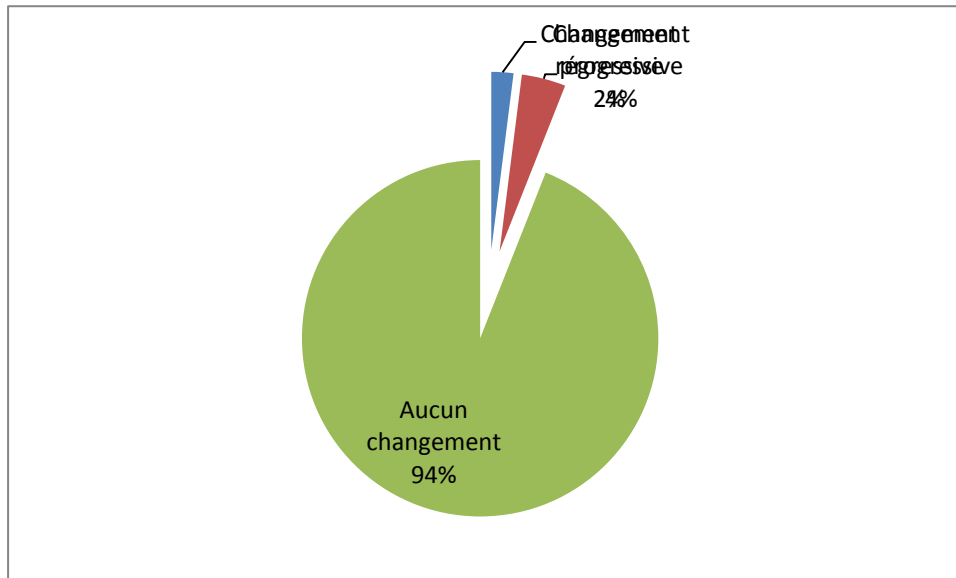
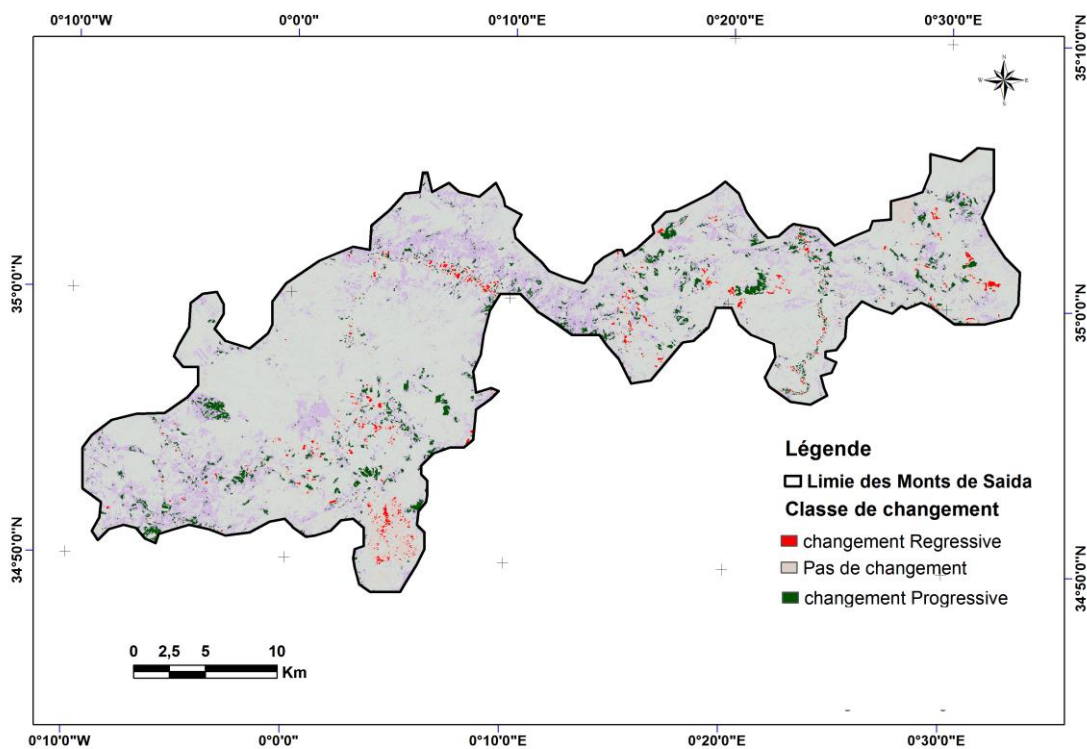


Figure n 17 : représentation en camembert de changement d'occupation de sol entre 2011 et 2022



Carte n 16 : carte représente les changements d'occupation de sol entre 2011 et 2022

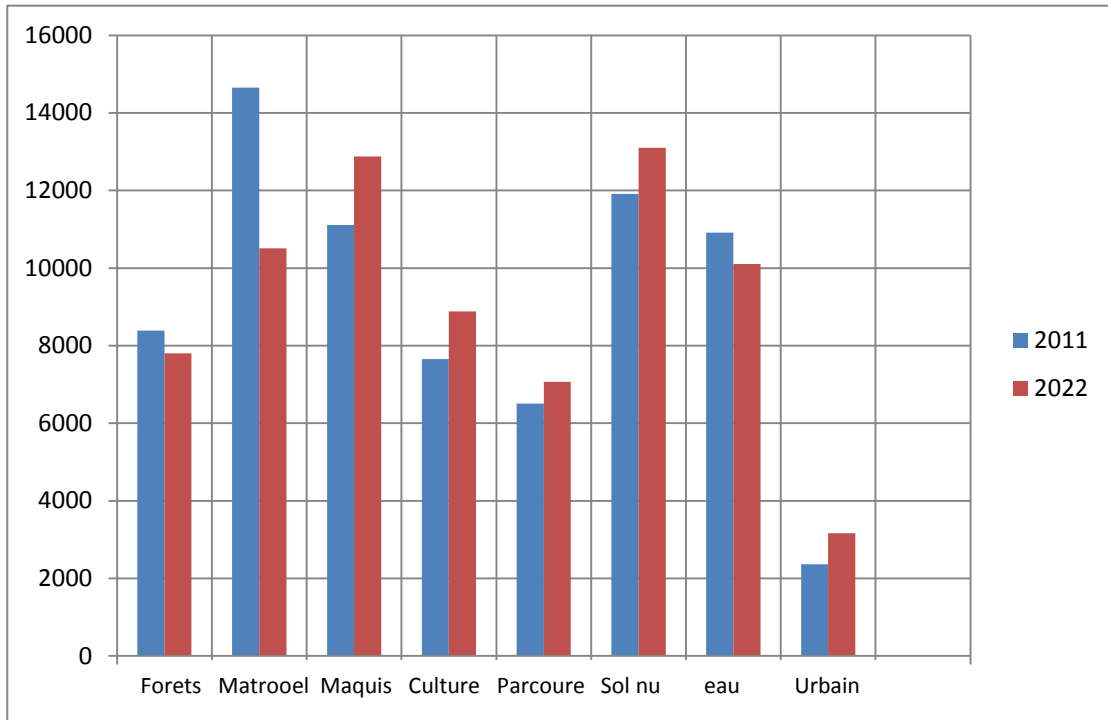


Figure n 18 : Histogramme représente les changements d'occupation de sol entre 2011 et 2022

A partir de l’histogramme d’occupation du sol , on peut recenser principales occupations des sols des monts de saida :

La progression des surfaces cultivées au cours de ces années se justifie par augmentation de la superficie. l’essentiel des terres agricoles dans les monts de saida est localise principalement au alentours des centres urbains . Le secteur de l’agriculture est développe a cause de répondre aux besoins d’une population croissante en raison de la croissance démographique.

La régression des surfaces des forets au cours des années justifie par une perte d’une superficie estimée 1237.3981 (ha) a cause de les incendie , dégradation de sol des exploitation des forets en terres agricolesetc.

Conclusion Générale

Conclusion général

L'apport de la télédétection dans l'étude d'occupation du sol est devenu indéniable : les progrès techniques font que nous pouvons voir toujours plus d'information des images satellites, et ce fut ici l'avantage pour étudier le changement de l'occupation du sol des monts de saida. Mais l'étude du changement en télédétection serait délicate sans l'apport des systèmes d'information géographique nécessaires aux différents traitements post-classification et à la mise en forme des données en vue d'une bonne visualisation, ils nous ont de plus permis certains traitements d'analyse spatiale.

La décision a été pour cette étude de savoir en première concept essentiel dans la télédétection et les outils ainsi que les différentes méthodes de detection de changements d'occupation de sol. Sans oublier étude physico-géographique des monts de saida ont qui doit me permettre d'avoir acquérir les données principales de cette zone. Finalement la méthodologie adaptée pour l'extraction du changement d'occupation de sol, qui pourrait alors être éventuellement utilisée sur une série temporelle de 2011 au 2022. Nous l'avons vu en discussions, la méthode de classification non supervises ISODATA a été fais satisfaisante, même si elle reste une des plusieurs méthodes adaptes aux images satellitaires aux différentes résolutions spatiale.

La cartographie de l'occupation du sol entre 2011 et 2022 dans les monts des saida ont révélé quelques modifications :

un changement progressive et accroissement des surfaces des cultures au cours des années grâce a exploitation et transformation les surfaces a terres agricoles un changement régressive et décroissement les surfaces des forêts au cours des années , c'est les conséquences des incendies , dégradation des terres , expansion de l'agriculture, extraction des bois , extension des infrastructures en plus a facteurs sous-jacentes comme les facteurs démographiques et économiques qui n'agissent pas directement sur la couvertes forestier.....etc. Un changement régressive au sol nu au cours des années a cause de érosion et dégradation de sol et changement climatique et l'absence de couverture végétale qui considérer comme une barrière contre régression des sol.

Référence Bibliographie

Références bibliographique

1. ABUELGASIM, A., W. D. ROSS, 1993 Change detection using adaptive fuzzy « Remonte sensing f environnement, 70, no, 2, pp 208-223.
2. aegelow, M., Villa, N., Cornez, L., Ferraty, F., Ferré, L. et Sarda, P. (2004). Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne. Cybergeog : European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques. n°295, 20 p. [en ligne] <http://cybergeog.revues.org/2811> (dernière visite : 03/12/2013).
3. Akono, A. L. A. I. N., Tankam, N. T., & Tonye, E. (2005). Nouvel algorithme d'évaluation de texture d'ordre n sur la classification de l'occupation des sols de la region volcanique du mont Cameroun. Teledetection, 5(1). P227-244.
4. Béguin, M. et Pumain, D. (2009). La représentation des données géographiques : Statistique et cartographie. Paris, Armand Colin, 192 p.
5. Bille J. C., 1977. « Étude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien ». Travaux et Doc. ORSTOM, n° 65, 82 p., 1 carte hors texte, Paris.
6. Caloz R. et Collet C., 2001. Traitements numériques d'images de télédétection. Précis de Télédétection, vol. 3, Presses de l'Université du Québec/AUF, 386 p.
7. COPPIN, P., ET M.BAUER, 1997 « Change detection in forest ecosysteme with remote sensing digitale imagery » Remonte sensing revieux vol. 13, pp 207-234.
8. Coquillard, P. et Hill, D. (1997). Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets. Masson, 2 : 100-124.
9. CSE., ROSELT/OSS., 2002. Synthèse des études diagnostiques des sites de l'observatoire du Ferlo. Dakar, 10 p
6. Caloz R. et Collet C., 2001. Traitements numériques d'images de télédétection. Précis de Télédétection, vol. 3, Presses de l'Université du Québec/AUF, 386 p.
7. COPPIN, P., ET M.BAUER, 1997 « Change detection in forest ecosysteme with remote sensing digitale imagery » Remonte sensing revieux vol. 13, pp 207-234.
8. Coquillard, P. et Hill, D. (1997). Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets. Masson, 2 : 100-124.
9. CSE., ROSELT/OSS., 2002. Synthèse des études diagnostiques des sites de l'observatoire du Ferlo. Dakar, 10 p
10. Di Gregorio A. and Jansen L.J.M., 2000, "Land Cover Classification System: Classification Concepts And User Manual", FAO, Rome. (www.fao.org)

11. Eastman, J. R. (2006). IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing. Worcester, Clark University, 457 p.
12. Foody G.M., 2002, "Status of land cover classification accuracy assessment", *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, p. 185-201.
13. Girard M C., Girard C M., 1999, « La télédétection appliquée, zones tropicales et intertropicales », Dunod, Ed. Paris, 529 pages plus CD Rom.
14. Girard, M. C. et Girard, C. M. (1999). *Traitement des données de télédétection*. Dunod, Paris, 529 p.
15. Jahne, B. (1991) *Digital Image Processing*, New-York : SpringerVerlag, 383 p.
16. JENSEN, J, R, 1996 « introductory digital image processing .
17. LE HOUEROU H N., 1989, *The grazing land ecosystems of the African Sahel*, SpringerVerlag, Berlin, 282 p.
18. Lebarbier, E., & Mary-Huard, T. (2008). *Classification non supervisée*.
19. Leprun J. C., 1971, « Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du Ferlo nord occidental (Sénégal) », *Ass. Sénégal, Et. Quaternaires ouest africaines, Bull. Liaison, Sénégal*, n° 31, p. 69-78.
20. Maestriperri, N. (2012). *Dynamiques spatio-temporelles des plantations forestières industrielles dans le sud chilien. De l'analyse diachronique à la modélisation prospective*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 2 Le Mirail, Toulouse, France. 357 p.
21. Maignien R., 1965, « Carte pédologique du Sénégal au 1/1.000.000 », *ORSTOM Paris, Sér. Notices et cartes*, n° 24, 63 p., 1 carte.
22. Major D. J., Baret F., Guyot G., 1990, "A ratio vegetation index adjusted for soil brightness", *International Journal of Remote Sensing*, vol. n° 5, p. 727-740.
23. *Manuel de Télédétection Spatiale TELCAN*, 2013
24. Michel P., 1973, « Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie », *Étude géomorphologique, thèse d'État*. Strasbourg (1970). *Mémoire ORSTOM, Paris*, n° 63, 3 tomes, 752 p, cartes h. t.
25. Michel P., 1985, « Sécheresse et transformation de la morphodynamique dans la vallée et dans le delta du Sénégal », *Revue géomorphologique*, n° 4 – TXXXIV.
26. Midekor, A., Wellen, J. *Initiation à ENVI Octobre 2013 Ouagadougou, Burkina Faso*
27. Midekor, A., Wellen, J. *Initiation à ENVI Octobre 2013 Ouagadougou, Burkina Faso*
28. N'diaye P., 1980. « Végétation et faune" », *Atlas du Sénégal*, ed. Jeune Afrique, p. 18-
19. 29. Nizinski J., Morand D., Fournier C., 1992, « Le rôle du couvert ligneux sur le bilan

hydrique d'une steppe (nord du Sénégal) », Cah. Orstom, sér. Pédologique, vol. XXVII, n° 2, 225- 236.

30. Ouattara T., Dubois J.M., Gwyn J., 2006, « Méthodes de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multi-sources et de l'indice de végétation TSAVI », Télédétection, vol. 6, n° 4, p. 291-304.

31. Pickup G., and Marks A., 2000, "Identifying large-scale erosion and deposition processes from air-borne gamma radiometrics and digital elevation models in a weathered landscape", Earth Surface Processes and Landforms, vol. 25, p. 535-557.

32. Robin M., 2002, Télédétection, Des satellites au SIG. Une analyse complète du processus de création d'un type essentiel d'information géographique. Nathan Université. 318 p.

33. Robin, M. (1995). La télédétection. Nathan, Paris, France. 318 p.

34. Sarr M.A., 2009, Évolution récente du climat et de la végétation au Sénégal (cas du Ferlo), thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3, LCRE UMR 5600 CNRS, 410 p.

35. Soares-Filho, B. S., Pennachin, C. L. et Cerqueira, G. (2002). DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. Ecological Modelling, 154 (3) : 217-235.

36. Verburg, P. H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V. et Sharifah Mastura, S. A. (2002). Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: the CLUE-S Model. Environmental Management, 30 (3) : 391-405.

37. Verburg, P. H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V. et Sharifah Mastura, S. A. (2002). Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: the CLUE-S Model. Environmental Management, 30 (3) : 391-405.

38. Wiederkehr, E. (2013). Apports de la géomatique pour une caractérisation physique multiéchelle des réseaux hydrographiques : Élaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône. Thèse de doctorat, Université de Lyon, Lyon, France. 287 p

Site internet :

1. Harris Geospatial Solutions (www.harrisgeospatial.com)
2. https://www.academia.edu/3748544/Cours_T%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection
3. <http://www.universalis.fr/encyclopedie/teledetection/>
4. [https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/TELEDETECTION/document/cours_tel ed et ection/AUTRESAT.htm](https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/TELEDETECTION/document/cours_tel_ed_et_ecton/AUTRESAT.htm)