

THÈSE

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

Présenté par : ZAOUI Larbi

Intitulé

Apports de la Télédétection Satellitaire dans le Suivi de l'évolution
Spatio-Temporelle des sables dunaires

Faculté : *Physique*
Département : *Génie physique*
Spécialité : *Génie physique*
Option : *Rayonnement et matière*

Devant le Jury Composé de :

| <i>Membres de Jury</i> | <i>Grade</i> | <i>Qualité</i> | <i>Domiciliation</i> |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|
| Mr BELKAID Mohammed Nouredine | <i>Professeur</i> | <i>Président</i> | <i>USTO – MB</i> |
| Mr HASSINI Abdelatif | <i>Professeur</i> | <i>Encadrant</i> | <i>Univ-Oran2 Moh Ben Ahmed</i> |
| Mr BENABADJI Nouredine | <i>Professeur</i> | <i>Examineurs</i> | <i>USTO – MB</i> |
| Mr HADDOUCHE Driss | <i>Professeur</i> | | <i>Univ-Tlemcen</i> |
| Mr HAMIMED Abderrahmane | <i>MCA</i> | <i>Examineur</i> | <i>Univ-Mascara</i> |
| Mr BELBACHIR Ahmed Hafid | <i>Professeur</i> | <i>invité</i> | <i>USTO – MB</i> |



Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements

Année Universitaire : 2018-2019

Remerciements

Au terme de ce travail et à travers ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Je tiens à remercier tous particulièrement mes directeurs de thèse ; monsieur ABDELATIF Hassini, Professeur à d'Oran-2 Mohammed BEN AHMED, qui a bien voulu diriger ce travail, en me faisant profiter de son expérience et surtout de ses connaissances, ses conseils et remarques qui m'ont été très bénéfiques.

Qu'il me soit permis de témoigner ma profonde reconnaissance et ma très haute considération au président de jury: monsieur BELKAID Mohammed Nouredine, Professeur à l'université des science et des technologies MOHAMMED BOUDIAF, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence de mon jury de thèse.

Je voudrais également remercier, monsieur BELBACHIR Ahmed Hafid ,Professeur à l'université des science et des technologies MOHAMMED BOUDIAF, pour avoir bien voulu me faire l'honneur de faire partie de mon jury.

A monsieur monsieur BENABADJI Nouredine , Professeur à l'université des science et des technologies MOHAMMED BOUDIAF, pour avoir accepté de faire partie de mon jury et de juger ce travail.

A monsieur monsieur HADDOUCHE iDriss, Professeur à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté de faire partie de mon jury et de juger ce travail.

A monsieur HAMIMED Abderrahmane, Maître de conférence «A » à l'université de Mascara, pour avoir accepté de faire partie de mon jury et de juger ce travail.

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance, et mon profond respect.

Enfin, je témoigne toute ma reconnaissance, pour remercier les personnes des administrations (DSA et conservation des forêts) de la wilaya Béchar.

Dédicaces

Je dédie ce rapport de thèse à mes deux chers parents, qui n'ont jamais cessés de me soutenirMerci d'avoir toujours été là pour moi, que dieu vous protège et vous accorde une longue vie.

Je tiens à présenter mes reconnaissances et mes remerciements à ma femme qui m'a soutenu et supporté durant cette dernière période d'une manière indéfectible. Sans oublier mes deux enfants Wail et Hadil.

Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui me sont chères, ma grande famille en particulier mes frères et soeurs.

Je tiens également à remercier mes beaux-parents pour leur gentillesse. Sans oublier de remercier mes chers collègues du laboratoire LAAR, mes amis : Hammad et Omar.

Pour tous mes amis qui m'ont apporté leur soutien moral pendant ces années d'études, je les en remercie sincèrement.

Une Dédicacs spéciale

A la mémoire de mes grands-parents.

APPORTS DE LA TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE DANS LE SUIVI DE L'ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES SABLES DUNAIRES

Résumé :

La partie sud-ouest d'Algérie est aux prises avec un phénomène très répandu dans les pays limitrophes aux environnements sahariens et sahéliens. Il s'agit de la désertification et de l'ensablement. La menace constante de l'avancement du sable sur les oeuvres humaines dans ce secteur est bien présente si nous prenons en compte par exemple la destruction de 60 % d'un village par une tempête à la fin des années 1970. L'objectif de cette étude est de développer des méthodes capables d'identifier et de caractériser des changements affectant les surfaces des dunes à partir des données satellitales acquises à différentes dates LANDSAT (ETM2001,ETM+ 2006 et OLI8 2017). Elles donnent ainsi, la possibilité de cartographier, de catégoriser et de surveiller des zones affectées par des événements naturels survenus au cours du temps. L'étude de différence d'image basée sur l'exploitation d'un seul paramètre géophysique(NDSDI) a permis de caractériser la dynamique spatio-temporelle de l'état de la végétation de la région de Bechar.

Des efforts déployés pour lutter contre l'ensablement des routes et des surfaces (telles que : la reprise du vignoble, l'augmentation des cultures pérennes et la fixation des dunes) restent insuffisants. Comme, nous l'avons démontré au cours de notre recherche, l'avancée desables dans les milieux est aussi le résultat du comportement du vent, des propositions ont été formulées pour asseoir une vision globale dans les aménagements, qui doit tenir compte des aspects écologiques et socio- culturels

Mots clés : Télédétection, Spatio-Temporelle, Dunes, LANDSAT.

مساهمة الاستشعار عن بعد في رصد التطور الزمني و الكثبان الرملية المكانية لزحف

ملخص:

يعاني الجزء الجنوبي الغربي من الجزائر من ظاهرة واسعة الانتشار في البلدان المجاورة للبيئة الصحراوية و هو التصحر وزحف الكثبان الرملية. إن التهديد المستمر لتقدم الرمال على الأعمال البشرية في هذه المنطقة موجود إذا أخذنا في الاعتبار ، على سبيل المثال ، تدمير 60% من قرية بسبب عاصفة في أواخر السبعينيات. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير طرق قادرة على تحديد وتوصيف التغيرات في أسطح الكثبان من البيانات الساتلية المكتسبة في تواريخ LANDSAT المختلفة ETM2001 , ETM + 2006 و OLI8 2017 و أنها توفر القدرة على رسم الخرائط وتصنيف ورصد المناطق المتضررة من الأحداث الطبيعية التي وقعت على مر الزمن. إن دراسة اختلاف الصور المستندة إلى استغلال معلمة جيوفيزيائية واحدة (NDSDI) جعلت من الممكن وصف الديناميات المكانية والزمانية لحالة الغطاء النباتي في منطقة بشار ولا تزال الجهود المبذولة لمكافحة طمر الطرق والأسطح (مثل: استعادة الكرم ، وزيادة المحاصيل المعمرة ، وتثبيت الكثبان الرملية) غير كافية. وكما أظهرنا أثناء بحثنا ، فإن النهوض بالصحاري في البيئات هو أيضًا نتيجة لسلوك الرياح ، وقد صيغت المقترحات لإنشاء رؤية عالمية في التنمية ، والتي يجب أن تأخذ في الاعتبار الجوانب الإيكولوجية والاجتماعية والثقافية

الكلمات المفتاحية : الإستشعار عن بعد , الزمني المكاني , لاندسات, الكثبان الرملية.

CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING IN MONITORING SPATIO-TEMPORAL EVOLUTION OF THE DUNE SAND

Abstract :

The southwestern part of Algeria is struggling with a widespread phenomenon in countries bordering the Saharan and Saharan environments. This is desertification and silting. The constant threat of the advancement of sand on human works in this area is present if we take into account, for example, the destruction of 60% of a village by a storm in the late 1970s. The aim of the study is to develop methods capable of identifying and characterizing changes in dune surfaces from satellite data acquired at different LANDSAT dates (ETM2001, ETM + 2006 and OLI8 2017). They provide the ability to map, categorize and monitor areas affected by natural events that have occurred over time. The image difference study based on the exploitation of a single geophysical parameter (NDSDI) made it possible to characterize the spatio-temporal dynamics of the vegetation state of the Bechar region.

Efforts to combat the silting of roads and surfaces (such as: the recovery of the vineyard, the increase of perennial crops and the fixing of dunes) remain insufficient. As we have shown during our research, the advancement of deserts in environments is also the result of wind behavior, proposals have been formulated to establish a global vision in the development, which must take into account ecological aspects. and sociocultural

Keywords: remote sensing, Spatiotemporal, LANDSAT, Dunes.

TABLE DES MATIERES

| | |
|-----------------------------------|--|
| REMERCIEMENTS | |
| RESUME | |
| ABSTRACT | |
| TABLE DES MATIERES | |
| LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX | |
| ACRONYMS | |

Chapitre I Introduction Générale

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction..... | 1 |
| I.2 Contexte | 1 |
| I.3 Distinction des zones arides | 2 |
| I.4 Problématiques et état actuel de la recherche | 4 |
| I.5 Objectif de l'étude | 5 |
| I.6 Travaux en télédétection et les déserts | 6 |
| I.7 Organisation de la thèse | 7 |
| I.8 Présentation de la zone d'étude | 8 |
| I.8.1 Présentation du cadre de l'étude : La wilaya de Béchar | 8 |
| I.9 Références | 10 |

Chapitre II Aperçu sur la télédétection et sable dunaire

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction..... | 12 |
| II.2 Physique de l'atmosphère, télédétection et géophysique spatiale | 12 |
| II.2.1 Définitions..... | 12 |
| II.2.2 Quelques bases physiques | 13 |
| II.2.3 Le rayonnement électromagnétique | 13 |
| II.2.4 Le spectre du rayonnement électromagnétique | 13 |
| II.2.5 Propriétés des ondes électromagnétiques | 14 |
| II.3 Résolutions | 15 |
| II.3.1 Résolution spatiale | 15 |
| II.3.2 Résolution temporelle | 16 |
| II.3.3 Résolution spectrale | 16 |
| II.3.4 Résolution radiométrique | 16 |
| II.4 Notion de l'image satellite | 16 |
| II.5 Reflectance Spectrale | 17 |
| II.6 Apport de la télédétection | 19 |

| | |
|--|----|
| II.7 Intérêt des images satellitaires dans l'étude d'avancement du sable | 19 |
| II.8 Comprendre l'ensablement | 21 |
| II.8.1 Erosion éolienne | 21 |
| II.8.2 La violence du vent | 22 |
| II.8.3 Les mécanismes des mouvements globaux | 23 |
| II.8.4 L'état de la végétation | 24 |
| II.8.5 La nature et l'état du sol | 24 |
| II.8.6 Origine du sable | 25 |
| II.9 Effets de l'érosion éolienne | 25 |
| II.9.1 Sur le sol | 25 |
| II.9.2 Sur la végétation | 25 |
| II.10 Accumulations éoliennes | 26 |
| II.10.1 Les voiles éoliens | 26 |
| II.10.2 Les nebkas | 26 |
| II.10.3 Les barkhanes | 27 |
| II.10.4 Les dunes linéaires ou sifs | 28 |
| II.10.5 Les aklés | 29 |
| II.10.6 Les ergs | 30 |
| II.10 Conclusion | 30 |
| II.10 Références | 31 |

Chapitre III : Approche pour la modélisation spatio-temporelle

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction | 33 |
| III.2 Le temps et l'espace | 33 |
| III.2.1 Le temps | 33 |
| III.2.1.1 Définitions | 33 |
| III.2.1.2 Mesurer le temps les systèmes informatique | 36 |
| III.2.2 L'espace | 40 |
| III.2.2.1 Définitions | 40 |
| III.2.2.2 Représentation quantitative de l'espace dans les systèmes informatiques | 43 |
| III.2.2.2.1 Capturer une position | 44 |
| III.2.2.2.2 Mesurer des distances | 45 |
| III.2.2.3 Représenter des formes | 47 |
| III.3 Mettre en correspondance le temps et l'espace | 49 |

| | |
|--|----|
| III.3.1 Des modèles pour enregistrer les changements | 52 |
| III.3.2. Datation du support de collecte | 52 |
| III.3.3 Définition d'un support stable dans le temps | 53 |
| III.4 Conclusion | 56 |
| III.5 Références | 57 |

Chapitre IV : Résultats et discussion

| | |
|--|----|
| IV .1 Introduction | 61 |
| IV.2 Les problèmes engendrés par l'évolution des dunes | 61 |
| IV.3 Revue des méthodes existantes | 62 |
| IV.2.1 Méthodes algébriques | 62 |
| IV 2.2 Méthodes de transformation | 62 |
| IV 2.3 Méthodes de classification | 63 |
| IV 2.4 Autres méthodes | 63 |
| IV 2.4.1 Differencing d'image | 63 |
| IV 2.4.2 Analyse de vecteur de changement | 65 |
| IV 2.4.3 Analyse de données multidates | 66 |
| IV 2.4.4 Les méthodes avancées | 66 |
| IV 2.4.5 Détection de changement orientée objet | 67 |
| IV 2.4.5.1 Définition | 67 |
| IV 2.4.5.2 Introduction et problématiques de la détection de changement orientée objet | 67 |
| IV.2.4.5.3 Le décalage multi-temporel | 68 |
| IV.2.4.5.4 Le problème de Sylver Polygons | 68 |
| IV.2.4.5.5 Le manque de correspondance entre objet et entité géographique | 69 |
| IV.3 Les déserts, la détection de changement et les dunes | 70 |
| IV.4 Methodologie | 70 |
| IV.4.1 La technique de détection du changement | 72 |
| IV.4.1.1 Application de détection de changement | 73 |
| IV.4.1.2 Différente étapes de détection de changement | 73 |
| IV.4.1.3 Les exigences de l'analyse multi-temporelle | 74 |
| IV.4.2 Description des logiciels utilisés dans ce travail | 74 |
| IV.4.3 Images satellitaires utilisées | 74 |
| IV.4.3.1 Caractéristiques spatiales et spectrales des images satellitaires | 75 |
| IV.4.3.2 Correction géométrique et radiométrique des images | 76 |

| | |
|--|-----|
| IV.5 Normalized Differential Sand Dune Index (NDSDI)..... | 76 |
| IV.5.1 Interprétation des résultats du NDSDI | 77 |
| IV.5.1.1 Normalized Differential Sand Dune Index de l'image satellitaire landsat de 2001 | 77 |
| IV.5.1.2 Normalized Differential Sand Dune Index de l'image satellitaire landsat de 2006 | 78 |
| IV.5.1.3 Normalized Differential Sand Dune Index de l'image satellitaire landsat de 2017 | 78 |
| IV.6 Extraction des Endmemebres | 79 |
| IV.7 L'indice de changement diachronique | 81 |
| IV.7.1 Indices de changement entre 2001 et 2006 | 82 |
| IV.7.2 Indices de changement entre 2006 et 2017 | 83 |
| IV.8 Représentation et Interprétation des résultats | 84 |
| IV.8.1 Analyse statistique des histogrammes des images | 84 |
| IV.8.2 Les histogrammes de fréquence | 85 |
| IV.9 La validation par la matrice de changement | 86 |
| IV.9.1 Interprétation des résultats de la matrice des changements | 86 |
| IV.10 Principales techniques de fixation des dunes | 87 |
| IV10.1 La fixation mécanique des dunes (les palissades) | 88 |
| IV 10.2 Fixation biologique | 89 |
| IV.10.3 La technique des pierres à turbulence | 89 |
| IV.10.4 Coûts des principales techniques de lutte contre l'érosion éolienne | 90 |
| IV.11 Références | 91 |
| Conclusion Générale et Perspectives | |
| BIBLIOGRAPHIE | 101 |
| ANNEXES | |
| A : Normalized Differential Sand Dune Index (NDSDI)..... | 103 |
| B : La matrice de changement | 105 |
| C : Les publications de l'auteur | 106 |

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Introduction Générale

| | |
|---|---|
| Figure I-1 : Distribution des zones arides | 2 |
| Figure I.2 : Wilayas limitrophes de la wilaya de Bechar | 8 |
| Figure I.3 : Localisation de la zone d'étude | 9 |

Chapitre II : Aperçu sur la télédétection et sable dunaire

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : Le spectre électromagnétique | 13 |
| Figure II.2 : Caractéristiques d'une onde d'après [26] | 14 |
| Figure II.3 : Représentation d'une image satellite | 17 |
| Figure II.4 : Caractéristiques de la réflectance spectrale des matériaux communs de la surface du sol, dans le visible et le proche-moyen infrarouge | 18 |
| Figure II.5 : Vitesse du vent en fonction de l'altitude | 22 |
| Figure II.6 : Modes d'entraînement des particules par le vent | 24 |
| Figure II.7 : Nebkas | 26 |
| Figure II.8 : Barkhanes | 27 |
| Figure II.9 : Barkhanes isolées | 27 |
| Figure II.10 : Champ barkhanique ou barkhanes jointives | 27 |
| Figure II.11 : Dunes linéaires | 29 |
| Figure II.12 : Aklés | 30 |

Chapitre III : Approche pour la modélisation spatio-temporelle

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Relations entre intervalles temporels | 35 |
| Figure III.2 : Différents niveaux de résolution pour mesurer la durée d'un intervalle temporel | 37 |
| Figure III.3 : Les fuseaux horaires et le temps UTC. | 38 |
| Figure III.4 : Système de coordonnées géographiques pour localiser un lieu | 44 |
| Figure III.5 : Système de coordonnées géographiques pour localiser un lieu. | 47 |
| Figure III.6 : Division de l'espace suivant une projection et suivant des secteurs angulaires, d'après[43]. | 49 |
| Figure III.7 : Triade de spatio-temporelle simple [70], puis complétée [44]. | 51 |
| Figure III.8 : Superposition de couches géographiques dans le temps - Illustration avec des données d'occupation du sol. | 53 |
| Figure III.9 : Utilisation du modèle Space-Time Composite pour des changements d'occupation du sol. | |
| Figure III.10 : Adaptation du modèle Space-Time Composite intégrant la couche historique pour des changements d'occupation du sol. | 55 |

Chapitre IV : Résultats et discussion

| | |
|---|----|
| Figure IV. 1 : Etablissement des seuils pour déterminer les changements. | 64 |
| Figure IV.2 : Analyse de vecteur de changement (D'après [99]) | 65 |
| Figure IV.3 : Segmentation d'une image en objets | 67 |
| Figure IV.4 : Les objets extraits à la date 1 (a) et à la date 2 (b) sont décalés (c) à cause d'un mauvais recalage | 68 |
| Figure IV.5 : Schéma Sylver Polygons | 69 |
| Figure IV.6 : Arborescence du traitement des images satellitaires | 72 |

| | |
|---|----|
| Figure IV.7 : Image satellitaire de l'indice (NDSDI) du 13-mars-2001 | 77 |
| Figure IV.8 : Image satellitaire de l'indice NDSDI du 13-Mars-2006 | 78 |
| Figure IV.9: Image satellitaire de l'indice (NDSDI) du 17-Mars-2017 | 78 |
| Figure IV.10 : Scatters plots des deux PC's, location des Endmembers pour chaque année | 80 |
| Figure IV.11 : La réflectance des Endmembers pour chaque année | 80 |
| Figure IV.12 : L'indice de changement entre 2001 et 2006 | 82 |
| Figure IV.13 : L'indice de changement entre 2006 et 2017 | 83 |
| Figure IV.14 : Histogramme de l'image de la zone d'étude des années 2001,2006 et 2017 | 85 |
| Figure IV.15 : Histogrammes de fréquence des différents échantillons. | 85 |
| Figure IV.16 : Rehaussement de la palissade après accumulation des dépôts de sables FAO 1988 | 88 |
| Figure IV.17 : Technique De Pierre A Turbulence Utilisée dans le sud Marocain d'après B.BENSALEM, 1983 | 90 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau IV.1 : Classification des méthodes de changements | 70 |
| Tableau IV.2 : Principales caractéristiques des images satellitaires Landsat. | 75 |
| Tableau IV.3 : Les valeurs de l' NDSDI pour des différents types de couverture | 77 |
| Tableau IV.4 : Données départementales de changement de l'utilisation des sols pour entre 2001 et 2017 | 84 |
| Tableau IV.5 : La matrice de changements | 86 |
| Tableau IV.6 : Les coûts des techniques de lutte contre l'érosion éolienne | 90 |

NOMENCLATURE

LISTE DES SYMBOLES

E : Champ électrique

B : Induction magnétique

C : Direction de propagation

I_0 : Intensité

λ : Longueur d'onde

ν : Fréquence

σ : Nombre d'onde

q : Quantité d'énergie

h : Constante de Planck

PN : Valeur normalisée du pixel

P_{ij} : Valeur originale du pixel dans l'image à normaliser

μ_r : Moyenne et écart type de l'image de référence

σ_p : Moyenne et écart-type de l'image à normaliser

ACRONYMES

REM : Rayonnement

TAI : Temps Atomique International

EPSG : European Petroleum Survey Group

OGC : Open Geospatial Consortium

SGBD : Système de Gestion de Base de Données

ESRI : Environmental Systems Research Institute

EEA : European Environmental Agency

PPCD-Spatial : Plus Petit Commun Dénominateur Spatial

ACP : Analyse en composantes principales

OBCD : Object-Based Changed Detection

MAB : Programme intergouvernemental sur l'homme et la biosphère

P : Proposition

t : Instants distincts

UML : Unified Modeling Language

UTC : Temps Universel Coordonné

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

SIG : Système d'information géographique

IGN : Imagine Games Network

SAR : Synthetic Aperture Radar

ACP : Analyse de composante principale

CCT : Centre canadien de télédétection

ENVI : Environnement pour la visualisation des images

GPS : Global Positioning System

Ha : Hectare

LANDSAT : Land satellite

Max : Maximum

Min : Minimum

NDSDI : Normalized Differential Sand Dune Index

PIR : Proche infrarouge

RED : Rouge

SWIR2 : Shortwave Infrared

TM : Capteur Thematic Mapper

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus

OLI8 : Operational Land Imager 8

UTM : Universel transverse Mercator

WGS 84 : World geodesic system, revision de 1984

Chapitre I

Introduction générale

I.1 Introduction

Le sud-ouest d'Algérie, par ses particularités géo-climatiques, occupe une position singulière dans l'ensemble sahélien, durement frappé par les effets de la sécheresse des décennies 70 et 80. L'ensablement y est perçu comme une dégradation continue, parfois irréversible, du potentiel biologique productif, alors que certains auteurs ne sont pas encore convaincus de la sévérité de l'état de l'ensablement au Sahel.

La zone a fait l'objet de nombreuses études où plusieurs aspects géomorphologiques et environnementaux ont été abordés. Néanmoins, ces travaux ne prennent pas toujours en compte des nouvelles caractéristiques de la morphogenèse, sur un secteur qui a connu d'importantes mutations et qui, finalement, vu l'immensité du territoire, n'aura pas donné lieu à beaucoup d'exemples concrets.

I.2 Contexte

Les moyens satellitaires mis en place par les grandes nations et la communauté scientifique se sont considérablement développés lors de la deuxième moitié du XX^{me} siècle. Le mobile était entre autres de mesurer, de comprendre et d'étudier des phénomènes naturels indicateurs de l'évolution terrestre. Nous pouvons citer les mesures relatives à l'évolution de la température, de la concentration des gaz à effet de serre et notamment l'évolution des déserts.

À ce propos, les pays sahariens et sahéliens sont composés de régions arides et semi-arides, où très souvent le vent souffle. Les grains de sables arrachés par le vent se déposent un peu plus loin sous l'influence de leur poids. Ils vont se cumuler pour former des dunes dans le désert. Ces dunes, à leurs tours, vont se mettre à se déplacer, sous l'effet de tempêtes. Elles mettent en danger des villes et des villages environnants. La vie des hommes alors menacée par la destruction lente des terres cultivables. D'un point de vue mathématique, ces dunes manifestent un motif périodique (en terme de distribution spatiale). Leurs caractéristiques sont régulières dès que la zone aride est une surface suffisante pour accueillir un grand nombre de dunes.

La connaissance de déplacement de dunes de sable dans le désert a une importance capitale. En voici quelques unes :

- 1- Leur recul expose les populations aux alentours à des perpétuels déplacements créant ainsi des destructions de l'environnement.
- 2- Leur disparition fait craindre des tempêtes de sables assez mouvementées.
- 3- Ce sont des marqueurs très riches du climat passé et témoins de l'évolution terrestre.

L'accès difficile aux régions désertiques, la dangerosité du milieu et le coût des déplacements ont propulsé la télédétection comme un outil alternatif aux mesures in situ des endroits difficiles. Et dans ce contexte là, l'imagerie satellitaire appelée LANDSAT occupe une place importante.

I.3 Distinction des zones arides

Quand les zones arides sont évoquées, les premières images qui nous viennent à l'esprit pourraient être l'immense désert aux grandes dunes de sable sur lesquelles marchent une caravane de chameaux portant des marchandises aucune eau, aucune végétation, seulement une mer de sable s'agit, en effet, du décor de certains films ou de romans pour décrire le paysage de zone aride. Pourtant, le désert n'est qu'une forme extrême des zones arides, elles sont beaucoup plus complexes en terme de caractères topographiques et biophysiques que ce que l'on imagine de prime abord . Scientifiquement, qu'est ce qu'une zone aride ?

Selon le MAB (programme intergouvernemental sur l'homme et la biosphère) de l'UNESCO(1979), la délimitation des régions arides dans le monde se base principalement sur les indices d'aridité. Le degré d'aridité bioclimatique dépend des quantités relatives d'eau obtenues lors des précipitations et perdues par l'évaporation et la transpiration.

L'aridité s'installe lors d'une diminution de précipitations et d'une augmentation de l'évaporation. Par conséquent, les valeurs du rapport P/ETP, où P représente des précipitations annuelles et ETP l'évapotranspiration potentielle annuelle, ont été employées pour classifier des régions arides et semi-arides dans le monde. Le FAO/UNESCO(1976) a également adopté cet index pour son étude de risque de désertification, du fait qu'il exprime mieux l'aridité.

Quatre classes ont été délimitées par le MAB [1] :

- 1- Zone hyper-aride : $P/ETP < 0.03$, correspondant au climat de désert : très peu de pluie survenant irrégulièrement et aucune végétation permanente, excepté quelques buissons dans des lits de fleuve. L'agriculture et le pâturage sont généralement impossibles.
- 2- Zone aride : $0.03 < P/ETP < 0.20$, végétation dispersée composée de buissons et de petit sarbustes épineux ou sans feuilles. L'utilisation pastorale très légère est possible mais aucune culture sous pluie. Les précipitations annuelles varient entre 80 et 350 mm.
- 3- Zone semi-aride : $0.2 < P/ETP < 0.50$, steppe composée de savanes et de buissons tropicaux où pâturage et culture sous pluie sont possibles. Les précipitations annuelles varient principalement de 500 à 1200mm.

- 4- Zone sub-humide : $0.5 < P/ETP < 0.75$, comprenant principalement certains types de savanes tropicales, de maquis et de chaparral sous des climats méditerranéens. L'agriculture est une utilisation du sol normale.

En se basant sur cette classification, les régions arides sont principalement distribuées en Afrique du Nord (pays du Sahara et Sahel), proximité du Moyen-Orient et Moyen-Orient (pays arabes), Asie centrale (Kazakhstan, Turkménistan, Ouzbékistan, Chine du Nord-Ouest et Mongolie), Amérique occidentale et l'Australie occidentale. La figure I.1 montre la distribution des zones arides dans le monde.

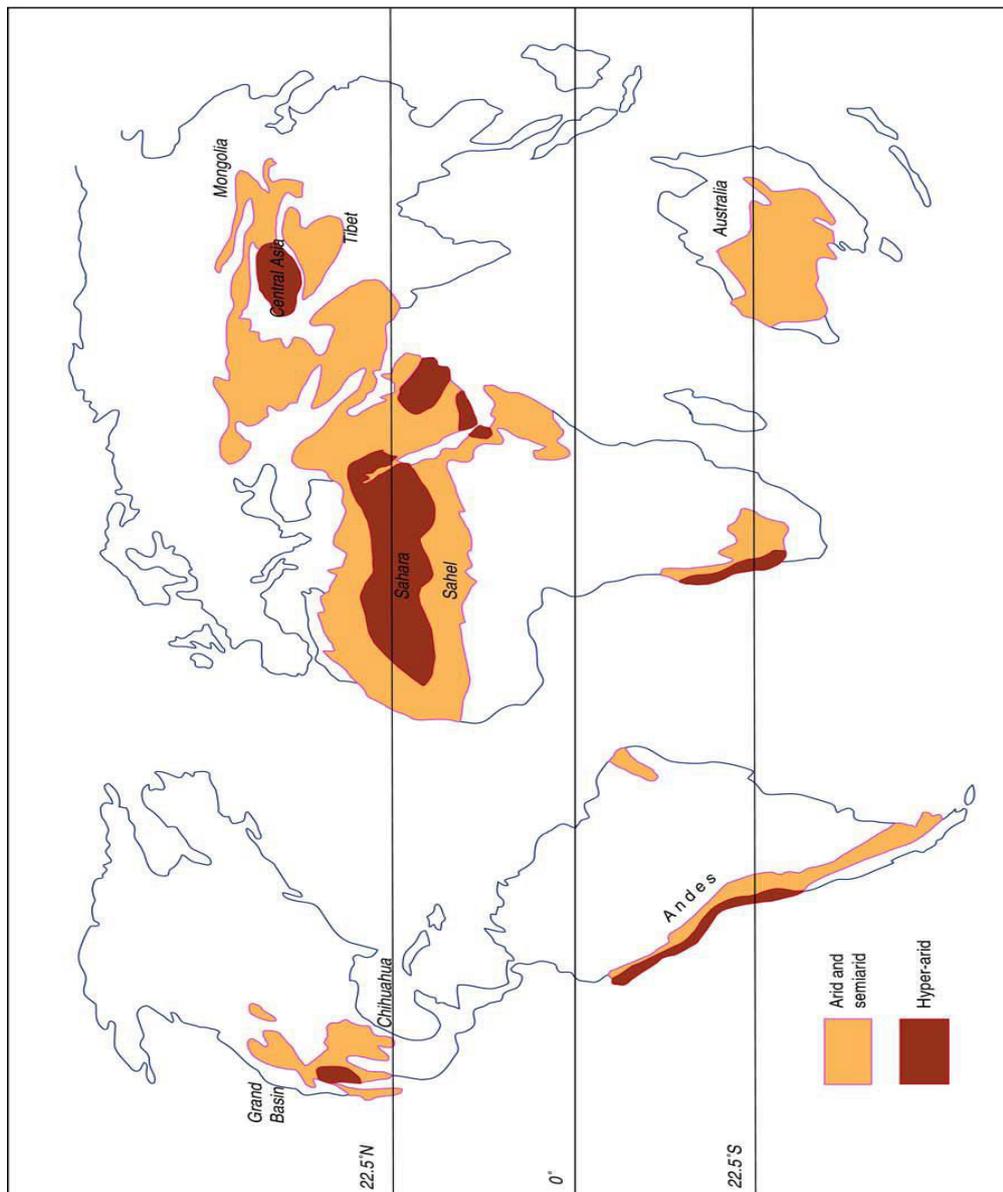


Figure I-1 : Distribution des zones arides Source: Demangeot et Bernus, 2001

I.4 Problématiques et état actuel de la recherche

L'étude de la détection de changements par imagerie satellitale est complexe [2]. Plus souvent, les images fournies par les plates formes de télédétection (optiques et radars) sont assujetties à des conditions de prise de vue, généralement difficiles à contrôler. En outre, l'étude des zones désertiques reste particulièrement difficile [3], en raison de la variabilité temporelle et géométrique de la surface du sol [4].

Nous avons choisi de caractériser les dunes de sable dans le Sahara. D'une part, il est important de suivre leur déplacement dans le désert et elles sont accessibles. D'autre part, c'est aussi pour évaluer l'intérêt des images de télédétection du désert, en particulier elles du sud-ouest d'Algérie. La détection des changements des dunes à partir des images satellitales soulève plusieurs problèmes, notamment :

- Diversité des zones d'études : La zone d'étude offre divers paysages : sables, sol dur et des roches montagneuses. Les zones au sol dur ne changent pas beaucoup, mais elles montrent des variabilités géométriques dues à l'érosion en raison des anciennes pluies. Les zones constituées de sable ont des formes régulières, mais avec beaucoup de changements au cours du temps. Comme les dunes se déplacent, elles changent de formes en même temps, ce qui a jouter des contraintes supplémentaires dans le suivi des changements.
- Choix de la méthode de détection à utiliser : La quasi majorité des méthodes de détection rencontrées dans la littérature n'apportent malheureusement pas grand chose. Cela s'explique par le bruit inhérent aux images LANDSAT ou encore l'utilisation de certaines techniques nécessite plusieurs images [5]. En général, le choix d'une méthode de détection pose problème.
- Choix de la méthode de comparaison à déployer : La comparaison d'images a un impact considérable dans plusieurs domaines, notamment en télédétection. Il existe deux types de comparaison :
 1. Comparaison directe : Elle semble ne pas être très adaptée à ce type d'étude. En général, les images ne sont pas directement superposables. En procédant de la sorte, on risque de comparer dès le départ, des endroits totalement différents. Cela induit implicitement des fausses informations. Elle n'intègre pas non plus, les techniques de recalage lors du traitement.
 2. Comparaison après prétraitement : Les résultats obtenus pendant cette phase sont souvent prometteurs. Cela s'explique d'une part la distorsion géométrique sont

considérés lors du traitement. D'autre part, la prise en compte de la morphologie du terrain lors de l'élaboration des techniques, semble porter ses fruits également.

En outre, pour des applications qui peuvent être coûteuses en temps de calcul et de développement, il est intéressant de détecter que ce qui est nécessaire ; dans le but d'optimiser le temps de calcul. Ce verrou n'est pas spécifique aux images satellites LANDSAT. Néanmoins, il donne des contraintes particulières dans l'élaboration des méthodes de traitement adéquates.

I.5 Objectifs de cette thèse

L'objectif principal de cette étude est de développer une méthode capable d'identifier et de caractériser des changements affectant les surfaces des dunes à partir des données satellitaires acquises à différentes dates et provenant de différentes sources. Il convient donc de développer des méthodes automatiques permettant de détecter des éléments de paysages sur des capteurs différents de façon à permettre des études à court ou à long terme. Il faut donc s'affranchir de l'obsolescence des capteurs dans le cas d'études à long terme et du délai de passage d'un même capteur dans le cas d'étude à très court terme.

Ensuite, il est question de montrer d'une part, le potentiel de l'utilisation de la télédétection pour la caractérisation de dunes et leur déplacement spatio-temporel à partir d'une série d'images satellitaires de différentes dates. D'autre part, de donner la possibilité aux potentiels responsables locaux, et décideurs s'intéressant à la question de l'avancée du désert d'avoir des informations cibles sur l'état de l'environnement du Sahara à partir d'images LANDSAT via les méthodes originales de détection de changement.

Enfin, en un mot, le but de ce travail étant de proposer/exhiber une méthode automatique de détection de changement des dunes. Elle devra s'affranchir des distorsions géométriques en faisant notamment une distinction de caractérisation des régions d'étude (la région du sud-ouest algérienne).

Les objectifs de cette thèse sont les suivants :

- Construire un système de suivi dynamique des changements environnementaux et modéliser leurs processus.
- Des outils spatiaux qui permettent de mesurer par télédétection des changements de propriétés de la surface des milieux arides étudiés et d'intégrer à ces informations des données connexes.

- Comprendre l'impact de l'activité humaine sur l'environnement et la réaction de l'environnement à l'homme.

I.6 Travaux en télédétection et les déserts

Les caractéristiques des dunes telles que l'espacement des dunes et la hauteur sont très régulières dans les déserts. Elles manifestent un motif périodique du point de vue distribution spatiale. Il existe plusieurs fonctions de transfert de modulation entre les images LANDSAT, les paramètres réels de surface périodique et la luminosité de l'image qui est sensible à l'angle d'incidence locale.

Un processus de cartographie linéaire peut décrire ces processus de modulation. Qong [6] avait proposé un algorithme pour l'estimation des caractéristiques de dunes linéaires, y compris (la direction des vents dominants), l'espacement inter-dunaires, la pente et la hauteur de dunes à partir d'images LANDSAT. Pour estimer la pente, deux algorithmes ont été développés : une méthode d'angle d'incidence locale et un procédé de modulation de fonction de transfert. La hauteur des dunes linéaires a ensuite été calculée sur la base de la pente de la surface. Le désert du Sahara, est le plus grand désert au monde, occupant ainsi plus de huit (08) millions de km² et touche dix pays quatre dans le continent africain, notamment l'Algérie. Le désert du Sahara a fait l'objet de nombreuses études [7].

Les données de télédétection provenant du visible, proche et infrarouge ont été utilisées. En particulier, les données LANDSAT, dans de nombreuses études de dépôts éoliens. Par exemple [8], [9] et [10] ont examiné et étudié la rétrodiffusion radar à partir de dunes du sable et la relation entre le terrain et les configurations radar, telles que la variation de l'angle et la longueur d'onde. Blumberg [11] a étudié la morphologie par le vent dans les environnements désertiques en utilisant des données polarimétriques SAR. L'accent mis par Muthar Qong [6] porte sur la rétrodiffusion radar de la surface des dunes linéaires pour en extraire les attributs tels que la hauteur des dunes, l'espacement inter-dunaire, et la direction des dunes. Les dunes linéaires sont caractérisées par leur longueur, leur hauteur, leur parallélisme et leur espacement régulier [12].

Par conséquent, elles manifestent un motif périodique en termes de distribution spatiale. Ces surfaces périodiques sont la forme dominante dans des nombreuses régions du désert. De nombreuses études sur des surfaces périodiques telles que les vagues de la mer ont été réalisées. Ce type de surface périodique peut être imagé par le système SAR, et de

nombreuses fonctionnalités d'onde de la mer, y compris la hauteur et les écarts de pente, ont été obtenus à partir de ces études [13], [14], [15] et [16].

Les caractéristiques topographiques de dunes linéaires sont très semblables à celles de vagues de la mer en termes de leur répartition spatiale instantanée [17]. Il est donc possible d'utiliser la fonction de transfert de modulation (MTF) entre les vagues de la mer et le spectre de l'image SAR, sous certaines conditions [18]. Dans certains cas, ces informations peuvent être utiles pour l'interprétation des images SAR d'autres planètes qui ont du relief comme Venus.

I.7 Organisation de la thèse

Ce mémoire de thèse est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre porte sur "l'introduction générale". Il est dédié au contexte, à la distinction de la zone aride, à la problématique, à l'objectif de la thèse et enfin à l'organisation de la thèse. Le second chapitre "La télédétection et sable dunaire " porte les caractéristiques physiques et biologiques des objets du point de vue cible et les caractéristiques radiométriques du point de vue satellite, la présentation des différentes accumulations de sable (dunes). Le troisième chapitre " Approches pour la modélisation spatio-temporelle" Ce chapitre se situe dans le domaine de la géomatique et concerne plus particulièrement la gestion du changement au cours du temps de données à références spatiales.

Dans notre problématique, les données sont des statistiques territoriales qui reflètent les évolutions permanentes de la société, sur le plan économique, démographique ou social. Notre recherche vise à produire des méthodes permettant d'analyser ces évolutions, Le quatrième chapitre "résultats et discussions" Ce chapitre est au cœur de nos travaux.

Il présente quelques techniques de détection par prétraitement , le suivi de processus du mouvement des dunes par des analyses spatio-temporelles que seul l'outil satellitaire peut appréhender étant donné l'ampleur du phénomène est essentiel dans notre cas, car il permet une large couverture des aires touchées par ce phénomène. nous avons ensuite expliqué les phénomènes inhérents aux images satellites et décrit les travaux réalisés à partir d'images LANSAT dans le désert puis nous évaluons les résultats pour conclure sur la meilleure stratégie à adopter. Nous résumons, les différentes approches élaborées, la démarche suivie, les méthodes retenues et la contribution apportée. Enfin, il situe les perspectives.

I.8 Présentation de la zone d'étude

L'Algérie est un pays où le phénomène d'ensablement présente un risque majeur dans certaines régions littorales et steppiques ; résultat des processus éoliens et parfois hydriques, ce dernier paralyse et menace les cultures et les infrastructures, au Sahara et dans la steppe. Effectivement 83% de la superficie du pays est constituée de sable ce qui explique les processus éoliens dans ces zones arides, mais il s'avère que les phénomènes érosifs éoliens menacent d'autres régions dans le tell en générant une forte mobilité des sables.

C'est en effet le cas de la zone d'étude, Bechar où il y a présence d'un stock de sable issu de l'érosion des sols dénudés de végétation, renforcé par les conditions physiques et climatiques de la région, ainsi que par les effets néfastes de l'homme.

I.8.1 Présentation du cadre de l'étude : La wilaya de Béchar

Elle est située au Sud Ouest du Territoire National et couvre une superficie de 162 200 km² avec une façade limitée de l'ordre de 120 km:



Figure I.2 Wilayas limitrophes de la wilaya de Bechar

- ❖ A l'Est par la Wilaya de El Bayadh
- ❖ Au Sud par les Wilaya de Adrar et Tindouf
- ❖ A l'Ouest par le Royaume de Maroc
- ❖ Au Nord par la wilaya de Naama

INTRODUCTION GENERALE

Entre les coordonnées géographiques ($25^{\circ}31'$ et $25^{\circ}41'30''$ Nord) et ($28^{\circ}46'30''$ et $29^{\circ}2'$ Est) (Figure I.3).

La région de Bechar se caractérise par un climat aride à hiver tempéré et une pluviométrie qui varie entre 150 mm et 200 mm.

Actuellement, de nouvelles menaces sont apparues qui augmentent le risque d'ensablement, elles sont liées aux bouleversements socio-économiques et aux conditions physiques ainsi que climatiques de la région.

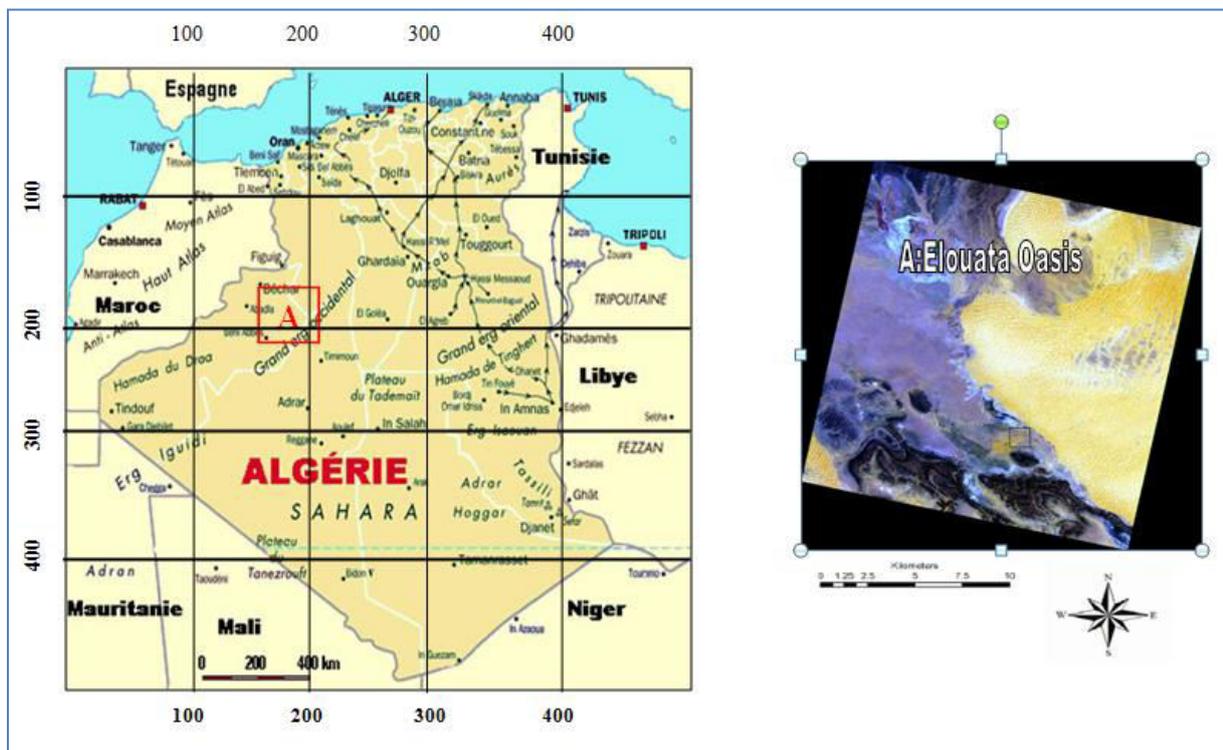


Figure I.3 Localisation de la zone d'étude (projection UTM 30N), présente une image 7 ETM+ en composition fausse couleur.

Toutefois, l'imagerie satellitale, qui couvre d'immenses territoires, nous permettra d'envisager l'étude dans les autres parties de la région du Béchar (Elouata oasis).

Dans ce secteur, très sensible aux changements climatiques, le déficit pluviométrique cumulé lors des deux décennies de sécheresse, la faible énergie du relief et la déforestation préfigurent l'importance des phénomènes morphodynamiques. Des vents chargés de particules, des auréoles de dénudation autour des zones de concentration humaine et la genèse de nouvelles formes induites par l'érosion hydrique et éolienne deviennent les composantes essentielles de l'évolution géomorphologique récente.

I.9 Références

- [1] [MAB](#), MAB Technical Notes 7 for the Map of the world distribution of arid regions, 1977, published by the UNESCO, Paris, 1979.
- [2] [Salim CHITROUB](#). Combinaison de classifieurs : une approche pour l'amélioration de la classification d'images multisources/multidates de télédétection. Xème Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF.
- [3] [R.A. BAGNOLD](#). The physics of Blown Sand and Desert Dunes. London : Chapman and Hall, 1941.
- [4] [Christophe Gouinaud](#), [Atteib Ibrahim Doutoum](#), [Pascale Gouinaud](#), and [Mamadou Kaba Traoré](#). Sar image automated detection of dune area. Geosciences And Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International. Melbourne - Australia, pages 14891492, july 2013.
- [5] [Rignot E.J.M.](#) and [Van Zyl J.J.](#) Change detection techniques for ers-1 sar data. IEEE transactions on geosciences and remote sensing, Vol.31, N4, pages 896906, july 1993.
- [6] [Théodore MONOD](#). Terre et iel. Entretien ave Sylvain Estibal. A tes sud, 317 pages, 1998. [34] [Blom R.G](#) and [Ela hi C](#). Spa eborne and airborne imaging radar observations of sand dunes. J.Geophys. 86, pages 30613073, 1981.
- [7] [Blom R.G](#) and [Ela hi C](#). Mutifrequency and multipolarization radar scatterometry of sand dunes and comparison with spa eborne and airborne radar images. J.Geophys. Res. 92 :7889- 3073, 1987.
- [8] [Blom R.G](#). Eeffets of variation in look angle and wavelength in radar images of volcani and a eolian terrains, or now you don't. Int. J. Remote Sens. 9(5) :945-965, 1988.
- [9] [Blumberg D.G](#). Remote sensing of desert dune forms by polarimetri syntheti aperture radar (sar). Remote Sens. Environ. 65 :204-216, 1998.
- [10] [Lan aster N](#). Geomorphology of desert dunes 1995. Routledge, New York.
- [11] [Valenzuela G.R](#). Theories for the interaction of electromagnetic and oscean waves - review. Bound. Layer Met. 13 :61-85, 1978.
- [12] [Lyzenga D.R](#). An analytic representation of the sysnthetic aperture radar image spectrum for oscean waves. J.Geophys. Res. 93 :13859-13865, 1988.
- [13] [Igu hi T.](#), [Inomata H.](#), [Masaki H.](#), and [Fugono N](#). Oscean wave spectra derived from shuttle imaging radar-b imagery and surface measurements. J.Geophys. Res. 93 :15367-15373, 1988.
- [14] [Va hon P.W.](#) and [Dobson F.W](#). Validation of wind ve tor retrieval from ers-1 image over the oscean. The Global Atmosphere and Oscean System 5 :177-187, 1996.

[15] [Muthar Qong](#). Estimation of linear dune features including height, slope and direction from SAR image., 1999. In Books of Abstracts, Second International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, ITC, The Netherlands.

[16] [Alpers W.R.](#) and [Rufenach C.L.](#) The effect of orbital motions on synthetic aperture radar imagery of ocean waves. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Antennas Propag. AP-27 :685-690, 1979.

[17] [Hasselmann K.](#), [Raney R.K.](#), [Plant W.J.](#), [Alpers W.R.](#), [Shulman R.A.](#), [Lyzenga D.R.](#), [Rufenach C.L.](#), and [Tukey M.J.](#) Theory of synthetic aperture radar ocean imaging : A Marsden view. J.Geophys. Res. 90 :4659-4686., 1985.

[18] [G.Rochon](#) & [F.Bonn](#).« Précis de la télédétection », Québec Presses de l'université du Québec,1992

Chapitre II

Aperçu sur la télédétection et sable dunaire

II.1 Introduction

L'étude de suivi de changement spatio-temporelle et le mouvement du dune de sable est possible principalement par le recours vers l'application des techniques de détection des changements offerte par l'utilisation de la télédétection spatiale qui est aujourd'hui largement utilisée pour détecter, identifier et suivre les mouvement du dunes de sables. La télédétection est un domaine qui profite opportunément des grands bonds technologique. L'avènement de la télédétection est assimilable à celle de la photographie. Le potentiel s'est considérablement accru avec l'apparition de nouveaux capteurs, (infrarouge, multi spectral, micro-onde)[20].

II.2 Physique de l'atmosphère, télédétection et géophysique spatiale

II.2.1 Définitions

Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance sans contact matériel avec ceux-ci, Cette définition pourrait inclure des méthodes gravimétriques, magnétiques ou acoustiques, mais pour des raisons historiques – la télédétection moderne est née de la photographie aérienne – elle est devenue la détection d'objets par l'intermédiaire des ondes électromagnétiques.

La télédétection est certainement l'une des plus vieilles activités de l'homme, qu'il s'agisse de l'observation visuelle de son environnement proche ou de l'observation à l'oeil nu des étoiles et des planètes. Elle implique aujourd'hui une maîtrise des nombreux processus physiques qui interviennent tout le long de la chaîne de mesure : source de rayonnement, propagation, interaction onde / matière, réception, traitement du signal[19].

Les principaux produits de la télédétection sont des images numériques utilisées pour des recherches fondamentales en géophysique au sens large (géographie, géologie, océanographie, physique de l'atmosphère) ou pour des applications dérivant de ces disciplines (ressources terrestres minérales et végétales, pollution), mais cet outil a bien d'autres applications dans le domaine de l'environnement [21].

II.2.2 Quelques bases physiques

II.2.2.1 Le rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est constitué d'un champ électrique E et d'une induction magnétique B . Ces deux champs sont orthogonaux entre eux et orthogonaux à la direction de propagation C ; ils se déplacent à la vitesse de la lumière. Le rayonnement électromagnétique est caractérisé par cinq quantités dépendant du temps et susceptibles d'apporter une partie de l'information recherchée :

- La direction de propagation C
- L'intensité I_0
- La longueur d'onde λ (ou fréquence $\nu = c/\lambda$ ou nombre d'onde $\sigma = 1/\lambda$)
- La polarisation (parallèle ou perpendiculaire)
- La phase

La quantité d'énergie transportée par un photon est proportionnelle à la longueur

$$q = h \frac{c}{\lambda} = h\nu \quad (\text{II.1})$$

Avec h la constante de Planck ($6,625 \times 10^{-34} \text{ W s}^2$).

II.2.2.2 Le spectre du rayonnement électromagnétique

Le domaine dans lequel la longueur d'onde des ondes électromagnétiques peut varier est très vaste et correspond au spectre du rayonnement électromagnétique. Une partie seulement de ce spectre est utilisée en télédétection en raison de l'absorption du rayonnement électromagnétique par l'atmosphère. Par exemple, l'atmosphère est opaque aux rayons X et Gamma, aux ultraviolets, ainsi qu'aux rayonnements de longueurs d'onde comprises entre $14 \mu\text{m}$ et 1 mm .

Les principales zones dans lesquelles des mesures sont possibles en télédétection sont:

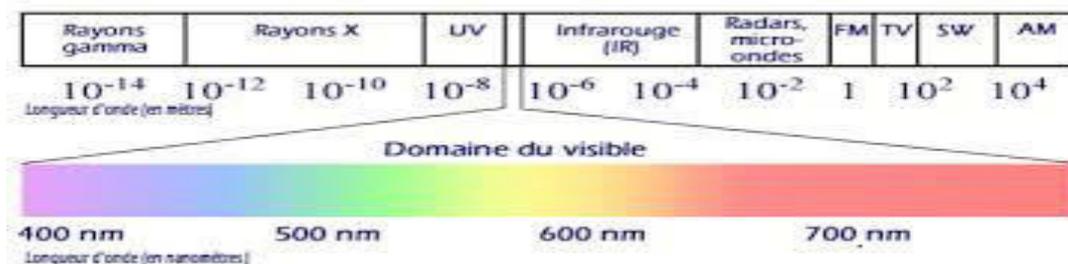


Figure II.1 Le spectre électromagnétique

Aperçu sur la télédétection et sable dunaire

- Le **domaine optique** ou **domaine solaire** comprenant le **visible** (**violet** : 400–446 nm / **bleu** : 446–500 nm / **vert** : 500–578 nm / **jaune** : 578–592 nm / orange : 592–620 nm / **rouge** : 620–700 nm), le **proche infrarouge** (700–1200 nm) et le **moyen infrarouge** (1200–3000 nm) : les données acquises par télédétection sont corrélées aux quantités de rayonnement solaire réfléchies par les objets ou matériaux à la surface terrestre. Ce rayonnement est en partie intercepté par l'atmosphère.
- **L'infrarouge thermique** (3–100 μm) : les signatures spectrales des objets dépendent de leur température de surface. L'atmosphère absorbe les rayonnements de longueurs d'onde comprises entre 13 et 100 μm .
- les hyperfréquences ou micro-ondes (0.1 mm – 1 m) : entre 0.1 mm et 1 cm, les composants de l'atmosphère (surtout H_2O et O_2) absorbent sélectivement le rayonnement électromagnétique de sorte que ce domaine est utilisé pour les sondages atmosphériques. En revanche, l'atmosphère n'absorbe plus le rayonnement de longueurs d'onde supérieures à 2 cm, rendant possible une télédétection à travers les nuages.

II.2.2.3 Propriétés des ondes électromagnétiques

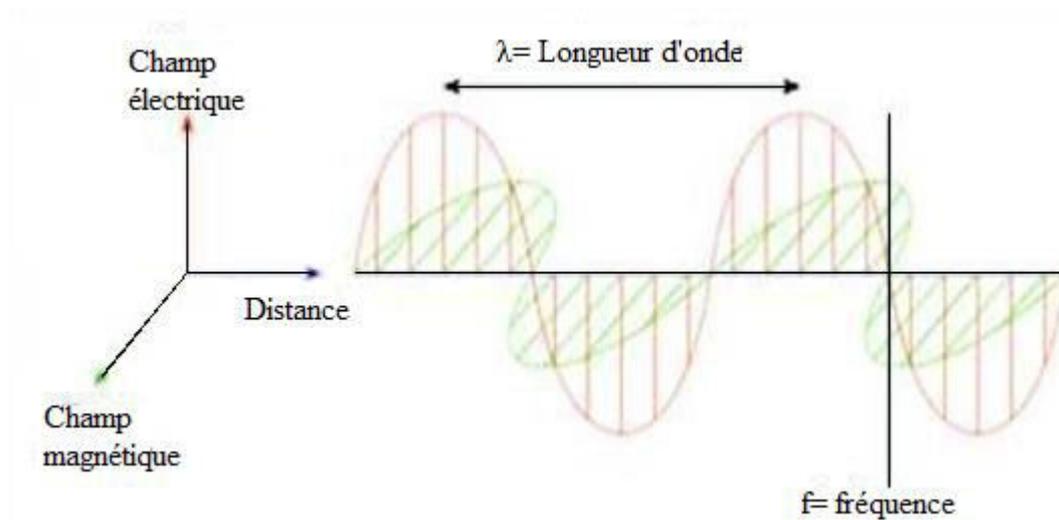


Figure II.2 : Caractéristiques d'une onde d'après [23].

Il y a de nombreuses propriétés des ondes électromagnétiques, qui sont fondamentales pour les principes de base de la télédétection et qui sont :

a- Emission

Tout corps où la température thermodynamique est supérieure à 0 ° K (-273 °C) émet un rayonnement électromagnétique. L'émetteur, appelé aussi source, (soleil, le satellite "RADAR") ou encore la cible (infrarouge thermique). [22] et [23].

Énergie rayonnée dans une longueur d'onde définie, pendant l'unité de temps, par l'unité de surface d'un corps à une température déterminée. [24].

b- Absorption

Le corps qui reçoit une quantité de REM, peut en absorber une partie, l'absorptance est le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie incidente. Les zones du spectre électromagnétique, pour lesquelles l'absorption est faible sont appelées « fenêtres atmosphériques » ; elles déterminent les bandes spectrales utilisables en télédétection.

c- Réflexion

Tout corps qui reçoit une quantité de REM peut en réfléchir une partie. On parle d'albédo lorsqu'il s'agit d'énergie solaire réfléchi par une portion d'espace terrestre, il s'exprime en pourcentage d'énergie réfléchi. La réflexion peut être spéculaire lorsqu'elle est dirigée entièrement dans une seule direction, ou diffuse lorsqu'elle est dirigée dans toutes les directions [24].

d- Diffusion

Correspond aux réflexions multiples du rayonnement qui frappe les molécules ou les particules (aérosols) de l'atmosphère dont la direction de propagation change. On distingue la diffusion de Rayleigh (résulte de l'interaction entre le rayonnement et les molécules gazeuses dont les dimensions sont très inférieures aux longueurs d'ondes du rayonnement solaire. C'est ce qui explique la couleur bleu du ciel et sa couleur rouge au coucher du soleil) et la diffusion de Mie qui est due aux aérosols en suspension dans l'air – poussière, micro gouttelettes d'eau -qui concerne les aérosols.[23],[25]

II.3 Résolutions

II.3.1 Résolution spatiale

Correspond à la dimension et aux qualités d'observation du point élémentaire (pixel). La taille du pixel définit donc l'aptitude du capteur à distinguer deux objets proches sur la surface. Elle dépend de la fréquence d'échantillonnage du signal [26].

II.3.2 Résolution temporelle

La résolution temporelle d'un satellite traduit le temps que prend un satellite pour effectuer un cycle orbital complet (intervalle entre 2 passages au nadir d'un point de la surface terrestre).

Cette période est généralement de quelques jours. Il faut donc quelques jours à un tel satellite pour qu'il puisse observer de nouveau exactement le même point dans l'espace.

La résolution temporelle absolue du système de télédétection est donc égale à cette période.

Exemples : 16 jours pour Landsat TM, 3 jours pour SPOT. [27]

II.3.3 Résolution spectrale

Correspond à la capacité du capteur à distinguer des signaux de longueurs d'onde différentes. Elle dépend du dispositif de filtrage optique qui sépare les rayonnements incidents en bandes spectrales plus ou moins larges [28].

II.3.4 Résolution radiométrique

Exprime l'aptitude du capteur, dans une bande spectrale considérée, à distinguer des signaux électromagnétiques d'énergies différentes. Sa limite est la plus petite variation d'énergie décelable [29].

II.4 Notion de l'image satellite

D'après [29], L'image satellite est une image numérique représentant les mesures d'un rayonnement réfléchi ou émis par la surface terrestre. Permet d'identifier en composition colorée les éléments du paysage.

Elles sont caractérisées par la partie du spectre électromagnétique utilisée (visible, infrarouge, ondes radar), la résolution au sol, c'est-à-dire la taille du plus petit élément ou échantillonné sur le terrain, la répétitivité de l'observation qui est un des grands avantages de l'observation par satellite est de pouvoir fournir des séries temporelles d'images de la même zone dans des conditions d'observation assez identiques.

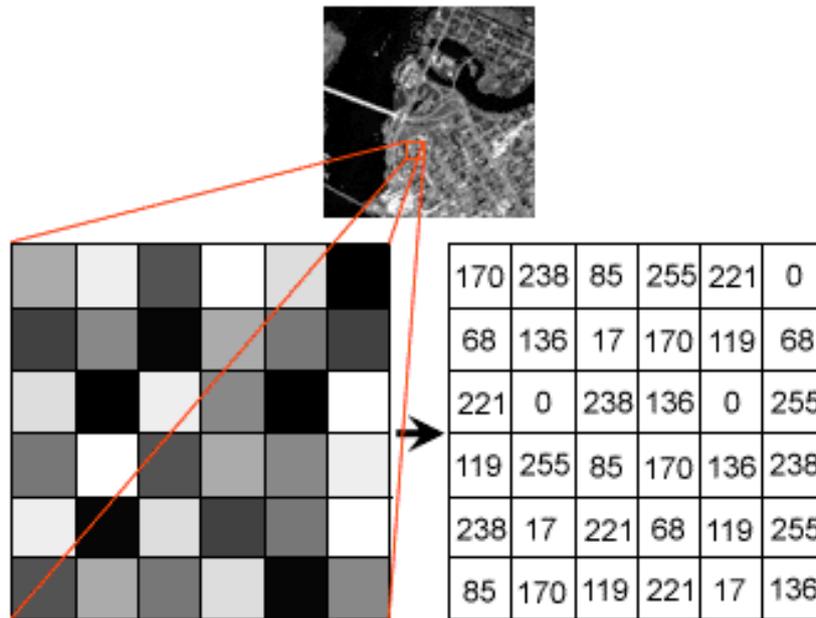


Figure II.3 Représentation d'une image satellite

II.5 Reflectance Spectrale

Les caractéristiques de réflexivité des objets de surface de la terre peuvent être quantifiées en mesurant la partie reflétée de l'énergie incidente. Ce qui est mesuré en fonction de la longueur d'onde est appelé la réflectance spectrale et peut être exprimé en pourcentage [30]. Une courbe graphique de la réflectance d'un objet en fonction de la longueur d'onde se nomme une courbe spectrale de réflectance (figure II-4). La configuration de telles courbes nous donne des indications sur les caractéristiques spectrales d'un objet et influence fortement le choix des régions de longueur d'onde dans lesquelles des données de télédétection sont acquises pour une application particulière [31]. La figure II-4 présente la réflectance spectrale de trois compositions communes de surfaces de la Terre dans la gamme du visible, de l'infrarouge et de la proche-moyen infrarouge.

En ce qui concerne la végétation saine, la chlorophylle absorbe l'énergie d'une longueur d'onde d'environ $0,45\mu\text{m}$ (bleu) et à $0,67\mu\text{m}$ (rouge) et a une réflexion d'environ $0,55\mu\text{m}$ (vert) dans la gamme spectrale visible. C'est pourquoi nous percevons la végétation saine comme étant de couleur verte.

Aperçu sur la télédétection et sable dunaire

Avec l'augmentation de la longueur d'onde de $0,76 \mu\text{m}$ à $1,3 \mu\text{m}$ dans la section du proche infrarouge, la végétation reflète fortement l'énergie et montre une réflectance élevée. Toutefois elle diminue dans la gamme infrarouge moyenne et des creux significatifs se produisent à environ $1,4 \mu\text{m}$, $1,9 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$, parce que l'eau dans les feuilles absorbe fortement, à ces longueurs d'onde.

Si la plante est sensible à un risque de maladie ou est menacée par un insecte, la concentration en chlorophylle de la feuille diminuera et conduira à moins d'absorption dans les bandes bleues et rouges. La feuille devient alors jaune en raison de l'augmentation de la réflectance rouge et bleue.

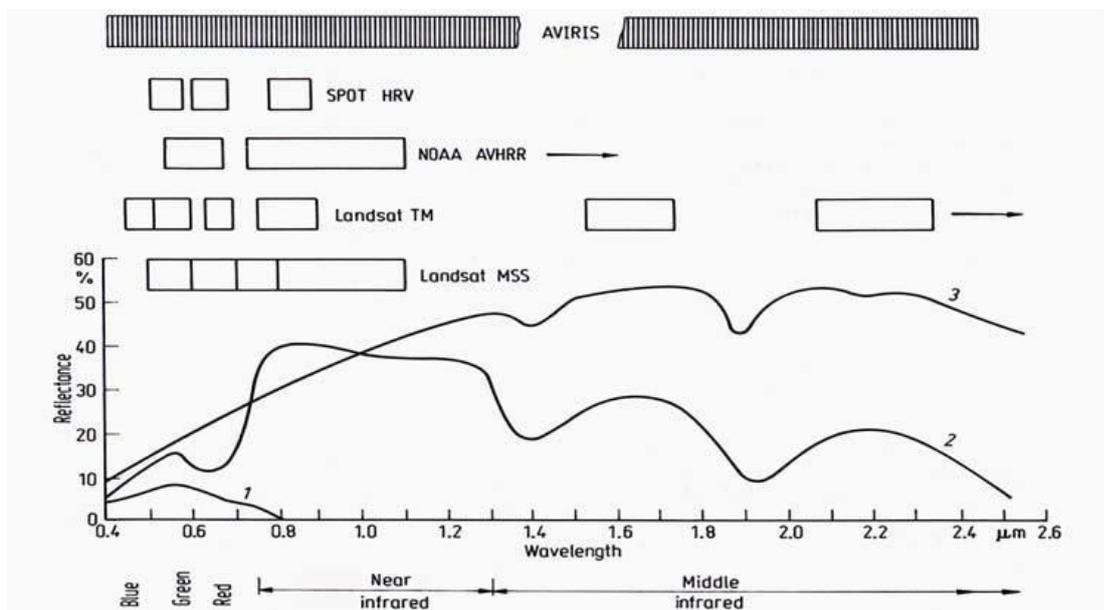


Figure II.4 : Caractéristiques de la réflectance spectrale des matériaux communs de la surface du sol, dans le visible et le proche-moyen infrarouge (d'après [32]).

Le sol nu sec montre une augmentation de réflectance en ce qui concerne la longueur d'onde mais décroît également à environ $1,4 \mu\text{m}$, $1,9 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$, du fait de l'humidité. La réflectance du sol dépend de l'humidité, du contenu organique, de la texture de sa composition et de la rugosité de surface.

L'eau claire semble avoir seulement un faible pouvoir de réflexion dans le visible. Cependant, avec le changement de la turbidité de l'eau, la transmittance et la réflectance de l'eau changent nettement [30].

Les positions des bandes spectrales pour les instruments communs de télédétection sont indiquées dans la figure II-4.

II.6 Apport de la télédétection

On peut résumer l'apport de la télédétection comme suit[32]:

- Elle offre une vision globale et continue de la surface terrestre et des phénomènes qui s'y déroulent;
- Elle offre une vision riche d'informations (multispectrale et hyperspectrale);
- Elle permet d'accéder à des zones dites « inaccessibles » pour des questions de topographie, de climat et de catastrophes naturelles;
- Acquisition de données en temps voulu;
- Observations très rapprochées dans le temps d'un même endroit (répétitivité);
- Les images sont sous forme numérique, ce qui facilite considérablement leur intégration dans les bases de données, possibilité de faire la modélisation pour les phénomènes étudiés.

II.7 Intérêt des images satellitaires dans l'étude d'avancement du sable

La télédétection permet l'acquisition à distance de scènes terrestres, à partir desquelles on peut extraire les objets d'intérêt, ceci exige non seulement la maîtrise du processus de télédétection, mais aussi l'interaction entre le rayonnement électromagnétique incident et les objets, la portion, réfléchi de ce rayonnement et modifiée par l'atmosphère constitue l'entrée de base des systèmes de télédétection opérant dans les bandes spectrales allant du visible à l'infrarouge, face aux problèmes de l'érosion éolienne et de la régression de la végétation steppique qui se manifestent ces dernières années.

L'Algérie a depuis les années de 1970 entrepris des actions de lutte et des stratégies réglementaires visant à endiguer et faire face aux effets néfastes de ces

problèmes. A cet effet, plusieurs organismes (ANPN, ANAT, HCDS, INRA, BNEDER, CDRS,...) se sont mobilisés pour consolider les plans d'action et de prévention engagés par l'état, malgré les efforts déployés par ces organismes étatiques et privés et les nombreuses études réalisées dans la plus part des régions touchées par la désertification, ces études restent insuffisantes et ne permettent pas à ces organismes de connaître de façon rationnelle et globale les conséquences de cette désertification.

Il est à noter que ces travaux ont été réalisés en se basant principalement sur des observations de terrain et sur des traitements de photo-interprétation sur des photographies aériennes, or ces méthodes classiques sont coûteuses, fastidieuses et les plus exigeantes en temps, surtout lorsqu'il s'agit de surfaces de grande dimension.

De plus, elles sont effectuées d'une manière ponctuelle ce qui nécessite des procédures mathématiques (interpolation) afin d'obtenir une information zonale. Toutefois, les image satellitaires peuvent engendrent des informations incertaines qui ne peuvent être levées que par un renforcement d'observations et de mesures de terrain , ces travaux de terrain restent toutefois indispensables pour deux raisons :

- Certaines variables du milieu physique ne peuvent être mesurées que par des observations de terrain, le type d'édifice dunaire, le type de sol, la composition floristique des parcours et leur état de dégradation, et l'humidité des sols et leur description, en sont un bon exemple.
- Les variables mesurées par avion ou par satellite doivent être calibrées et vérifiées sur le terrain, notamment l'occupation du sol, la mutation dynamique des paysages, le cortège floristique, le recouvrement de la végétation, etc [36].

Les images satellitaires constituent un outil important dont il faut tenir compte dans le cadre de la planification et de la gestion harmonieuse des travaux concernant l'érosion éolienne.

Selon POUCHIN,T [22] les images sont descriptives et elles apportent une information visuelle beaucoup plus importante par rapport à l'homme, l'aspect multi-spectral des données de télédétection offre un atout crucial dans la caractérisation des objets dans une large bande spectrale, quant à l'aspect multi-résolution le passage

d'une échelle fine à une échelle plus petite est tout à fait possible, de cette façon on peut décrire n'importe quel problème, d'ordre naturel ou artificiel, selon les besoins exprimés soit par la nature du phénomène à étudier (étude à l'échelle régionale) soit par le manque de documents cartographiques et thématiques à une échelle imposée par les décideurs en vue d'un aménagement local, à cet égard, la télédétection permet :

- de dégrossir la recherche des secteurs dégradés (parcours semi-arides et terrains agricoles ensablés) en donnant une vue synoptique d'un territoire qu'on veut analyser et aménager.
- de comparer dans l'espace et dans le temps les différentes mutations des unités constituant les différents paysages de la région d'étude.
- de localiser les zones où la régénération est possible et les zones où il faut intervenir en urgence pour limiter et atténuer les dégâts.
- d'obtenir des informations concernant des zones isolées ou inaccessibles
- d'évaluer l'impact des décisions de gestion des ressources.

II.8 Comprendre l'ensablement

Il y a ensablement lorsque les grains de sable sont transportés par les vents et s'accumulent sur le littoral, au bord des cours d'eau et sur des terres cultivées ou incultes. En se déplaçant, les accumulations de sable (dunes) ensevelissent les villages, routes, oasis, cultures, jardins maraîchers, canaux d'irrigation et barrages, entraînant ainsi des dégâts matériels et socio-économiques très importants, des programmes de lutte contre la désertification doivent alors être mis en œuvre pour endiguer la gravité de cette situation.

Pour établir ces programmes, il est essentiel de connaître les facteurs et de comprendre les processus qui favorisent la formation et le déplacement des masses sableuses, à savoir le vent et le sol. [33]

II.8.1 Erosion éolienne

Les principales causes de l'érosion éolienne sont:

- un vent violent soufflant sur de grandes surfaces,
- une végétation rabougrie ou rare,
- un sol dégradé, meuble, dénudé et sec.

II.8.2 La violence du vent

Le déplacement des particules du sol est lié à la direction, la vitesse et la durée du vent, lorsqu'un vent souffle avec plus de fréquence dans une direction privilégiée, on parle de vent dominant. Au niveau du sol, la vitesse du vent est nulle, le vent est d'autant plus fort qu'on s'éloigne de la surface du sol, et sa vitesse augmente comme le logarithme de la hauteur (figure II.5).

Un vent ne peut soulever des particules de sable que lorsque sa vitesse, mesurée avec un anémomètre à 30 cm au-dessus du sol, atteint ou dépasse 6 m par seconde, la vitesse du vent est un facteur essentiel, car elle détermine la force d'entraînement du sable, plus cette vitesse augmente, plus la capacité de transport s'accroît.

Le second facteur est la taille et la densité des particules de sable, les particules dont le diamètre avoisine 0,1 mm sont entraînées les premières, tandis que les particules plus grosses ne peuvent être déplacées que par des vents violents.

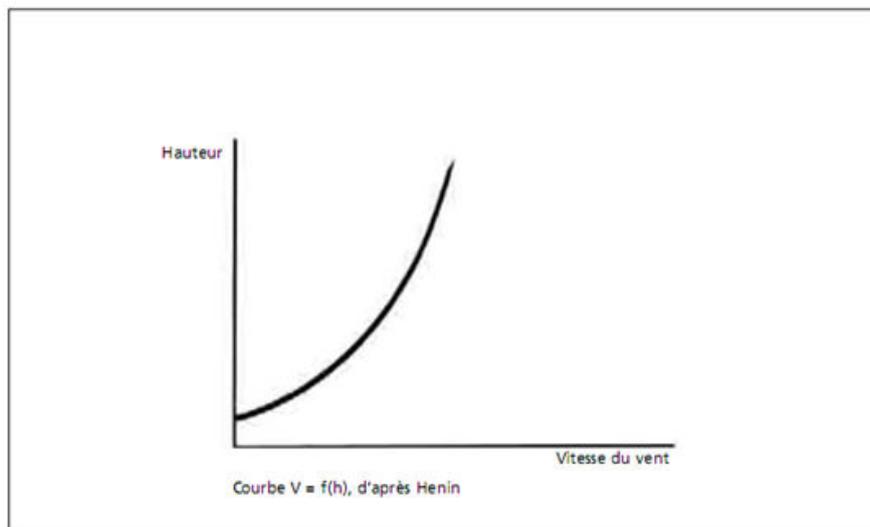


Figure II.5 Vitesse du vent en fonction de l'altitude

La nature du mouvement des particules varie selon leur dimension (figure II.5), les plus grosses particules roulent ou glissent à ras de terre; c'est le phénomène de reptation, les grains de sable qui se déplacent de cette façon ont un diamètre compris entre 0,5 et 2 mm, suivant leur densité et la vitesse du vent, lorsqu'ils commencent à avancer plus difficilement, suite à l'effet de freinage de la masse sableuse, le mécanisme de saltation devient possible.[33]

Les particules du sol de dimension moyenne (de 0,5 à 1,1 mm de diamètre) avancent par bonds successifs, selon un mécanisme appelé saltation, après avoir sauté, ces particules retombent sous l'effet de la pesanteur; 90 pour cent d'entre elles atteignent une altitude ne dépassant pas 30 cm, avec une amplitude au sol comprise en moyenne entre 0,5 et 1 m. Le phénomène de saltation est primordial pour déclencher l'érosion éolienne.

Les particules très fines, d'un diamètre égal ou inférieur à 5 microns, sont projetées en l'air sous forme de poussière par l'impact des grains plus gros. Ces particules restent en suspension et peuvent être entraînées très loin sous forme de nuage de poussière, atteignant souvent 3 000 à 4 000 m d'altitude.

II.8.3 Les mécanismes des mouvements globaux

Les particules en mouvement sont le siège d'interactions, dont les principales sont l'effet d'avalanche, le triage et la corrasion, l'effet d'avalanche est la conséquence de la saltation, en retombant, les grains de sable provoquent le déplacement d'une quantité plus importante de particules. Ainsi, plus le phénomène causé par le vent est intense, plus le nombre de particules mises en mouvement augmente, jusqu'à ce qu'un maximum (saturation) soit atteint, où la quantité perdue est égale à la quantité gagnée à chaque instant, la distance nécessaire pour atteindre cette saturation va dépendre de la sensibilité du sol à l'érosion, ainsi, sur un sol très fragile, elle peut se produire sur une cinquantaine de mètres, et demander plus de 1 000 m sur un sol de bonne cohésion.

Le triage concerne le déplacement par le vent des particules les plus fines et les plus légères, alors que les plus grosses restent sur place, cet effet entraîne progressivement l'appauvrissement du sol puisque la matière organique formée d'éléments fins et légers est la première à être emportée.

La corrasion est l'attaque mécanique de la surface sur laquelle souffle un vent chargé de sable, dans les régions arides, elle est la cause aggravante de l'érosion des sols et se traduit par des stries parallèles ou par un polissage des roches.

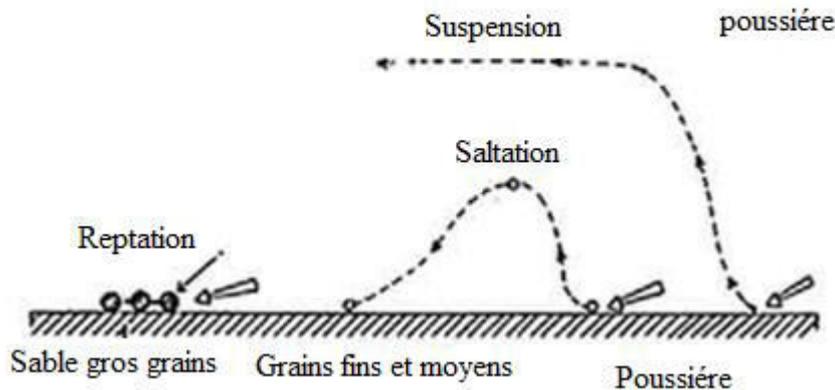


Figure II.6 Modes d'entraînement des particules par le vent

II.8.4 L'état de la végétation

La végétation maintient la cohésion de la couche superficielle du sol, retient les particules, s'oppose à l'effet d'avalanche et constitue la meilleure protection contre les effets néfastes du vent, c'est pourquoi l'érosion éolienne est à craindre dans les régions arides et semi-arides, où les formations végétales naturelles (arborées, arbustives et herbacées) sont clairsemées, rabougries ou inexistantes, et où la pluviométrie est faible et irrégulière.

De plus, l'exploitation irrationnelle de ces formations à croissance lente provoque une dégradation rapide du sol, qui est alors soumis à l'action des vents car il n'est plus protégé.

II.8.5 La nature et l'état du sol

L'érosion éolienne est la conséquence de l'attaque du sol par le vent, cette érosion se produit si le sol présente les particularités suivantes: il est meuble, sec et finement émiété (à texture grossière, riche en sable fin, pauvre en argile et en matière organique), il a une surface uniforme, dépourvue d'obstacles naturels ou artificiels la couverture végétale est rare ou inexistante, il couvre une zone suffisamment étendue, allongée dans le sens du vent, les sols desséchés durant une longue période sont surtout présents dans les zones arides et semi-arides.

La sensibilité du sol à l'érosion peut être aggravée par de mauvaises pratiques culturales (défrichement sur des surfaces importantes) ou pastorales (surpâturage

avec ameublissement et émiettement du sol) et par des prélèvements abusifs dans les périmètres forestiers, ce qui rend le sol très sensible à l'action du vent.

II.8.6 Origine du sable

Lorsque le sable est apporté par des courants marins et que son accumulation sur le rivage est importante, il forme des dunes littorales, s'il provient de l'intérieur des terres, il forme des dunes continentales, dans ce cas, le sable peut être allochtone (d'origine lointaine), avec un diamètre des particules inférieur à 0,05 mm, ou autochtone (d'origine locale), pouvant provenir de la décomposition des roches (grès) de montagne, de la désagrégation de sols alluvionnaires suite à la disparition du couvert végétal, ou des limons charriés par les oueds en raison d'une érosion hydrique de leurs bassins versants.[27]

II.9 Effets de l'érosion éolienne

II.9.1 Sur le sol

Le vent entraîne en premier lieu les parties fines du sol, c'est-à-dire le limon, le sable fin et la matière organique. Il détériore ainsi la structure du sol, qui devient plus sableuse, donc plus sensible à son action, et il diminue sa capacité de rétention d'eau la coloration du sol passe du gris au blanc puis au rouge, au fur et à mesure de son décapage, de petites buttes se créent autour de la végétation ligneuse et herbacée, rendant ainsi le terrain accidenté, le sol devient progressivement impropre à la culture.

II.9.2 Sur la végétation

L'action du vent sur la végétation est à la fois mécanique et physiologique, effets mécaniques, les particules de sol transportées heurtent les tiges et les feuilles avec force, entraînant l'abrasion de leurs tissus, dans les zones où les particules sont prélevées, les racines se déchaussent et la végétation risque d'être déracinée, dans les zones où elles sont déposées, la végétation est progressivement ensevelie. Effets physiologiques, le vent augmente l'évaporation et dessèche les plantes, principalement pendant la saison sèche, le pouvoir évaporant de l'air est proportionnel à la racine carrée de la vitesse du vent, de plus, la capacité de rétention d'eau du sol est diminuée et conduit à un déficit hydrique, la masse d'air sec ambiant ou en mouvement a tendance à absorber toute l'humidité et à creuser le déficit de saturation,

or c'est ce déficit qui modèle le plus la végétation locale, car cette dernière doit s'adapter au manque d'eau sévère.

II.10 Accumulations éoliennes

Lorsque le vent faiblit, il perd sa force d'entraînement des particules sableuses, et ces dernières se déposent. Les formes d'accumulation sableuse sont très variées et dépendent de la topographie du terrain, de la nature du sol sur lequel elles progressent, de la présence ou non de végétation, et de la dimension des grains de sable.

Les principales formes d'accumulation rencontrées sont les voiles éoliens, les nebkas, les barkhanes, les dunes linéaires, les cordons longitudinaux, les dunes pyramidales, les aklés et les ergs.

II.10.1 Les voiles éoliens

Les particules de sable sont transportées sur des surfaces dures à topographie plane et uniforme, où elles forment des voiles sableux de plus ou moins grande épaisseur, qui constituent un danger permanent pour les villages, routes, voies ferrées et canaux d'irrigation, ce type d'accumulation éolienne est à l'origine de l'ensablement superficiel présent un peu partout dans le pays et il prend de l'extension suite aux défrichements, aux feux de brousse et au surpâturage.[34]

II.10.2 Les nebkas

Ces accumulations sont dues à la présence d'un obstacle rocheux, végétal ou autre sur la trajectoire des particules sableuses en mouvement, on distingue deux types de nebkas: les nebkas à flèche de sable, qui sont des formes dunaires ovoïdes de petites dimensions (50 cm de hauteur, 150 cm de longueur et 40 cm de largeur), allongées dans le sens du vent dominant et les nebkas buissonnantes, du même genre que les précédentes, mais pouvant atteindre 2 m de hauteur et 3 à 4 m de longueur.

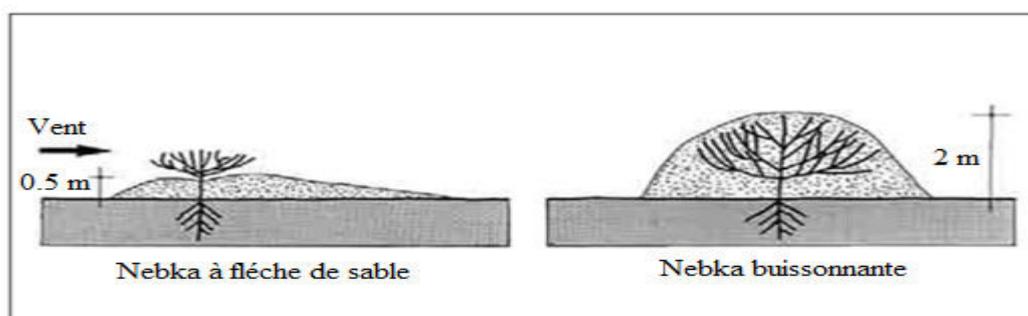


Figure II.7 Nebkas

II.10.3 Les barkhanes

Il s'agit de dunes massives en forme de croissant à convexité au vent, leur formation passe par plusieurs stades: le bouclier sableux, puis le bouclier barkhanique.

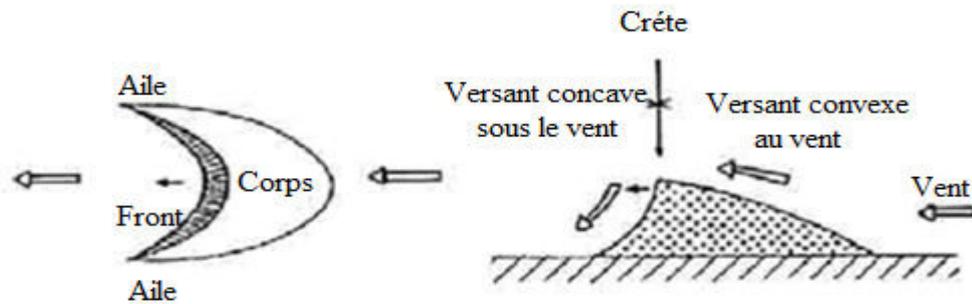


Figure II.8 Barkhanes

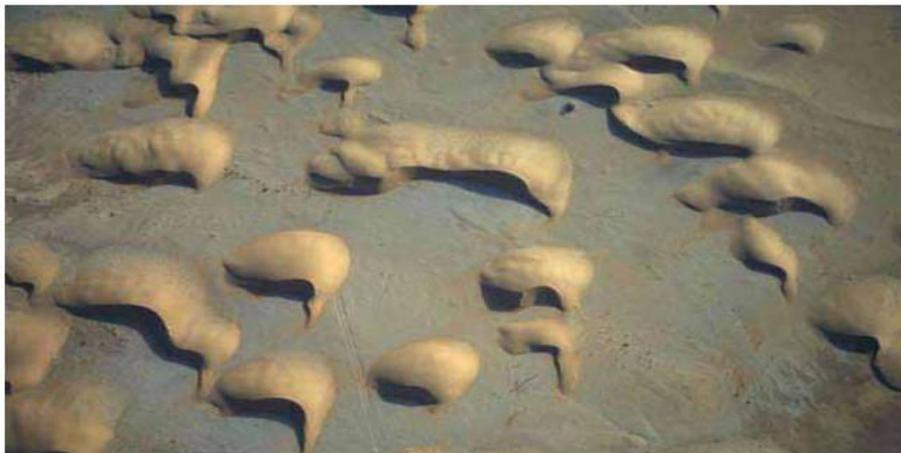


Figure II.9 Barkhanes isolées



Figure II.10 Champ barkhanique ou barkhanes jointives

suivi du dièdre barkhanique et enfin l'état de barkhane, en général, les barkhanes ne restent pas isolées; elles peuvent se rejoindre et former des ensembles complexes, allant des trains barkhaniques à de véritables massifs dunaires.

La migration des barkhanes requiert trois conditions: un vent constant monodirectionnel, une source de sable importante et de granulométrie allant de 0,12 à 0,25mm de diamètre, et une surface plane et dure, les barkhanes étant des constructions instables, mobiles et sans cesse remodelées par le vent, leur vitesse de déplacement peut atteindre plusieurs dizaines de mètres par an.[34]

II.10.4 Les dunes linéaires ou sifs

Les dunes linéaires sont des accumulations de sable, de forme allongée, étirées sur toute la longueur comme une épée (appelée sif en arabe) (figure II.11), la longueur est toujours de huit à dix fois plus importante que la largeur, en moyenne, ces dunes ont de 1 à 2 km de longueur et de 50 à 200 m de largeur, elles sont parfois réunies, et leurs formations peuvent mesurer de 20 à 40 km de longueur, par exemple le long de la route de l'espoir.

Ce type d'accumulation éolienne se produit dans un environnement aride parcouru par deux vents dominants de direction différente (nord-est et sud-ouest, par exemple) ou par un seul vent dominant dont les écoulements d'air ont été divisés par des irrégularités topographiques, la direction de ces dunes est oblique par rapport à la résultante des vents dominants, le mouvement d'une dune linéaire se fait par allongement, au fur et à mesure des nouveaux apports de sable par le vent.

Les cordons longitudinaux ou sand ridges, ces cordons sont des monticules sableux larges et volumineux, de forme longitudinale, situés côte à côte et séparés par des couloirs de déflation (figure II.11). Ils sont plus ou moins stables et peu mobiles, ils s'alignent dans la direction des vents dominants, contrairement aux dunes linéaires, qui sont obliques par rapport à la direction résultante annuelle, la déstabilisation de ces cordons est liée à la disparition du couvert ligneux et herbacé, ce type de formation peut être observé de chaque côté de la route de l'espoir, avec des cordons orientés nord-est sud-ouest. Les dunes pyramidales ou ghourds ,ce sont des collines de sable, souvent en forme de pyramide étoilée, pouvant atteindre plusieurs centaines de

mètres de hauteur (figure II.11). Elles naissent à la convergence de plusieurs flux éoliens et sont pratiquement stables et immobiles. Elles deviennent donc des sources de sable qui peuvent donner naissance à des barkhanes ou à des dunes linéaires.[35]

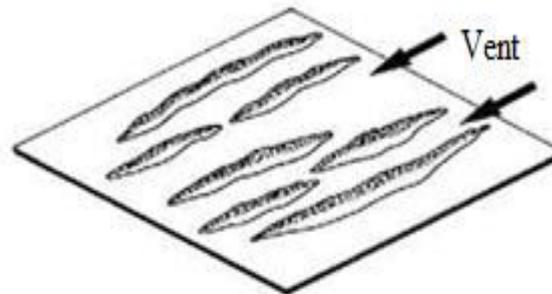


Figure II.11 Dunes linéaires

II.10.5 Les aklés

Ce type de formation, est un assemblage complexe de dunes qui se chevauchent (figure II.12).

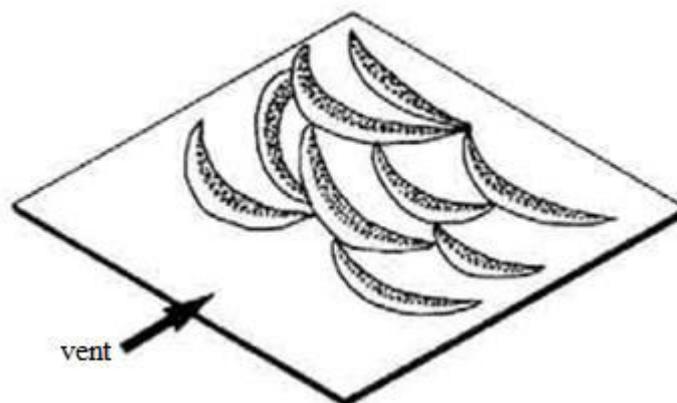


Figure II.12 Aklés

II.10.6 Les ergs

Il s'agit de vastes étendues couvertes de dunes, ce type de formation est très ancien (de 15 000 à 20 000 ans) et stable. Il ne présente aucun danger pour les agglomérations, le réseau routier ou les cultures.

II.11 Conclusion

Nous avons donné un aperçu sur la télédétection ainsi que les caractéristique physique et biologique des objets du point de vue cible et les caractéristique radiométriques du point vue satellite. Ce qui nous a permis de constater la richesse d'information que comporte l'image de télédétection et la complexité de l'acquisition de celle-ci pour ce faire.

II.12 Références

- [19] [ABDELLAOUI, A.](#) (2009), Potentialité de l'imagerie satellitale moyenne résolution pour le suivi du transport de sable en milieu urbain pré-saharien", Séminaire International : Dynamiques des paysages et Télédétection", Tunis, 9-13 juin 2009.
- [20] [Yves Baudot](#)(Nadar) « Le petite guide de la télédétection » EODesk,belgian Science Policy,2004
- [21] [ABDELLAOUI A.](#) 1996- Changements globaux et désertification, précis de télédétection volume 02 AUPELF_UREF pp . 535-569.
- [22] [POUCHIN T., 2001 a](#) - Elaboration d'un observatoire paysager, Application à l'estuaire de Seine. Centre Interdisciplinaire de Recherche en Transports et Affaires Internationales, Le Havre, Thèse de Doctorat, 316 p.
- [23] [GIRARD M. C.](#) et [GIRARD C. M.](#), (1999) - Traitement des données de télédétection. Ed. Dunod. Paris, 511 p.
- [24] [POUCHIN T., 2001 b](#) - Cours de télédétection. Université Le havre. France. p 44. l'estentionurbaine (wilaya de Djelfa). Mém. Ing. Centre universitaire de Djelfa, pp18-33 .
- [25] [Marc D'Iorio](#) Président , Société canadienne de la télédétection « Journal Canadien de la télédétection » (J C T),2000
- [26] [U.S. Geogical](#) Survey Earth Ressources Observation and Science (EROS) NOAA Satellite,2004, Télédétection – INRIA, Mars 2001

- [27] [FRYBERGER S.G.](#) 1979: Dunes forms and wind regime. In: McKee, E.D. (edition) A study of global sand seas. U.S. Geological survey Professional paper, pp. 137-169.
- [28] [BENALLA, M.](#) 1996. Érosion éolienne et ensablement dans le Tafilalet: cas des palmeraies de JorfHannabou et El Krai. Mémoire de géologie appliquée, Faculté des sciences, Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 48 p.
- [29] [MAUREL P.,](#) 2002 - Initiation à la télédétection – UMR Cemagref / ENGREF PP 5-39
- [30] [BENSAID A.](#) et [SMAHI Z.](#) 2003. Utilisation de la télédétection et des SIG pour l'aide à la surveillance du risque de dégradation des parcours steppiques. Revue Télédétection, n° 5, Vol. 3,ISSN : 1028-7736.
- [31] [Lillesand, T. M.](#) and [Kiefer, R. W.,](#) Remote Sensing and Image Interpretation (4th ed.), John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [32] [Richards, J.A](#) and [Jia X.,](#) Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction (3rd ed., Springer Verlag, New York), 1999.
- [33] [Sylvie Lardon,](#) Thérèse Libourel & Jean-Paul Cheylan. Concevoir la dynamique des entités spatio-temporelles. Revue internationale de géomatique, vol. 9, no. 1, pages 67–99, 1999.
- [34] [Jean-Paul Cheylan,](#) Denis Gautier, Sylvie Lardon, Thérèse Libourel, Helene Mathian, Serge Motet & Léna Sanders. Les mots du traitement de l'information spatio-temporelle. Revue internationale de Géomatique, vol. 9, no. 1, pages 11–23, 1999.
- [35] [Léna Sanders,](#) Denis Gautier & Hélène Mathian. Les concepts de système spatial et de dynamique, un essai de formalisation. Revue internationale de Géomatique, vol. 9, no. 1, pages 25–44, 1999.
- [36] [Haddouche idriss .](#) La télédétection et la dynamique des paysages en milieu aride et semi-aride En algerie : cas de la region de naâma, thèse doctorat page 128,2009, Université Abou-bekr Belkaid Tlemcen.

Chapitre III

Approche pour la modélisation spatio-temporelle

III.1 Introduction

Dans ce troisième chapitre nous présentons une synthèse des différents aspects de la modélisation spatio-temporelle qui ont retenu notre attention, en relation avec notre problématique. La première section est consacrée à la définition du temps et de l'espace et aux formalismes associés en informatique. La section suivante décrit des travaux portant sur la modélisation de l'information spatio-temporelle. Plus particulièrement nous cherchons à mettre en évidence la difficulté que peut représenter et particulièrement la gestion du changement au cours du temps de données à références spatiales la gestion d'une information attachée à des objets géoréférencés qui ne cessent de se transformer au cours du temps.

III.2 Le temps et l'espace

Commençons par présenter les différents objets qui sont à l'étude : le temps et l'espace et étudions les formalismes de représentation associés.

III.2.1 Le temps

III.2.1.1 Définitions

Le temps est un objet complexe pour l'homme comme l'exprime Saint Augustin, (Confessions, XI,14,17) : « Qu'est-ce que en effet que le temps ? Qui saurait en donner avec aisance et brièveté une explication ? Si personne ne me pose la question, je le sais ; si quelqu'un pose la question et que je veuille expliquer, je ne sais plus. »

L'homme accorde souvent des propriétés au temps qui sont celles des phénomènes qu'il observe au cours du temps. Par exemple, il envisage le temps comme étant cyclique, parce qu'il observe des phénomènes qui se répètent à intervalles réguliers. En vérité, la physique moderne retient que le temps est linéaire et orienté, pour respecter le principe de causalité, énoncé par Leibniz « tout événement est l'effet d'une cause qui l'a précédé ». Or, la seule façon de garantir ce principe est de choisir un temps linéaire qui protège les événements du passé de toute modification ultérieure. Le temps s'écoule donc du passé vers le futur : il est orienté.

Dans cette perspective, deux approches pour la représentation du temps sont utilisées :

– La conception newtonienne, avec un temps absolu qui n'a qu'une dimension, et qui donc est représenté par une courbe à une dimension. C'est un flux mesurable et quantifiable par des

dates dont la précision s'exprime en unités qui varient en fonction des usages (siècles, années, mois, jours, heures, minutes, ...).

– La conception de Leibniz qui appréhende le temps par la succession des événements afin de déterminer des séquences exprimées sur une échelle ordinale (quelque chose se passe avant, pendant, ou après autre chose).

Ces deux conceptions peuvent donner lieu à la production de structures quantitatives (temps mesuré et positionné avec sa coordonnée sur l'axe temporel) et/ou qualitatives (temps représenté par des événements ordonnés selon leurs positions relatives (i.e. leur topologie)) [37].

Les deux structures peuvent se combiner, si d'une part une mesure du temps est établie et que, d'autre part, une algèbre définit les relations topologiques entre ces mesures. Lardon, Libourel et Cheylan [51] font cependant observer que l'irréversibilité du temps et « l'unicité de sa ligne » ne sont pas nécessairement vérifiées dans tous les domaines d'applications. Des hypothèses multiples sur le futur comme sur le passé peuvent conduire à des structures de temps embranché. De même, l'étude des cycles naturels, biologiques ou sociaux peut conduire à des représentations alternatives du temps, de forme cyclique.

Il convient donc de garder à l'esprit que la conception linéaire, orientée et unique du temps qui sera employée par la suite correspond à nos besoins, mais n'est pas universelle. Raisonner sur le temps concernant la structure ordinale du temps, les travaux de Allen [38] fondent une algèbre temporelle permettant de définir des relations topologiques entre objets datés.

Dans une vision linéaire continue et non bornée du temps, le temps est structuré en un ensemble d'intervalles I_i , un intervalle I étant une paire ordonnée de points (des instants). Il munit cet espace temporel d'un ensemble de treize relations binaires et mutuellement exclusives qu'il peut appliquer à ces intervalles (avant, rencontre, égal, chevauche, débute, pendant, termine et leur réciproque), voir figure III.1. Ces relations permettent de répondre à des questions sur la proximité temporelle de deux phénomènes, à condition d'employer pour les intervalles la même granularité.

soit X_1 et X_2 deux intervalles temporels définis par les dates a, b, c et d , $X_1=[a,b]$, $X_2=[c,d]$

| Nom de la relation | Contrainte | Réciproque |
|-----------------------------------|----------------------|---------------|
| Avant : X_1 est avant X_2 | $b < c$ | Après |
| Rencontre : X_1 rencontre X_2 | $b = c$ | Rencontré par |
| Egal : X_1 est égal à X_2 | $a = c \wedge b = d$ | / |
| Chevauche : X_1 chevauche X_2 | $d \wedge b$ | Chevauche par |
| Débute : X_1 débute X_2 | $a = c \wedge b < d$ | Débute par |
| Pendant : X_1 est pendant X_2 | $c \wedge d$ | Englobe |
| Termine : X_1 termine X_2 | $b = d \wedge c < a$ | Termine |

Figure III.1 : Relations entre intervalles temporels, d'après [37].

Dans [37], le temps est défini ainsi : Un milieu indéfini où paraissent se dérouler irréversiblement les existences dans leur changement, les événements et les phénomènes dans leur succession. Donc formaliser le temps c'est aussi définir les changements et les événements qui se produisent dans l'espace géographique étudié [37], précise que le changement ne se produit qu'à la condition que, pour une proposition P et des instants distincts t et t' , P soit vraie à t , mais fausse à t' . Grossièrement, un changement peut être simplement défini comme une différence significative d'état pour l'objet d'étude (la propriété P de la définition) qui peut être tangible, un mouvement de sable par exemple, entre deux moments d'observation distincts.

Pour le changement, qui est un terme générique, deux notions se distinguent : celle d'évolution ou bien celle de mutation. L'évolution, selon [37], caractérise dans son sens premier un changement graduel dans le temps, marqué par une suite d'états différents observés. Mutation est utilisée plutôt pour qualifier un changement brusque, où la granularité temporelle de l'observation ne permet pas l'étude des états intermédiaires. Il est à noter également que le terme « mutation » possède un sens un peu différent dans le contexte de la programmation orientée-objet : il signifie alors changement de classe.

La mutation signifie alors qu'un objet typé suivant une classe change de type au cours de son existence. Là aussi la durée de ce changement n'est pas explicitée, ni la description de la phase transitoire, si elle existe.

Dans sa définition classique [37], un évènement est forcément bref à l'échelle temporelle considérée. De même, en UML, la notion d'évènement intervient dans les diagrammes d'Etat-Transition, et un évènement peut être la cause d'une transition qui sera toujours de durée nulle. Cependant, les travaux de Galton [37], mettent en évidence qu'un évènement est également un objet, dont l'emprise spatio-temporelle est celle des objets impliqués dans l'évènement. Il définit en effet un évènement comme un épisode borné dans le temps qui produit des effets remarquables sur un objet, ou un groupe d'objets localisés, ou un endroit du monde. Un évènement est instantané (marqué par un instant) ou dure dans le temps (marqué par un intervalle temporel), mais ceci dépend de l'échelle d'observation.

Par exemple, à l'échelle du siècle, une inondation est vue comme un évènement ponctuel, alors que durant les jours de l'inondation, l'inondation est un évènement qui dure. De plus, Galton observe que les évènements peuvent aussi être composés de sous-évènements, de granularité plus fine.

Il introduit l'objet temporel pour généraliser la notion d'évènement (ou processus, qu'il considère comme des synonymes), et ainsi l'histoire du monde se formule alors sous la forme d'une succession d'évènements, ou chronique. Formaliser le temps avec des évènements nécessite une algèbre appropriée pour raisonner : Allen et ses collègues, [40], proposent également une algèbre pour traiter des évènements. Ils généralisent les relations proposées pour les intervalles temporels avec le postulat suivant : les évènements sont une durée non nulle, et donc ils peuvent être modélisés sous la forme d'intervalles temporels.

III.2.1.2 Mesurer le temps

La mesure du temps présuppose de définir un référentiel et des unités. En effet, le temps est un phénomène continu, mais qui ne peut être enregistré sur un support informatique qu'après échantillonnage, à cause de limitations physiques évidentes. Cette discrétisation du temps obligatoire conduit à introduire la notion d'intervalle temporel, qui définit la durée d'observation du phénomène étudié (par exemple, cinquante ans), ainsi que la notion de résolution temporelle, correspondant à la fréquence d'observation du phénomène : l'année par exemple dans le cadre des recensements de population. La résolution temporelle définit l'unité élémentaire de temps, ou chronon [41], qui va permettre d'évaluer la durée des phénomènes observés en dénombrant le nombre de chronons inclus dans l'intervalle d'observation.

Approche pour la modélisation spatio-temporelle

Le chronon pourra être la seconde, le jour, l'année, etc, en fonction des besoins de l'utilisateur du modèle. La figure III.2 illustre, par exemple, comment un même intervalle temporel peut être mesuré suivant différents niveaux de résolution (ou granularité).

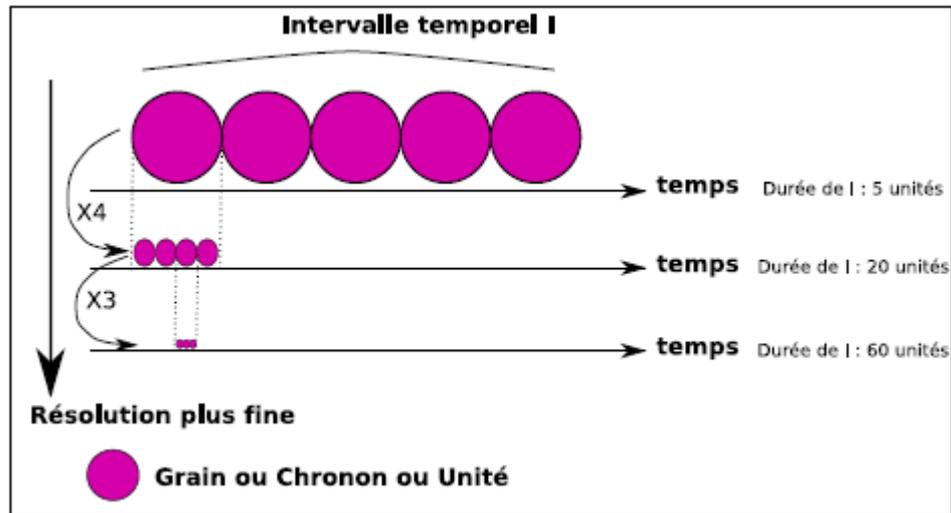


Figure III.2 : Différents niveaux de résolution pour mesurer la durée d'un intervalle temporel I.

La granularité dépend des données, et du niveau de précision utilisé au moment de la capture du phénomène.

Selon le contexte d'utilisation de données temporelles, il est parfois nécessaire de convertir les données au même niveau de granularité. Les travaux se rapportant à cette problématique, [39], proposent généralement de dater les entités au niveau le plus fin que l'usage requiert, et d'utiliser ensuite les fonctions de congruence entre les différents niveaux de granularité pour leur conversion. Par exemple, supposons que le système requiert parfois une précision des données en mois, mais que généralement l'année suffise, alors toutes les données peuvent être enregistrées avec le mois comme précision, mais traduites en années, sachant que douze mois constituent une année.

Cependant, le temps (la date, l'heure) est rarement exprimé naturellement sous ce format, et l'homme utilise plutôt le Temps Universel Coordonné ou Coordinated Universal Time en anglais (UTC) comme échelle de temps. Le temps UTC, adopté comme base du temps civil international par la majorité des pays du globe, se base sur le Temps Atomique International (TAI), mais en diffère par un nombre fini de secondes. L'existence de ces deux échelles s'explique par le fait qu'à l'échelle humaine, le déroulement du temps est perçu depuis l'antiquité (et même avant), via les changements de position du Soleil dans le ciel

Approche pour la modélisation spatio-temporelle

provoqués à la fois par la rotation de la Terre sur elle-même, et par son parcours elliptique autour de l'astre. Et donc naturellement, l'homme est capable de repérer la succession des jours et des nuits, des saisons, et des années.

Enfin, il faut encore préciser que l'horaire mesuré par une horloge solaire, et perçu par l'homme, diffère suivant sa localisation. En effet, lorsque pour les positions situées sur le méridien de Greenwich il est midi, heure UTC, et le soleil est à son zénith, il est minuit, heure UTC pour les positions situés sur le méridien opposé à 180° , c'est la pleine nuit. Donc un autre décalage a été introduit en vue de décrire les activités quotidiennes en fonction d'horaires harmonisés : il fait jour à midi, pour tous, dans toutes les localisations, lorsque l'heure est ajustée sur le fuseau horaire de la localisation.

Ce système a été proposé par l'ingénieur et géographe montréalais Sir Sandford Fleming en 1876, avec le méridien de Greenwich comme origine des temps, la ligne de changement de date au méridien 180° (est et ouest), et en divisant le globe en 24 fuseaux horaires de même taille. La zone couverte par un fuseau, limitée par deux méridiens distants de 15° , s'étend du pôle nord au pôle sud ; elle est centrée sur un méridien dont la longitude est multiple de 15° . Le premier fuseau est centré sur le méridien de Greenwich. En pratique, les fuseaux servent à définir l'heure légale dans un Etat, et un découpage raffiné en 43 zones horaires est utilisé.

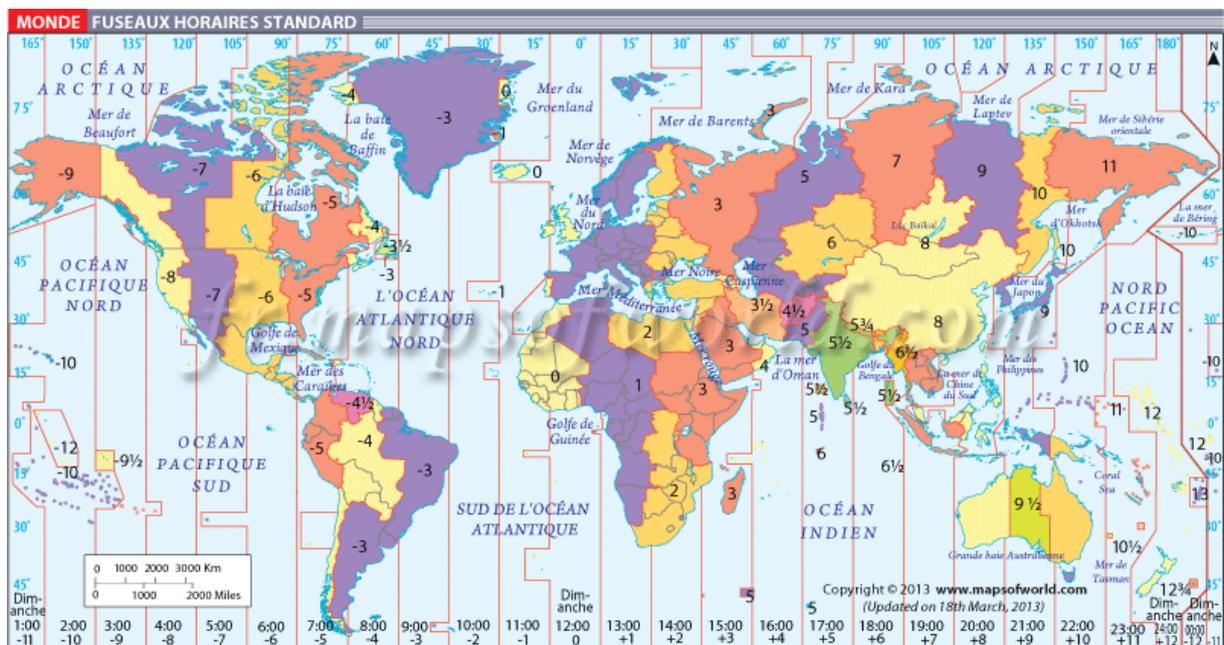


Figure III.3 – Les fuseaux horaires et le temps UTC.

Au passage d'un fuseau à l'autre, l'heure augmente ou diminue d'une unité, (voir figure III.3). De façon simple, un fuseau horaire peut être écrit sous la forme UTC+X ou UTC-Y, où « X » et « Y » représentent le décalage du fuseau par rapport à UTC. Ainsi, la mesure du temps peut-être restituée sous la forme d'une date (un instant sur la ligne temporelle) qui exprime la durée écoulée depuis un moment de référence.

Il existe un nombre conséquent de calendriers qui adoptent d'autres instants de référence, par exemple, le temps dans les systèmes informatiques est lui calculé depuis le premier Janvier 1970 : l'origine de cette date vient des normes de l'IEEE qui ont standardisé l'interface de programmation de la famille de système d'exploitation UNIX. Ce compteur est universel et international : il ne compte pas les changements d'heures ni de fuseaux horaires, ce qui est pratique en informatique pour comparer des dates ou pour certains calculs. Il est appelé times tamp. Le times tamp est un mot composé venant de l'anglais « time » (heure) et « stamp » (marquage par un timbre ou un tampon) : le terme désigne donc la notion d'« estampille temporelle ».

Ce temps système est généralement fourni avec une précision de l'ordre de la milliseconde (ms). Les différents points de vue sur le temps dans les bases de données, le temps est utilisé suivant plusieurs points de vue - le temps est dit « multidimensionnel », [41] - car il peut être :

- Le temps de validité
- Le temps de transaction
- Le temps utilisateur

Le temps de validité correspond à la réalité des faits. Il peut être représenté par un intervalle de validité attaché à une entité du monde réel, dont la signification est la suivante : entre les deux instants qui bornent cet intervalle, l'entité a réellement existé. L'intervalle peut-être défini soit par la date de début de l'intervalle et sa durée, soit par les dates de début et fin. Le temps de transaction correspond, lui, au temps d'enregistrement des valeurs dans le système informatique.

Conserver ce temps est très important pour le versionnement des données. En effet, les données d'un système d'information en général peuvent être sujettes à des révisions. C'est le cas en particulier des publications des variables statistiques dont les instituts statistiques publient des révisions et des ré-estimations pour une même période de validité. Pour la qualité et la reproductibilité des expériences menées avec les données, il est essentiel de ne pas simplement écraser les données présentes dans le système avec les données mises à jour pour

un même temps de validité. Ainsi, les systèmes d'information doivent aussi gérer le temps de transaction. Bien que la prise en compte simultanée du temps de transaction et du temps de validité soit un problème difficile, [40], il existe plusieurs les travaux (ceux de Snodgrass, [43], Jérôme [42], ou Worboys, [45]) qui intègrent la gestion des deux types de temps dans un système d'information, dit bi-temporel.

Le temps utilisateur concerne toute autre interprétation que le temps de validité ou des transactions : ce peut être le temps réel pour parler du moment où un phénomène survient, le temps perçu (celui où il est observé), ou le temps d'usage (celui où la donnée est utilisée pour réaliser un traitement).

III.2.2 L'espace

Cette section présente le vocabulaire relatif à l'espace, compris comme étant l'espace géographique, et introduit les principaux concepts et modèles informatiques permettant de produire une représentation de l'espace géographique dans un système d'information géographique.

III.2.2.1 Définitions

Dans [44], l'espace géographique est défini comme l'ensemble de lieux et de relations entre les lieux, définies par les interactions entre des acteurs sociaux localisés. Il est le produit de l'organisation des sociétés et de la nature, et l'agent du maintien et du développement des sociétés sur leur territoire.

Comme pour l'espace de la physique, il y a deux manières d'envisager l'espace géographique pour le concevoir et le représenter :

- Soit comme un simple contenant, repère immuable dans lequel on situe les objets et analyse leurs relations : c'est l'espace-support, ou espace absolu. Il est isotrope et homogène, c'est-à-dire qu'il a les mêmes propriétés dans toutes les directions.
- soit comme un ensemble de relations dont les propriétés, variables dans le temps et dans l'espace, sont définies par la nature et la forme des interactions entre les objets et les unités spatiales : c'est l'espace relatif ou espace-produit.

Cependant, les zonages sont sujets à recompositions. En outre, ils reflètent une organisation humaine de l'espace en constante évolution, mais aussi anisotrope par nature. L'espace est marqué par des similarités, des pôles d'attractivité et des zones de discontinuités (culturelle, linguistique, économique) [45]. Ce problème est développé par Brunet [46].

L'objectif de l'analyse spatiale, qui est défini dans [44] comme « l'analyse formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace géographique, tel qu'il est produit et vécu par les sociétés humaines » est justement d'étudier cette anisotropie. Cette anisotropie peut aussi être expliquée par les sciences sociales du comportement, qui décrivent les processus de compétition ou communication entre les humains, processus qui s'inscrivent à la fois dans le temps et l'espace.

Ainsi, dans une tentative de définition d'un nouveau paradigme pour l'organisation spatiale des sociétés [47], Villeneuve rapproche la géographie du comportement de l'analyse spatiale à travers le concept de proximité optimale, qui s'explique comme la réponse au principe général de survie et aux contraintes que l'espace invariant définit. Les décisions individuelles ou collectives seraient un compromis entre les tensions centrifuges (les processus de compétition, au niveau biotique) et les tensions centripètes (les processus de communication, au niveau culturel) qui engendrent le principe fondamental d'organisation des formes spatiales. Lorsque l'étude des formes spatiales porte sur les zonages, il apparaît qu'en réalité leur forme est étroitement liée au peuplement, et qu'ils matérialisent les frontières et les zones de discontinuités (linguistique, culturelle, économique) que l'occupation humaine produit. Cette observation s'applique aussi dans le cas de l'étude des maillages, [50], qui sont une forme particulière de zonage, définissant une partition complète et totale de l'espace. Les zonages ne sont donc en aucun cas une représentation de l'espace isotrope ou homogène. Nous envisageons donc ici l'espace comme un espace-produit.

Cet espace-produit est lui-même modélisé et analysé selon plusieurs niveaux de granularité le terme échelle spatiale est employé. Contrairement au temps, où l'unité élémentaire a pu être établie (la seconde), il n'existe pas, pour l'espace, de grain élémentaire consensuel ou naturel, [49]. L'échelle au sens premier se définit comme un ensemble ordonné de grandeurs.

L'échelle spatiale est donc un ensemble ordonné de grandeurs spatiales. En parlant d'échelle, il est toujours fait référence à l'échelle de résolution spatiale. Cependant, celle-ci peut être comprise comme l'échelle de représentation, ou bien le niveau d'observation et d'analyse. Pour l'échelle de représentation, il faut utiliser un nombre qui exprime le rapport entre une distance sur la représentation et une distance réelle, dans la même unité de distance.

Ainsi, dire qu'une carte est au 25 000 millièmes signifie qu'un centimètre sur la carte représente 25 000 centimètres dans la réalité. Par contre, l'échelle d'observation (ou niveaux d'analyse) sous-tend l'usage d'une structuration de l'espace en niveaux hiérarchiques

- ✚ le niveau micro : la maison, la rue, le quartier
- ✚ le niveau méso : le canton, le pays, la région, l'état
- ✚ le niveau macro : cadre national, supranational (comme l'Europe) et mondial toute portion de l'espace terrestre peut donc être observée et étudiée à différents niveaux de détails.

L'approche pour l'étude de l'espace (en tant qu'espace-produit) et de ses évolutions sera également celle de l'analyse spatiale, qui postule que les caractéristiques d'un lieu dépendent des relations de proximité de ce lieu par rapport à d'autres lieux, [44]. La proximité est évaluée par la distance, qui est une notion géographique fondamentale. Les travaux de nombreux géographes mettent en exergue le rôle que la distance peut avoir sur la compréhension de la spatialisation des phénomènes sociaux, des échanges et des flux [50]. Ces études dérivent directement de la première loi de géographie édictée par Tobler, en 1970, [59],[60] : « Tout interagit avec tout, mais deux objets proches (spatialement parlant) ont plus de chance de le faire que deux objets éloignés. ».

Cette notion d'espacement ne respecte pas forcément les propriétés d'une distance mathématique.

En effet, la distance mathématique entre deux points A et B est une mesure toujours positive,

$d(A,B) > 0$, qui :

- ✓ Est nulle seulement si A est confondu avec B : $d(A,B) = 0 \iff A = B$;
- ✓ Vérifie l'inégalité triangulaire entre 3 points A,B,C : $d(A,C) \leq d(A,B) + d(B,C)$.
- ✓ Est symétrique : $d(A,B) = d(B,A)$.

Or, les relations de distance entre unités géographique ne sont pas forcément symétriques, et par exemple, le temps mis par un routier pour atteindre Oran en partant de Saida n'est pas identique au temps de retour. Ceci tient au fait que l'espace géographique n'est pas isotrope. En fait, en géographie, ce sont des mesures d'éloignement que, par commodité, on continue d'appeler distance, [44]. La contiguïté est un cas particulier de cette mesure d'éloignement qui peut être utilisé dans le cadre d'une space maillé : entre deux unités A et B, la mesure vaut 1 (vrai) si elles se touchent, 0 (faux) sinon.

III.2.2.2 Représentation quantitative de l'espace dans les systèmes informatiques

Concrètement, pour représenter l'espace, il faut considérer que les objets du monde, qu'ils soient tangibles (forêt, ville, rivière) ou intangibles (frontière d'un pays, centre du monde,

l'Atlantide) ont une position (ou empreinte spatiale) géographique. La représentation de l'espace fournit des modèles pour l'enregistrement des positions de ces objets, qu'elles soient qualitatives comme dans « le restaurant est à gauche de la bibliothèque, non loin de l'arrêt de tram » ou bien quantitatives comme dans « Béchar est situé à 25°31' et 25°41'30'' Nord, 28°46'30'' et 29°2' Est sur la surface du globe ».

Ces modèles de représentation de l'information spatiale peuvent être classés selon trois niveaux : le niveau géométrique, le niveau informatique, et le niveau utilisateur, [53].

- Au niveau géométrique, les objets spatiaux sont modélisés comme des objets mathématiques (points, courbes, surfaces) dont les relations topologiques peuvent être explicitement formalisées : les objets surfaciques se touchent ou bien ne se touchent pas par exemple, ou un point est dans une surface, sur la frontière de la surface, ou en dehors de cette surface, le niveau géométrique peut être considéré comme le niveau le plus primitif pour l'étude des relations spatiales, puisqu'il permet de retrouver des définitions formelles, et peut être considéré comme sans erreur [54].

– Au niveau informatique, les objets spatiaux sont représentés comme des types de données spatiaux et les relations spatiales entre les objets sont, en général, calculées par des opérateurs spatiaux. La représentation des objets géographiques à ce niveau est intrinsèquement concernée par l'approximation car les objets réels sont représentés avec un modèle simplifié, et il peut exister plusieurs descriptions du même objet selon des niveaux de précision différents [55]. Le degré d'incertitude qui en découle est une question de recherche en cours, loin d'être résolue [54]. Par exemple, certaines approches proposent de modéliser l'incertitude dans la frontière des objets comme une bande bidimensionnelle autour de l'intérieur des objets [56], [57], afin de continuer d'utiliser les mêmes modèles pour les relations topologiques définies au niveau géométrique.

– Au niveau utilisateur, les objets et les relations spatiales sont liés à un contexte spécifique d'application, et décrivent souvent l'espace via des termes flous qui varient énormément selon les différents pays et langages. Par exemple, "le restaurant est à gauche de la bibliothèque, non loin de l'arrêt de tram" est une représentation de l'espace du niveau utilisateur. Le terme « non loin » renvoie à l'appréciation que l'utilisateur a de la distance : des mètres, des dizaines de mètres, des centaines de mètres, etc. Le terme « à gauche de » réfère à un positionnement relatif dans un certain contexte, qui n'est pas toujours spécifié. C'est pourquoi il est difficile de transférer les relations spatiales définies au niveau utilisateur au niveau

géométrique. Il existe des travaux visant à définir les concepts spatiaux à l'aide d'ontologies spatiales [65], [66], mais cela reste encore un domaine ouvert de la recherche.

III.2.2.2.1 Capturer une position

Généralement, les lieux géographiques à la surface de la Terre sont repérés par un couple de nombres réels (latitude, longitude). La figure III.4 montre comment la latitude et la longitude sont calculées, en considérant que la Terre est sphérique. Tous les lieux d'un même parallèle à l'équateur ont la même latitude. La latitude des lieux situés sur l'équateur est 0° (zéro degré). La latitude des pôles est 90° Nord pour le pôle Nord et 90° Sud (ou -90°) pour le pôle Sud. Tous les lieux situés sur un même méridien ont la même longitude. Le méridien de référence passe par Greenwich : sa longitude est 0° . Tous les autres méridiens sont mesurés en prenant ce méridien comme origine, avec une notation négative de l'angle en allant vers l'ouest par rapport au méridien de référence.

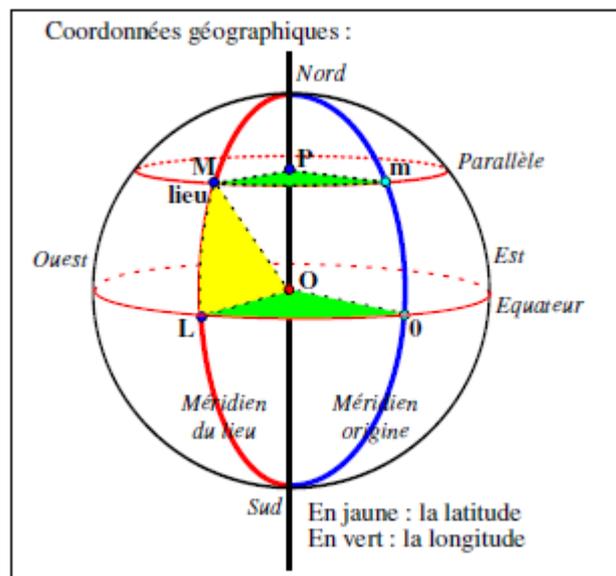


Figure III.4 : Système de coordonnées géographiques pour localiser un lieu.

Les systèmes d'information géographiques peuvent stocker ces données « brutes », Cependant, l'objectif est d'en donner une représentation planaire dans un repère cartésien orthonormé (la carte papier, ou l'écran de l'ordinateur). Aussi, ces données brutes sont le plus souvent projetées (à l'aide d'un système de référence) sur un plan, auquel est associé un repère orthonormé. La projection est un problème à la fois mathématique et de représentation,

car suivant le mode de projection utilisé, certaines surfaces seront plus ou moins déformées (dans leur forme ou leur distance relative).

Ainsi, Il existe de nombreux modes de projection, dont certains sont référencés et manipulés aisément dans les SIG, de façon standardisée. Ainsi, par exemple, l'EPSG (European Petroleum Survey Group, créé en 1985) propose une base de données mondiale ouverte à tous des systèmes de coordonnées géoréférencés de projection, les codes EPSG, qui sont utilisés aussi bien par le groupe de producteurs de pétrole EPSG que par de nombreux logiciels de SIG. Ces codes (environ 3750), sont notamment utilisés dans les standards de l'Open Geospatial Consortium (OGC), et peuvent facilement être importés dans une table dédiée d'un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) relationnel.

De même, l'IGN propose une extension de cette base de données avec des codes spécifiques pour le territoire français, [71]. Via cette table, et des fonctions de conversion intégrés à des bibliothèques, il est aisé de réaliser les opérations de conversion d'un système de projection à l'autre.

Il faut retenir, qu'en réalité, à toute représentation spatiale d'un objet dans un espace cartésien, il est nécessaire d'associer le système de coordonnées géoréférencés de projection utilisé.

III.2.2.2.2 Mesurer des distances

L'espace est donc le plus souvent modélisé sous la forme d'un espace euclidien vectoriel, sous-ensemble de R^2 (ou R^3 , si l'altitude est prise en compte), Dans le cadre d'utilisation de SIG on utilise un espace à 2 dimensions, dont la surface est supposée plane. Dans les SIG, cet espace euclidien planaire est généralement muni de la distance euclidienne ayant les des propriétés mathématiques. L'unité étalon est le mètre (symbole, du gre-metron, mesure), défini par le Bureau International des Poids et Mesure, depuis 1983 [72], comme « la distance parcourue par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 secondes ».

Dans le cadre d'une représentation des coordonnées géographiques dans un repère cartésien, la distance euclidienne est la plus évidente pour calculer la distance entre deux points à la surface de la Terre. Dans un espace euclidien orthonormé de dimension 2, la distance d_{AB} entre deux points A et B de coordonnées respectives $(X_A; Y_A)$ et $(X_B; Y_B)$ est donnée par la formule III.1 :

$$d_{AB} = \sqrt{((X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2)} \quad \text{(III.1)}$$

Cependant, il convient de noter que, du fait des déformations induites par les différents modes de projection, et de la rotondité de la Terre, ces mesures de distance sont fausses dès lors que les points mesurés sont très écartés à la surface de la Terre (par exemple, d'une extrémité de l'Europe à l'autre).

La distance orthodromique, qui se base sur des coordonnées géographiques non projetées permet elle de donner une mesure de la distance « à vol d'oiseau » juste. En posant R comme étant le rayon terrestre (soit 6378 kilomètres, rayon équatorial moyen), la distance d_{AB} entre deux points A et B de coordonnées géographiques (la longitude et la latitude sont exprimées en radian) respectives $(LongA, LatA)$ et $(LongB, LatB)$ est donnée par la formule III.2 :

$$d_{AB} = R * \arccos(\cos(LatA) * \cos(LatB) - \cos(LongA - LongB) + \sin(LatA) * \sin(LatB)) \quad (III.2)$$

L'emploi de la distance orthodromique implique l'usage de fonctions mathématiques coûteuses comme arcsinus, et c'est pourquoi les systèmes d'information géographiques privilégient souvent l'emploi de la distance euclidienne pour des études dont l'emprise spatiale ne couvre pas un trop grand espace géographique.

La question de la distance, lorsqu'elle est interprétée comme une mesure d'éloignement et non plus seulement comme une distance mathématique, reste cependant épineuse, car, comme il a été dit précédemment, la distance euclidienne ou orthodromique ne tiennent absolument pas compte de la réalité géographique du terrain, qui est anisotrope. Le franchissement de rivières ou de montagnes, par exemple, peut impliquer pour les humains des détours sur un chemin reliant une origine A et une destination B , dont ces distances ne tiennent pas compte dans leur mesure de la longueur du segment $[AB]$. La distance temps, la distance perçue, l'accessibilité, sont d'autres formes de mesure de la proximité de deux lieux.

Les distances mesurées en temps de parcours, ou en coûts, sont souvent bien plus expressives des situations géographiques, du point de vue de leur signification sociale [67]. Ces nouvelles distances sont utilisées pour calculer des projections des lieux, qui, comparées aux projections topographiques usuelles, font ressortir par des « déformations », les couloirs privilégiés par la grande vitesse, en quelque sorte rétrécis, ou au contraire les zones enclavées qui apparaissent dilatées. Les transformations cartographiques, par anamorphose ou par d'autres procédés faisant appel à des géométries complexes, sont ainsi très employées en géographie des transports ou pour des cartes cognitives [73].

Il faut remarquer que ces mesures de proximité sont variables dans le temps : par exemple, les distance-temps entre un lieu situé en périphérie urbaine et le centre urbain d'une même ville sont soumises à des variations horaires : aux heures de transfert entre domicile et travail de la majorité des actifs, un ralentissement du trafic urbain rallonge la distance perçue entre les lieux.

III.2.2.3 Représenter des formes

L'espace étant muni d'une métrique mesurant la distance entre les différentes entités qui le peuplent, et leur position réelle étant connue, il reste à expliquer comment elles sont représentées dans un système informatique. Deux modes de représentation de l'information spatiale se distinguent : le mode matriciel, ou « raster », et le mode vectoriel. La figure III.5 montre le type d'image produite par les deux types de représentation.

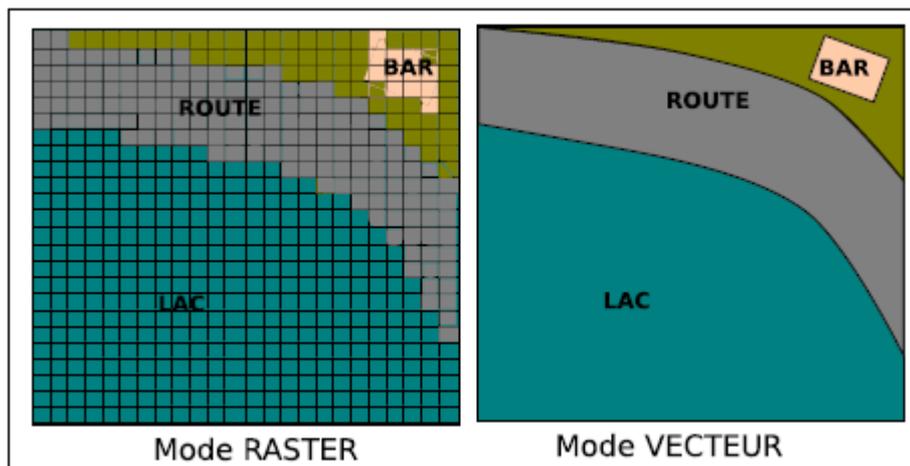


Figure III.5 : Système de coordonnées géographiques pour localiser un lieu.

En mode « raster », une surface est représentée par un ensemble de cellules, également appelées pixels, dotées d'une couleur et une luminosité donnée. Chaque pixel de coordonnées (i;j) représente une surface, à laquelle des attributs thématiques sont rattachés (population, type d'occupation du sol). Le modèle matriciel sert à représenter aussi bien des variables qualitatives (utilisation du sol, type de forêt, etc.) que quantitatives (réflectance, pente, drainage, etc.). Avec ce type de représentation, la résolution dépend de la taille de la cellule et la topologie est toujours représentée implicitement. L'avantage est que les opérations sur les

surfaces sont aisées (calcul d'aire, superposition de couches). Etant une définition de l'espace en extension, le modèle matriciel peut générer de gros volumes de données.

La qualité graphique des images produites est dépendante de l'échelle de représentation. En particulier, en augmentant la résolution de l'image, ou bien la surface couverte par cette représentation, le volume de données augmente de façon quadratique. En mode vectoriel, la surface contient des objets géographiques, qui sont définis chacun par leur description géométrique : points, lignes, polygones, (formes géométriques élémentaires), ou une combinaison de ces formes élémentaires.

À chaque entité représentée est attaché un ensemble d'attributs descriptifs: des variables qualitatives ou bien quantitatives, comme en mode raster.

En effet, les objets peuvent être observés à différents niveaux de granularité (ou échelles), et cette granularité affecte le type de la géométrie utilisée pour représenter la position de l'objet. En effet, de loin, une ville peut se résumer à un point, mais en zoomant, à plus grande échelle, les formes de la ville se dessinent elle occupe alors une surface non nulle, elle est alors mieux représentée par un polygone par exemple. Il peut donc exister plusieurs représentations d'un même objet géographique, qui dépendent à la fois de l'usage souhaité et du niveau de généralisation de l'objet, [63], mais aussi du niveau d'analyse de l'espace considéré [64].

Le modèle raster est particulièrement utilisé comme fond de carte car il réussit à communiquer beaucoup d'informations. L'avantage du modèle vectoriel est qu'il est plus adapté à l'abstraction et au raisonnement sur les positions relatives des objets. Les principaux acteurs commerciaux du domaine des SIG proposent des systèmes permettant de représenter des formes spatiales, que ce soit en mode raster ou bien en mode vectoriel. Parmi les produits commerciaux, les suivants sont les plus largement répandus :

- La geodatabase d'ArcGIS 9 qui est vendue par ESRI.
- Le SIG MapInfo 10, qui est vendu par Pitney Bowes Business Insight.
- Oracle Spatial 11 qui est une extension spatiale du SGBD Oracle 11g vendu par Oracle.

Cependant, les primitives géométriques qui sont utilisées pour modéliser l'information spatiale en mode vectoriel diffèrent suivant ces outils, tout comme les opérateurs proposés pour manipuler les données. Par exemple, MapInfo utilise le type région pour décrire une collection de polygones, alors que Oracle Spatial n'utilise pas de type particulier pour les collections de polygones, mais distingue en revanche le rectangle (rectangle) comme un type

particulier de polygone. De même, les collections de polygones exportées dans le format propriétaire ShapeFile d'ArcGIS sont spécifiées comme étant des objets de type Polygone M ; ce format propose également le type MultiPatch pour représenter des collections d'objets de différents types.

Concernant les relations cardinales par exemple, Frank définit une représentation basée sur un ensemble de symboles définissant les valeurs que peuvent prendre les relations, un ensemble d'opérations applicables à ces relations et enfin un ensemble d'axiomes définissant les résultats des opérations [43]. Il propose également plusieurs découpages de l'espace pour établir des relations comme dans la figure III.6.

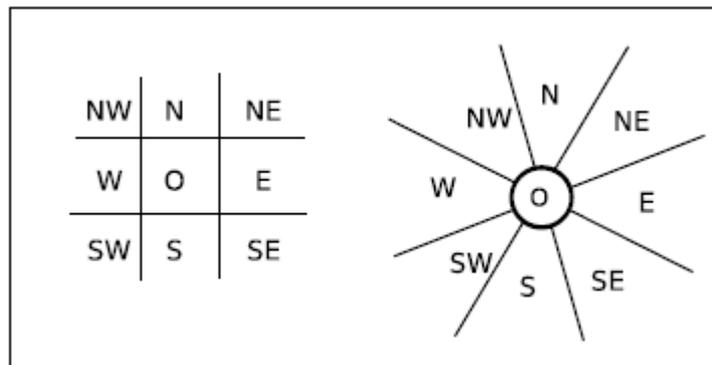


Figure III.6 : Division de l'espace suivant une projection et suivant des secteurs angulaires, d'après [43].

III.3 Mettre en correspondance le temps et l'espace

Un nombre important d'études ont été menées pour modéliser et représenter l'information géographique dans toutes ses dimensions, spatiales et temporelles, montrant que les aspects cognitifs liés à la compréhension humaine de l'espace géographique sont difficiles à maîtriser [67]. En effet, l'espace dans lequel nous vivons est un continuum, mais la mesure de cet espace rapporte des faits ponctuels, localisés dans le temps et l'espace, pour lesquels il n'existe pas de référentiel universel, puisque les référentiels existants (échelles de temps, projections spatiales) varient en fonction des cultures et du savoir scientifique. La simulation de cet espace en tant que continuum est une approche quantitative basée sur l'emploi d'outils analogiques et de méthodes numériques, une approche qualitative telle que proposée par Christian [68], et Yumi [69]. Celle-ci nous semble plus appropriée dans le cadre d'une analyse exploratoire d'un espace d'étude. En effet, l'analyste est intéressé par la situation

relative d'un territoire par rapport à un autre et par les relations que ce territoire entretient avec le reste de l'univers d'étude plutôt que par la visualisation d'un continuum géographique.

Les travaux de Peuquet [70], mettent en exergue l'importance que revêt une gestion appropriée du temps, non pas comme un simple attribut de l'espace géographique, mais comme une dimension à part entière dans un système d'information spatio-temporel. Le temps et l'espace sont fondamentalement différents : dans l'espace, ce qui se passe en un lieu A interagit avec ce qui se passe en un autre lieu B, même pour un effet infime, et cette interaction constitue une influence réciproque.

A contrario, le temps étant orienté, les événements qui se produisent après d'autres n'ont pas d'impacts sur ceux qui les précèdent sur la ligne temporelle. Ainsi, une simple représentation 3D+1 ne suffirait pas pour la production de requêtes adaptées aux phénomènes spatio-temporels. Ces travaux soulignent qu'un tel système doit supporter la représentation simultanée de trois domaines (ou dimensions) : la dimension spatiale (les cellules du zonage ou unités géographiques, le où), la dimension temporelle (les événements, le quand) et la dimension thématique (les valeurs des variables statistiques, le quoi). Ce système idéal doit permettre de pivoter de la dimension spatiale à la dimension temporelle ou thématique, en répondant aux questions suivantes :

- Où se trouvait un objet à un certain moment ?
- Quand se trouvait cet objet à cet endroit ?
- Quel objet se trouvait à cet endroit à ce moment là ?

Ceci définit la triade de Peuquet, voir figure III.7.

A ces questions, Thériault et Claramunt ajoutent la suivante, [44] : « Comment cet objet est trouvé à cet endroit à ce moment là ? ». Répondre à cette question, c'est décrire le caractère dynamique des événements qui occasionnent les changements observés, et produire une description des processus responsables des transformations. La triade peut donc être complétée par un cercle qui relie les trois éléments <objet, lieu, temps> répondant aux questions du Quoi ? Où ? Quand ? pour leur donner sens comme dans la figure III.7.

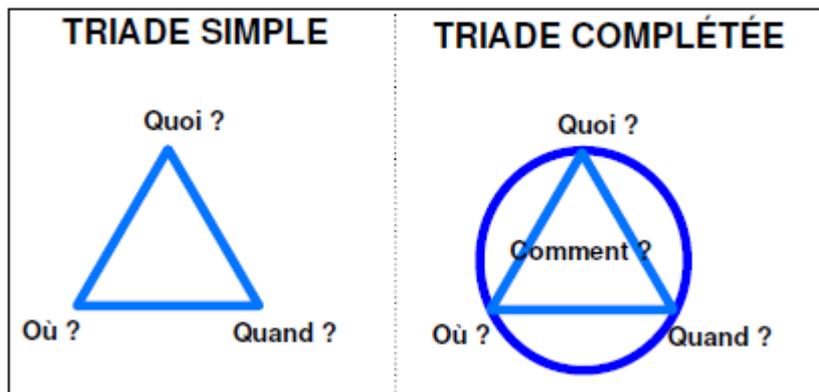


Figure III.7 : Triade de spatio-temporelle simple [70], puis complétée [44].

Dans le cadre de l'analyse de données statistiques associées à des zonages changeants, ces questions peuvent s'interpréter comme suit :

- ✚ Pour une unité géographique donnée, quelle est la courbe d'évolution d'une variable thématique donnée ?
- ✚ Pour une date donnée, quel est le découpage territorial de l'espace et les valeurs des attributs thématiques associés ?
- ✚ Pour une date, et une unité géographique donnée, de quelles recompositions territoriales est-elle issue et comment se transforme-t-elle par la suite ?

Diverses tentatives de modélisation de l'information spatio-temporelle, concrétisées parfois dans des prototypes applicatifs ont vu le jour depuis les années 1990, [73]. Une étude fondamentale de Langran [74] détaille les besoins techniques que ces modèles doivent satisfaire au mieux. Ces besoins sont :

- ✚ La modélisation des changements du support spatial des données
- ✚ Le stockage et le traitement de l'évolution des attributs non spatiaux : la thématique (ensemble des indicateurs) ou bien la sémantique (nom des localisations).
- ✚ L'interrogation des données en fonction des dimensions spatiale et/ou temporelle.
- ✚ La logistique pour le traitement des données, avec des algorithmes efficaces pour intégrer, mettre à jour, supprimer, interroger les données.

Trois tendances distinctes de modélisation se sont dessinées : La première tendance vise à décrire les états successifs de l'espace géographique au mieux, avec une conception du temps linéaire et orthogonale au plan spatial. La seconde tendance vise à répondre de façon plus satisfaisante aux questions posées par la triade de Peuquet (où, quand, et quoi ?). Enfin, la

dernière tendance s'intéresse aux événements et processus de transformation à l'oeuvre dans l'espace géographique, pour modéliser le temps sous la forme de ses effets, et répondre à la question du « comment ? ». Nous décrivons ici ces modèles, et nous les mettons en rapport avec les besoins qui ont été définis ci-dessus.

III.3.1 Des modèles pour enregistrer les changements

III.3.1.1 Datation du support de collecte

Parmi les premières approches, le type ad-hoc, qui sont très proches du modèle de collecte des données. Ainsi, le modèle de superposition des couches géographiques datées (snap shot layers en anglais) se fixe comme objet d'étude une couche géographique (layer en anglais) définie par l'association d'une donnée et de son support spatial de recensement ou de mesure. Le support spatial d'une couche est constitué d'un ensemble d'objets de même type : points, cellules, lignes ou polygones. La donnée est, par exemple, la mesure de la température en quelques points de l'espace, ou bien, par exemple, c'est le type d'occupation du sol majoritaire sur chaque cellule d'une grille régulière qui constitue le zonage de l'espace, comme illustré dans la figure III.8.

Ce type de modèle est très largement utilisé dans le cadre de collecte de données sur les différents types d'occupation biophysiques du sol via le traitement d'images satellitaires, avec, par exemple, le programme du Corine Land Cover mené par l'Agence Européenne de l'Environnement (European Environmental Agency, EEA). En supposant que les supports spatiaux ne varient pas dans le temps (comme c'est le cas pour le Corine Land Cover, puisque le géoréférencement, la taille et la forme de la grille ont été établis par convention dès le début de cette collecte, en 1990), alors la dimension temporelle est introduit simplement par l'estampillage des couches géographiques avec la date de validité de la donnée. Le postulat sur l'homogénéité temporelle du support spatial des données dans le temps permet une étude de la variabilité temporelle des indicateurs thématiques dans le temps.

En utilisant ce modèle, il est possible d'interpoler temporellement les valeurs des variables thématiques, comme le propose Beller [75]. Beller utilise ce type d'approche pour un prototype pour la gestion des évolutions environnementales planétaires, Global Change Research en anglais, cherchant à mettre en relation les données climatiques, d'occupation du sol, et de pollution. Les intervalles de temps entre chaque instantané (snap shot) peuvent varier, ils dépendent de la fréquence de production des grilles de données.

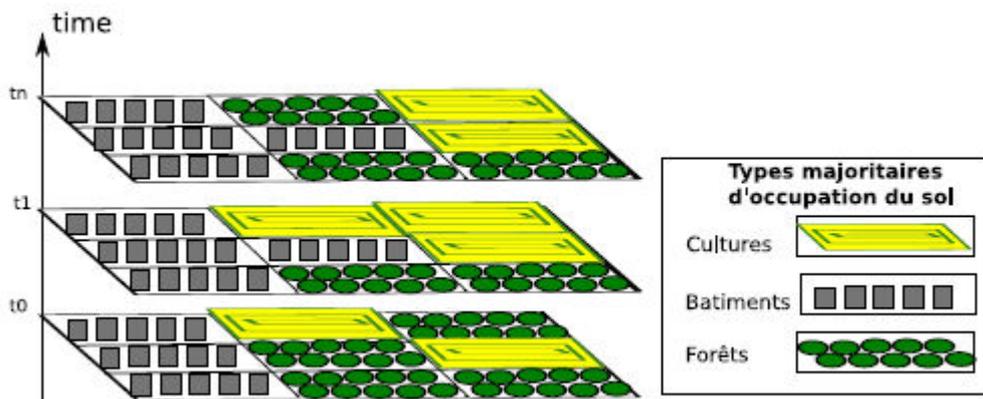


Figure III.8 : Superposition des couches géographiques dans le temps - Illustration avec des données d'occupation du sol.

Ce modèle de gestion du temps s'intègre bien avec le mode d'approvisionnement des données dans des SIG, qui sont encore a temporels et ne fournissent aucune opération topologique sur la dimension temporelle. En général, chaque année, de nouvelles séries de données sont produites par des fournisseurs de données (institut statistiques nationaux ou internationaux) qui se basent autant que possible sur les supports spatiaux de données existants.

Cependant, il arrive que ces supports (localisation des mesures, ou bien la forme et le nombre d'unités géographiques) soient modifiés, et dans ce cas, les hypothèses simples de ce modèle ne sont plus vérifiées et perturbent l'analyse. De plus, certains auteurs, [76], [77], observent quel approche snapshot layers est très consommatrice d'espace-mémoire, car, avec la multiplication des couches géographiques et des données, la quantité de données enregistrée est également multipliée, et de façon parfois inutile. En effet, certains enregistrements sont redondants, puisque les parties du support spatial inchangées d'une version à l'autre sont tout de même enregistrées en doublon.

III.3.2 Définition d'un support stable dans le temps

D'autres approches, visant à prendre en compte les changements de forme du support, ont vu le jour. Le point commun de ces approches est de définir un référentiel spatial fixe dans le temps, auquel les formes qui évoluent dans le temps sont rattachées par un lien établi lors de la saisie des données. Ce lien, ou table de passage, est utilisé pour reconstituer la forme d'une version du support, qui constitue alors une composition des formes du référentiel fixe dans le temps. Ceci nécessite en général que ce référentiel fixe dans le temps soit le plus

Approche pour la modélisation spatio-temporelle

fin possible, et nous appelons ce référentiel spatial fixe le "Plus Petit Commun Dénominateur Spatial" (PPCD-Spatial) par analogie avec la manipulation de nombre en arithmétique, où 6, 15 et 27 partagent en commun 3 comme dénominateur, et peuvent donc être décrits suivant un multiple de 3 : 3×2 , 3×5 et 3×9 . Ce terme est emprunté à d'autres auteurs, [78], qui utilisent le terme anglais de Least Common Geometry, pour implémenter cette approche dans un modèle vectoriel.

Ce type d'approche se décline différemment en fonction de la modélisation du support employée pour le PPCD-Spatial, qui peut être vectorielle ou matricielle, la manipulation d'un format vectoriel le modèle proposé par Langran [74], nommé Space-Time Composite Model en anglais, ou "Modèle à composition d'entités Spatio-Temporelles" en français, est un précurseur de cette famille de modèles qui nécessitent l'introduction d'un PPCD Spatial, et qui le définissent sous un format vectoriel.

Ce modèle représente le monde réel comme une collection d'entités spatio-temporelles homogènes, qui évoluent individuellement à des rythmes différents dans le temps. L'objectif est de pouvoir restituer l'histoire des changements survenus sur une parcelle de terrain donnée. Ce modèle repose sur une couche géographique initiale (qui sera donc considérée comme le PPCD-Spatial), pour laquelle les caractéristiques spatiales de toutes les entités présentes sont enregistrées. Un identifiant unique est attribué à chaque entité.

On introduit successivement dans le modèle les couches dans l'ordre chronologique, et pour chaque série, n'est enregistré que ce qui a été modifié par rapport à la couche précédente. Ce modèle réduit donc l'espace de stockage puisque ne sont enregistrés que les éléments nouveaux ou modifiés à chaque version du support.

La figure III.9 présente le modèle composite simple (Space-Time Composite de Langran), qui modélise les changements d'occupation du sol (entre rural et urbain) à chaque instant t_i , et ne stocke que les changements entre chaque instant.

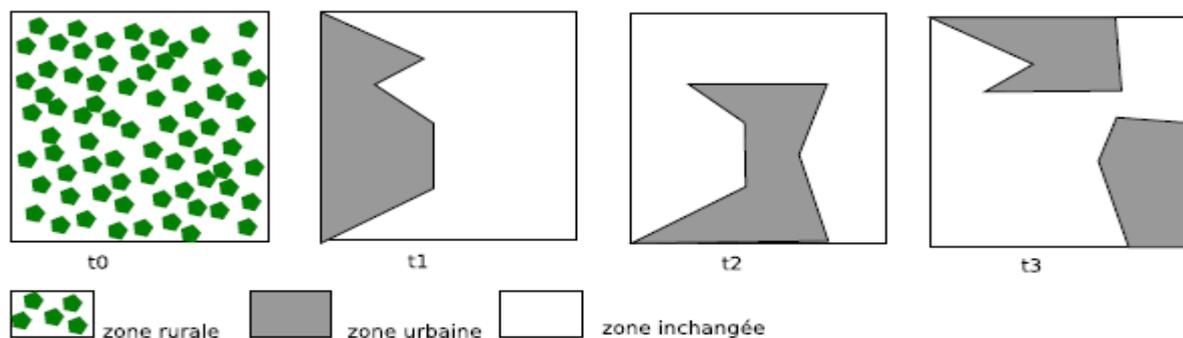


Figure III.9 : Utilisation du modèle Space-Time Composite pour des changements d'occupation du sol.

Approche pour la modélisation spatio-temporelle

Ce modèle a été perfectionné par Belussi et al, [79], qui, au lieu de conserver les changements dans les versions successives, constituent une couche historique pour intégrer toutes les mises à jour historiques dans une même couche fusionnée. Ainsi l'enregistrement successif des couches de changement est économisé : seules restent la couche initiale de référence, et la couche historique, résultat de la fusion par intersection de toutes les couches (le PPCD-Spatial). Lors de l'introduction d'une couche, les supports spatiaux sont intersectés de manière à créer le support le plus fin, et chaque enregistrement dans la base concerne les parcelles ayant subi des modifications de forme et de taille.

Le résultat des multiples fusions par croisement de support ne ressemble pas au terrain réel à aucune date. Cependant, grâce aux enregistrements datés des changements, il est possible de reconstruire l'état du zonage à un instant t_q à partir du support initial en y ajoutant les éléments présents à l'instant considéré.

La couche historique correspondant à l'exemple des changements d'usage du sol est décrite dans la figure III.10 : le terrain initial a été divisé en l'ensemble des parcelles numérotées où se sont produits des changements d'occupation du sol. La relation (parcelle, temps, occupation du sol) permet de retrouver quelle était la forme du zonage à un instant précis.

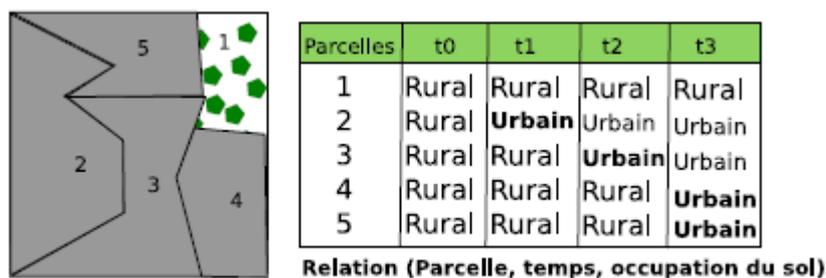


Figure III.10 : Adaptation du modèle Space-Time Composite intégrant la couche historique pour des changements d'occupation du sol.

Dans cet exemple, les formes des unités composant une version de zonage sont définies par le type d'occupation du sol. Mais, en général, dans le cadre de la collecte de données statistiques, la forme du zonage est établie à l'avance, et reflète le plus souvent des territoires administratifs, et les données thématiques collectées ne définissent pas la forme du zonage. Gregory, [81], fait alors remarquer que l'usage du modèle Space-Time Composite avec couche historique pré-suppose donc un choix de plus petites unités stables dans le temps, qui peuvent soit déjà exister comme les paroisses (parish) en Suède dans l'étude de [80], soit être

fabriquées à partir de l'intersection de toutes les versions de zonage, comme dans l'étude de [78] précédemment citée.

Avec le modèle Space-Time Composite, il est aisé de répondre à la question suivante « Quels lieux ont vécu un changement d'occupation du sol entre t_i et t_j ? » par une simple requête qui sélectionne toutes parcelles dont l'occupation du sol a changé entre t_i et t_j . Egalement, la question « Quels lieux ont changé de forme entre t_i et t_j ? » trouve une réponse immédiate dans la lecture du modèle. En revanche, la question « Comment a évolué tel lieu sur la période bornée par les instants t_i et t_j ? » ne trouve pas de réponse dans le modèle. Ceci signifie que ce modèle ne permet pas de saisir les mouvements ou les transformations des entités spatiales. Par exemple, il est impossible de vérifier si deux parcelles ont fusionné pour former une parcelle unique entre deux versions de zonage.

L'autre faiblesse d'un tel modèle vient de sa complexité, D'une part, il est difficile de reconstituer la situation et les relations spatiales entretenues par les parcelles à un instant quelconque, et d'autre part, les mises à jour impliquent toujours une reconstruction des plus petites parcelles, et par conséquent une mise à jour des relations topologiques et des géométries de chaque parcelle, ainsi que des attributs temporels et thématiques.

III.4 Conclusion

Dans cette conclusion, Nous avons vu que la représentation temporelle dans la télédétection passe essentiellement par une modélisation linéaire orientée du temps et utilise les concepts d'instant (des dates) ou d'intervalles (des périodes de durée non nulle) pour localiser et mesurer la durée des entités dans la dimension temporelle. L'importance de conserver à la fois le temps de validité et le temps de transaction, en particulier pour des données statistiques, a été soulignée. Le temps peut également, de façon complémentaire, être modélisé par des événements, des objets de durée non nulle, ayant aussi une emprise spatiale, qui peuvent eux même être composés de sous-événements. Leur enchaînement forme une chronologie et produit une topologie et une sémantique de la dimension temporelle plus riches que la simple succession de dates.

III.5 Références

- [36] [Robert Chignoli](#), Pierre Crescenzo & Philippe Lahire. Lien entre classes dans les langages à objets. Rapport de recherche 97-22, Laboratoire I2S, Université de Nice-Sophia-Antipolis, 1997.
- [37] [Antony Galton](#). Fields and Objects in Space, Time, and Space-time. *Spatial cognition and computation*, vol. 4, no. 1, pages 39–68, 2004.
- [38] [James F. Allen](#). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Commun. ACM*, vol. 26, no. 11, pages 832–843, 1983.
- [39] [James F. Allen](#). Towards a general theory of action and time. *Artificial Intelligence*, vol. 23, pages 123–154, 1984.
- [40] [James F. Allen](#) & George Ferguson. Actions and events in interval temporal logic. Technical report tr521, Computer Science Department, University of Rochester, 1994.
- [41] [S. Jensen Christian](#), Curtis Dyreson, Michael Böhlen & al. The Consensus Glossary of Temporal Database Concepts. *Temporal Databases : Research and Practice*, vol. 1399, pages 367–405, 1998.
- [42] [Jérôme Euzenat](#). Representation granulaire du temps. *Revue d'intelligence artificielle*, vol. 7, no. 3, pages 329–361, 1993.
- [43] [Richard Thomas Snodgrass](#). Temporal databases. In Andrew U. Frank, I. Campari & U. Formentini, éditeurs, *Proceedings of Theories and Methods of Spatio-temporal reasoning*, pages 22–64. Springer-Verlag, New-York, 1992.
- [44] [Christophe Claramunt](#) & Marius Thériault. Managing Time in GIS : An Event-Oriented Approach. In *Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases*, pages 23–42, London, UK, 1995. Springer-Verlag.
- [45] [Michael F. Worboys](#). A generic model for spatio-bitemporal geographic information. In M.J Egenhofer & R.G. Golledge, éditeurs, *Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information Systems.*, pages 25–39. Oxford University Press, 1998.
- [46] [Roger Brunet](#), Jean-Christophe François & Claude Grasland. Entretien avec Roger Brunet : La discontinuité en géographie ; origines et problèmes de recherche. *L'Espace Géographique*, vol. 4, pages 297–308, 1997.
- [47] [Edwin McKenzie](#) & Richard Thomas Snodgrass. An evaluation of relational algebras incorporating the time dimension in databases. *ACM computing surveys*, vol. 23, no. 4, pages 501–543, 1991.

- [48] [Denise Pumain](#) & Thérèse Saint-Julien. L'analyse spatiale - 1. Localizations dans l'espace. collection Cursus. Armand Colin, Paris, 1997.
- [49] [Paul Y. Villeneuve](#). Un paradigme pour l'étude de l'organisation spatiale des sociétés. Cahiers de géographie du Québec, vol. 16, no. 38, pages 199–211, 1972.
- [50] [Claude Grasland](#). Les maillages territoriaux : niveau d'observation ou niveaux d'organisation. In Actes des entretiens J. Cartier, volume 76-77-78 of Les
- [51] [Sylvie Lardon](#), Thérèse Libourel & Jean-Paul Cheylan. Concevoir la dynamique des entités spatio-temporelles. Revue internationale de géomatique, vol. 9, no. 1, pages 67–99, 1999.
- [52] [Yasuhiko Takahara](#), D. Macko & Mihajlo D. Mesarovic. Théorie des systems hiérarchiques à niveaux multiples. Economica, 1980.
- [53] [Philippe Rigaux](#) & Michel Scholl. Multi-Scale Partitions : Application to Spatial and Statistical Databases. In SSD '95 : Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Spatial Databases, numéro 3-540-60159-7, pages 170–183, London, UK, 1995. Springer-Verlag.
- [54] [Hélène Mathian](#) & Marie Piron. Echelles géographiques et méthodes statistiques multidimensionnelles. In Léna Sanders, editeur, Modèles en analyse spatiale. Hermès, 2001.
- [55] [Christine Plumejeaud](#), Jerome Gensel, Marlène Villanova-Oliver, Maher Ben Rebah & Guillaume Vergnaud. Modélisation de hiérarchies territoriales multiples - Vers la gestion d'informations spatio-temporelles évolutives. In Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2009), Paris, France, 2009.
- [56] [Denise Pumain](#) & Thérèse Saint-Julien. L'analyse spatiale - 1. Localizations dans l'espace. collection Cursus. Armand Colin, Paris, 1997.
- [57] [Claude Grasland](#). Spatial analysis of social facts. In Handbook of Quantitative Geography. Bavaud F. & Mager C., 2010.
- [58] [Claude Grasland](#) & Jérôme Gensel. ESPON 2013 Database, 2nd Interim Report, 2010.
- [59] [Waldo R. Tobler](#). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. Economic Geography, vol. 46, no. 2, pages 234–240, 1970.
- [60] [Waldo R. Tobler](#). Smooth pycnopylactic interpolation for geographical regions. Journal of the American Statistical Association, vol. 74, pages 519–530, 1979.

[61] [Eliseo Clementini](#) & Robert Laurini. Un cadre conceptuel pour modéliser les relations spatiales. *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information (RNTI)*, vol. E-14, pages 1–17, 2008.

[62] [Anthony G. Cohn](#) & Nicholas Mark Gotts. The 'Egg-Yolk' Representation of Regions with Indeterminate Boundaries. In Burrough P.A.&Andrew U. Frank, editeurs, *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries.*, GISDATA Series, Vol. 2, pages 171–187. Taylor & Francis, 1996.

[63] [Anne Ruas](#). Le changement de niveau de détail dans la représentation de l'information géographique. PhD thesis, Université de Marne-La-Vallée, 2004.

[64] [Eliseo Clementini](#) & Paolino Di Felice. A spatial model for complex objects with a broad boundary supporting queries on uncertain data. *Data and Knowledge Engineering*, vol. 37, pages 285–305, 2001.

[65] [Stefano Spaccapietra](#), Nadine Cullot, Christine Parent & Christelle Vangenot. On spatial ontologies. In 6th Brazilian Symposium On Geoinformatics, Campos do Jordao, Brazil, 22-24 November 2004.

[66] [Alina Dia Miron](#). Découverte d'associations sémantiques pour le Web Sémantique Géospatial : le framework ONTOAST. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2009.

[67] [Denise Pumain](#) & Marie-Claire Robic. Le rôle des mathématiques dans une "révolution" théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970. *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, vol. 1, no. 6, pages 123–144, 2002.

[68] [Christian Freska](#). Qualitative Spatial Reasoning. In David M. Mark & Andrew U. Frank, editeurs, *Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.

[69] [Yumi Iwasaki](#). Real-World Applications of Qualitative Reasoning. *IEEE Expert : Intelligent Systems and Their Applications*, vol. 12, no. 3, May 1997.

[70] [Donna Peuquet](#). Representations of time and space. Guildford Press, New York, NY, USA, 2002.

[71] [IGN,France](#), IGNF-spatial RefSys (http://lambert93.ign.fr/fileadmin/files/IGNFspatial_ref_sys.sql), 2010.

[72] [BIPM](#). Résolution 1 de la 17e réunion de la CGPM (1983), 1983.

[73] [Colette Cauvin](#). Au sujet des transformations cartographiques de position Cybergeog : *Revue européenne de Géographie*, no. 15, 1997.

[74] [Gail E. Langran](#). Time in geographic information systems. Taylor and Francis,

Seattle, WA, USA, 1992.

[75] [Aaron Beller](#), Tom Giblin, Khanh V. Le, Steve Litz, Tim Kittel & David Schimel. A temporal GIS prototype for global change research. In GIS/LIS'91, volume 2, pages 752–765, 1991

[76] [Martin Ester](#), Hans-Peter Kriegel & Jörg Sander. Spatial Data Mining : A Database Approach. In Lecture Notes in Computer Science, éditeur, Proc. Of the Fifth Int. Symposium on Large Spatial Databases (SSD '97), pages 47–66, Berlin, Germany, 1997. Springer.

[77] [Agnès Voisard](#), Michel Scholl & Philippe Rigaux. Spatial databases with application to gis. Morgan Kaufmann, 2001.

[78] [Anne Ruas](#). Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie. PhD thesis, Université de Marne la Vallée, 1999.

[79] [Alberto Belussi](#), Mauro Negri & Giuseppe Pelagatti. Management of data changes in geodatabases : time component in GIS. Geomatics Info Magazine International, vol. 13, no. 7, pages 41–43, 1999.

[80] [Eliseo Clementini](#), Paolino Di Felice & Peter van Oosterom. A Small Set of Formal Topological Relationships Suitable for End-User Interaction. In SSD, pages 277–295, 1993.

[81] [Ian Gregory](#). Time-variant GIS Databases of Changing Historical Administrative Boundaries : A European Comparison. Transactions in GIS, vol. 6, no. 2, pages 161–178, 2002.

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Ce chapitre est au cœur de nos travaux. Il présente quelques techniques de détection par prétraitement, le suivi de processus du mouvement des dunes par des analyses spatio-temporelle que seul l'outil satellitaire peut appréhender étant donné l'ampleur du phénomène est essentiel dans notre cas, car il permet une large couverture des aires touchées par ce phénomène. nous avons ensuite expliqué les phénomènes inhérents aux images satellites et décrit les travaux réalisés à partir d'images LANSAT dans le désert. Nous avons pris en compte ces considérations structurelles et avons défini des nouvelles techniques de détection de changement dunaire adaptées à ce cadre. De même, avons réalisé de nombreux tests et ce, à chaque nouvelle technique élaborée. Dans ce chapitre, nous allons donner un résumé de nos différentes approches concernant chacun de ses points. Des perspectives de cette thèse seront données pour clore ce travail.

IV.2 Les problèmes engendrés par l'évolution des dunes

Les dunes sont en perpétuelles évolutions. L'avancée des dunes, qui se fait par tempête de sable a des causes multiples, notamment le sacrifice de l'environnement au profit du développement économique : déforestation, gaspillage d'eau, et . Ce phénomène ne cesse de s'accroître. À titre d'exemple : En Algérie, le désert touche des centaines de villes. Les problèmes provoqués par les dunes sont essentiellement dus à leur déplacement, une de solutions est donc de fixer les dunes. De tout temps, les hommes ont du lutter contre l'ensablement, ce qui explique que les plus anciens projets connus remontent au Moyen Age. C'est au XVIII^{me} siècle le que l'économisme à fixer les dunes. Il existe deux types de solutions : solutions végétales et solutions s'apparentant plus à la physique. À cet effet, la solution végétale reste réaliste et est plus avantageuse.

Elle consiste à planter des arbres dans des endroits stratégiques. Les plantes adaptées au climat sont à utiliser au lieu que l'aridité du sol n'anéantisse pas les efforts consentis dans ce sens. C'est ainsi que dans certains pays de la zone sahélo-saharienne, des programmes de lutte contre l'avancée du désert ont vu le jour ; malheureusement peu sont restés actifs. Les projets, échouent couramment. Par manque d'implication ou sensibilisation des habitants environnants, mais aussi, du fait du peu de moyens mobilisés par rapport à l'étendue du site. Bien souvent, les responsables locaux n'ont pas idée de la gravité de l'avancée du désert. Tant que le sable ne sera pas fixé par des arbres qui le retiennent, la région sahélo-saharienne continuera à être sujette à des tempêtes de sable récurrentes.

IV.2 Revue des méthodes existantes

De nombreuses méthodes existent en matière de détection de changement. La plupart de ces méthodes sont des traitements orientés pixels, c'est-à-dire que chaque pixel est traité de manière indépendante.

Ces méthodes ont été développées pour la détection de changements en imagerie satellitaire, cependant, les méthodes évoluent rapidement. Des nouvelles méthodes sont développées de répondre au besoin croissant, réel et complexe de la surface de la Terre. À ce titre, bon nombre d'auteurs ont publié des évaluations des méthodes de détection de changements Thi Thanh PHAM, F. BONN and Jean-Marie DUBOIS [82]. Selon Thi Thanh [82], Lu et ses collègues [83] décomposent les méthodes de détection de changements en six (06) catégories : algébriques, de transformations, de classification, avancées, approche SIG, d'analyse visuelle, et autres techniques, pour fournir une idée globale sur ces méthodes de la littérature, nous utilisons la revue bibliographique de Lu [83], à partir de laquelle les avantages et inconvénients de chaque catégorie de méthodes sont synthétisés.

IV.2.1 Méthodes algébriques

Elles utilisent des algorithmes algébriques (division, soustraction,...) et un seuil pour identifier les zones de changements.

- Points forts : Elles sont simples, exceptée elle de vecteur de changements. Elles permettent la réduction de certains effets atmosphériques et radiométriques.
- Points faibles : Elles ne fournissent au une information sur la nature des changements, hormis la méthode de vecteur de changements. Cependant, elles exigent un seuillage.
- Contraintes : Elles exigent l'identification de seuils et le choix de bandes spécifiques pour la détection.

IV.2.2 Méthodes de transformation

Elles appliquent les transformations comme l'analyse en composantes principales, La Tasseled Cap et le Khi-arré.

- Points forts : elles sont plus complexes que les méthodes algébriques, mais accessibles. Elles réduisent les informations redondantes entre les bandes et il y a une possibilité d'utiliser plusieurs bandes à la fois pour la détection de changements.
- Points faibles : il est assez difficile d'identifier les changements détectés.

- Contraintes : l'analyste / interpréteur doit posséder une bonne connaissance pour le choix des composantes et des seuils.

IV.2.3 Méthodes de classification

- Points forts : Elles réduisent les impacts de l'environnement, fournissent des informations concernant la nature de changements, sauf les méthodes d'analyse spectrale temporelle de détection non dirigée. Cependant, elles produisent une bonne détection.
- Points faibles : Elles exigent beaucoup de temps et les changements sont difficiles à identifier.
- Contraintes : Elles exigent entre autres, une réalité de terrain, l'identification de seuils, une grande exactitude de la classification et une qualité d'échantillons d'entraînement suffisants.

IV.2.4 Autres méthodes

IV.2.4.1 Differencing d'image

Probablement dérivée de la technique de détection de delta, la technique dite de différenciation ou de différenciation d'image a été présentée pour la première fois par Rifman [84] pour la détection de changement puis couramment utilisée, par la suite, pour la discrimination de changement d'utilisation du sol, par Sabins [85], c'est une approche commune employée pour la détection de changement, qui implique une soustraction des images d'une date à celles d'une autre, pixel par pixel. Les valeurs de pixel de soustraction (DCs) peuvent s'étendre de -255 à +255. Les résultats sont normalement transformés en valeur positive par l'adjonction d'une constante C. L'opération s'exprime mathématiquement comme suit ([86] ; [87]) :

$$X_{ijk} = X(t1)_{ijk} - X(t2)_{ijk} + C \quad (IV .1)$$

où

i : numéro de ligne,

j : numéro de colonne,

k : numéro de bande,

X : valeur de pixel après la soustraction

X(t1) : valeur de pixel à temps 1

X(t2) : valeur de pixel à temps 2

C : constante, par exemple 255

Résultats et discussion

Les recherches effectuées par [88] et [89] prouvent que la méthode du différenciation d'image occasionne moins d'erreurs de détection de changement que les autres approches.

L'élément délicat de cette méthode est le choix des seuils entre pixels de changement et pixels de non-changement, comme cela fut démontré dans l'histogramme [90]. L'analyste peut déterminer les seuils en utilisant les données statistiques de l'image soustraite ou sa propre connaissance empirique. Mais quelle que soit la procédure, le choix des seuils nécessite de nombreux essais. L'exemple suivant se base sur les données statistiques.

Habituellement, les données statistiques de l'image soustraite sont disponibles après avoir exécuté la fonction d'histogramme ou la fonction de statistique dans le système de traitement d'image comme PCI, ER Mapper, ENVI, etc. Ainsi la valeur moyenne (M), écart type (variance, σ) sont connus pour l'image soustraite. Donc, les seuils potentiels pour les changements positifs (T_p) ou négatifs (T_n) peuvent être décrits comme suit :

$$T_p = M + v\sigma, \text{ and } T_n = M - u\sigma$$

où v et u sont les coefficients à déterminer par le test. Ils seront probablement 1,5, 1,625, 1,75, 1,875, 2,0, 2,125, 2,25, 2,375, 2,50, 2,625, 2,75, 2,875, 3,0 ... Cela signifie que les seuils potentiels seront fixés par la confrontation, dans l'histogramme, des valeurs de la moyenne (M) aux deux extrêmes (-255 et +255) en ajoutant ou en ôtant chaque fois un $\frac{1}{4}\sigma$ or un $\frac{1}{8}\sigma$ ch. Une comparaison entre les deux composantes colorées de différentes dates est simultanément appliquée pour vérifier la pertinence des valeurs-test. Cette procédure ne sera considérée terminée qu'à l'apparition d'un changement positif ou négatif précis. La figure IV.1 décrit simplement la procédure d'établissements des seuils.

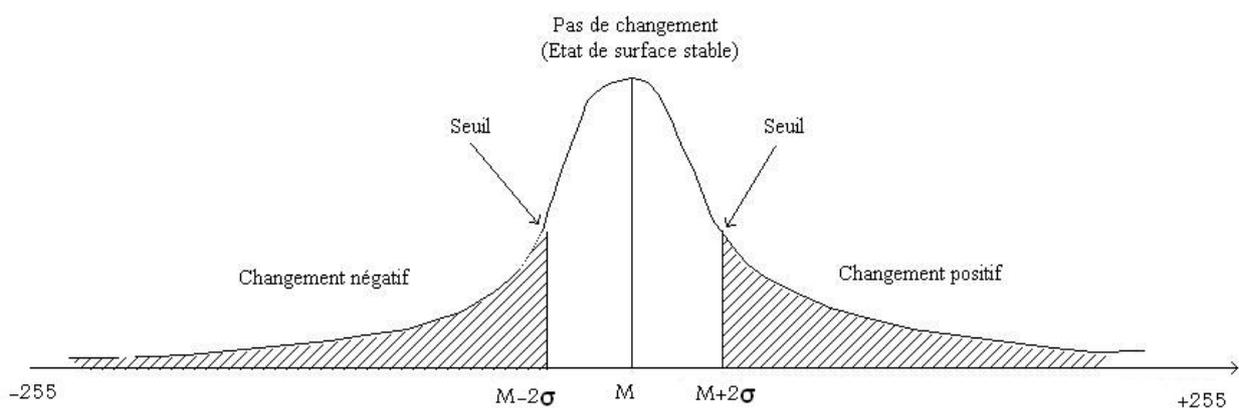


Figure IV. 1 : Etablissement des seuils pour déterminer les changements.

La détermination de seuils précis peut demander beaucoup de temps mais produit des résultats idéaux de détection de changement parce que ces seuils peuvent mettre en avant

précisément le point où le changement est intervenu, en particulier dans le cadre de la détection de changement local.

Cet algorithme de détection de changement peut être appliqué aux images multitemporelles [92] mais aussi aux indicateurs de transformation multispectrale (par exemple, NDVI, Verdeur). Nelson [93] trouve que la différenciation sur le NDVI produit de meilleurs résultats que celui directement appliqué sur la bande-à-bande.

IV.2.4.2 Analyse de vecteur de changement

Le vecteur décrivant la direction et l'importance de changement entre la première et la deuxième date est le vecteur spectral de changement ([94] ; [95]). La direction du vecteur contient des informations sur le type du changement (par exemple coupe de bois ou repousse (regrowth)). C'est, en fait, une extension conceptuelle du differencing d'image, dans laquelle un seuil concernant la grandeur est établi comme base pour déterminer les secteurs de changement. Malila [95] ont appliqué pour la première fois une transformation de chapeau à cône sur les données de Landsat MSS acquises à deux dates différentes pour obtenir les indices de Brillance et de Verdeur.

Ils ont ensuite groupé les pixels dans l'espace de G-B (vert-bleu) selon la direction et l'importance de la signature de changement, et ont finalement analysé le changement de forêt en se basant sur la direction des vecteurs (figure IV.2). [96] ont utilisé cette méthode pour détecter le changement de forêt de conifères en se basant sur une transformation de Kauth-Thomas à partir des données de Landsat TM et obtenu le même résultat que [97] qui affirmaient que la composante Humidité est la plus importante pour différencier les classes de forêts de conifères.

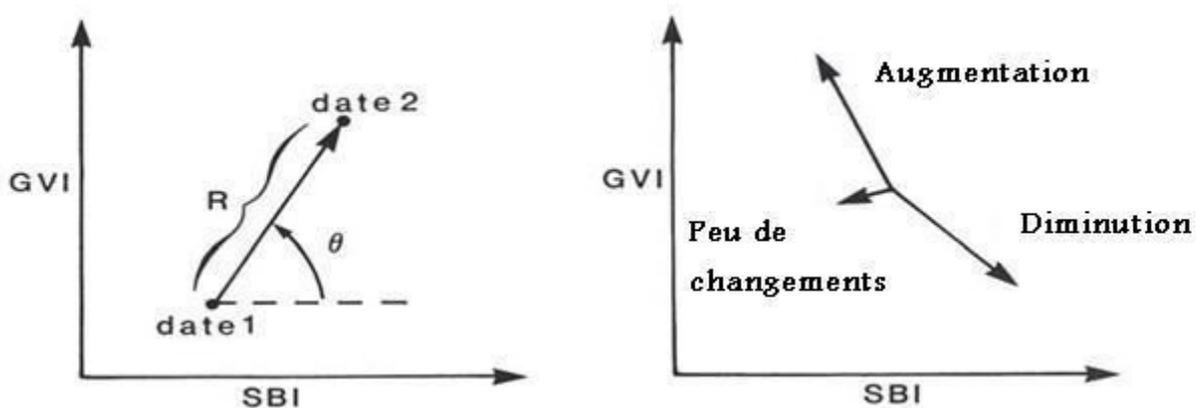


Figure IV.2 : Analyse de vecteur de changement (D'après [99])

[98] ont étendu le vecteur de changement spectral à l'espace multi-temporelle et ont mis en application une détection de changement par l'observation en série chronologique d'un indicateur d'occupation du sol (par exemple, NDVI) mesuré pour les différentes années.

La trajectoire de temps du vecteur d'indicateur contient l'information détaillée et permet de distinguer les changements brusques et subtils d'occupation du sol.

IV.2.4.3 Analyse de données multidates

Appelée classification de changement temporel à ses débuts [100] et plus récemment intitulée analyse de composition [101], cette approche est basée sur une simple classification de groupes de données (dataset) multidates en utilisant la technique de reconnaissance de modes pour identifier les modifications d'occupation du sol. En employant les données (datasets) collectées dans des conditions similaires, presque le même jour mais d'années différentes, on peut découvrir que les classes où se produisent des changements pourraient avoir des données statistiques significativement différentes par rapport aux classes où ne se produisent aucun changement[100].

Au lieu de classer directement les données multi-dates applique d'abord une transformation de type ACP puis classe les composants dérivés pour distinguer les feux de broussailles. Il en a conclu que la classification sur les composantes 3 et 4 produisait le meilleur résultat.

Les techniques mentionnées ci-dessus sont les plus employées, en particulier celles de la différenciation, de l'analyse de vecteur de changement et de la comparaison de post-classification. L'utilisation de la transformation multispectrale décrite précédemment peut largement révéler et amplifier les informations d'occupation du sol telles que de celle de la végétation et de la phénologie, un algorithme de combinaison de différenciation et de détermination de seuil (seuillage ou thresholding) basé sur la transformation de chapeau à cône serait souhaitable pour le suivi de l'environnement aride.

IV.2.4.4 Les méthodes avancées

Elles sont appliquées pour la détection de changements des paramètres biophysiques/ :

- Points forts : elles fournissent de l'information précise et détaillée sur la nature de changements.
- Points faibles : elles sont complexes et non disponibles dans des logiciels
- Contraintes : elles exigent le développement de modèles deuxième d'arbres et d'estimation des paramètres biophysiques ainsi que l'identification de composantes spectrales homogènes et de seuils adéquats. Au une de es méthodes n'a été retenue dans plusieurs papiers de la littérature, à cause de leurs particularités et leurs inconvénients.

IV.2.4.5 Détection de changement orientée objet

IV.2.4.5.1 Définition

Un objet, ou segment, représente une région constituée de pixels adjacents dont le critère d'homogénéité est défini au préalable [102]. Les objets sont obtenus par segmentation de l'image illustrée par la Figure IV.3. La segmentation est un traitement d'image qui vise à partager l'image en plusieurs objets ou segments en se basant sur les attributs spatiaux et spectraux des pixels.

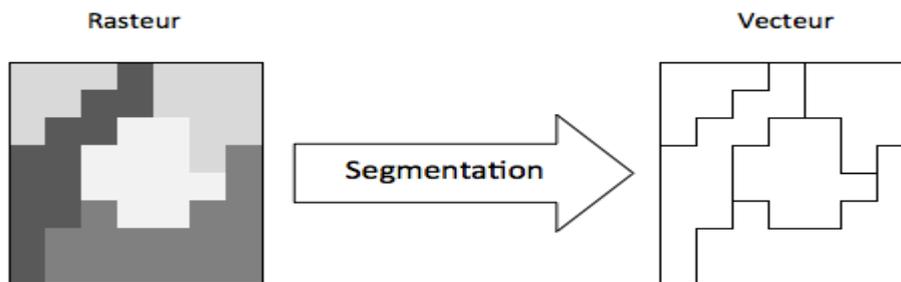


Figure IV.3 Segmentation d'une image en objets

IV.2.4.5.2 Introduction et problématiques de la détection de changement orientée objet

La détection de changement orientée objet (OBCD, Object-Based Changed Detection) est un principe relativement récent. Elle permet de détecter des changements entre deux ou plusieurs images en considérant les segments de ces images, représentant des entités physiques au sol et caractérisés par leur radiométrie, leur position, et leur géométrie. De ce fait l'OBCD incorpore une dimension spatiale, qui lui confère la capacité à identifier les changements d'une identité géographique, contrairement aux méthodes pixels.

Selon la revue de [102], les méthodes de détection orientée objet présentent de meilleurs résultats que ses homologues pixels. La plupart des algorithmes de détection de changement orientée pixels peuvent être appliqués à une problématique orientée objet permettant une comparaison directe. Ainsi les comparaisons multi-temporelles de classification par l'usage d'une méthode orientée objet ont une précision supérieure de 18% à une comparaison de classification pixel.

De même, l'OBCD présente de meilleurs résultats pour le traitement d'images satellites à très haute résolution. Plus la résolution spatiale est haute, plus les images présentent des variabilités spectrales, ce qui entraîne une baisse de la fiabilité des algorithmes de détection de changement. L'OBCD permet de considérer l'objet comme une petite zone d'étude et d'appliquer des algorithmes de lissage des petites variations indésirables permettant d'accroître de 9%

la fiabilité de détection de changement. De manière générale, l'utilisation des composantes spectrales, des géométries, des textures et des contextes des objets produirait de meilleurs résultats que la seule utilisation des données spectrales.

Toutefois l'OBCD révèle plusieurs problématiques, dont les quatre principales sont :

IV.2.4.5.3 Le décalage multi-temporel

Les erreurs de recalage entre les images multi-temporelles entraînent un décalage multitemporel des objets entre eux (Figure IV.4). Toutefois cette source d'erreur est moins problématique pour l'OBCD que pour les méthodes orientée pixels.

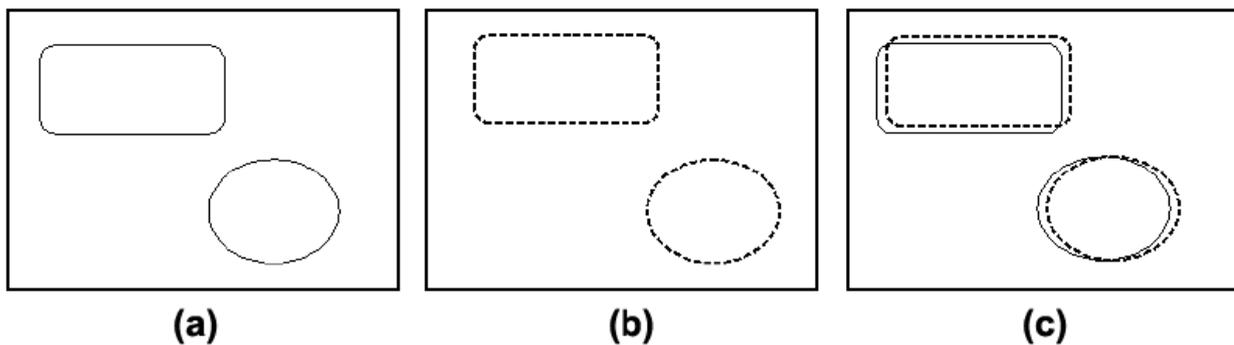


Figure IV.4 Les objets extraits à la date 1 (a) et à la date 2 (b) sont décalés (c) à cause d'un mauvais recalage [102].

IV.2.4.5.4 Le problème de Sylver Polygons

Il apparaît, au moment de la comparaison, des objets issus de différentes segmentations. Les objets issus de la segmentation d'une image sont rarement identiques en forme aux objets issus de la segmentation d'une seconde image, même si peu de changements sont visibles entre les deux images. Ce phénomène est dû à l'algorithme de segmentation utilisé, mais également aux différences radiométriques causées par la différence de position du soleil au moment des prises de vue et aux conditions météorologiques (couverture nuageuse). Les Sylver Polygons sont les polygones créés lors de la superposition de deux segmentations comme illustré dans la Figure IV.5.

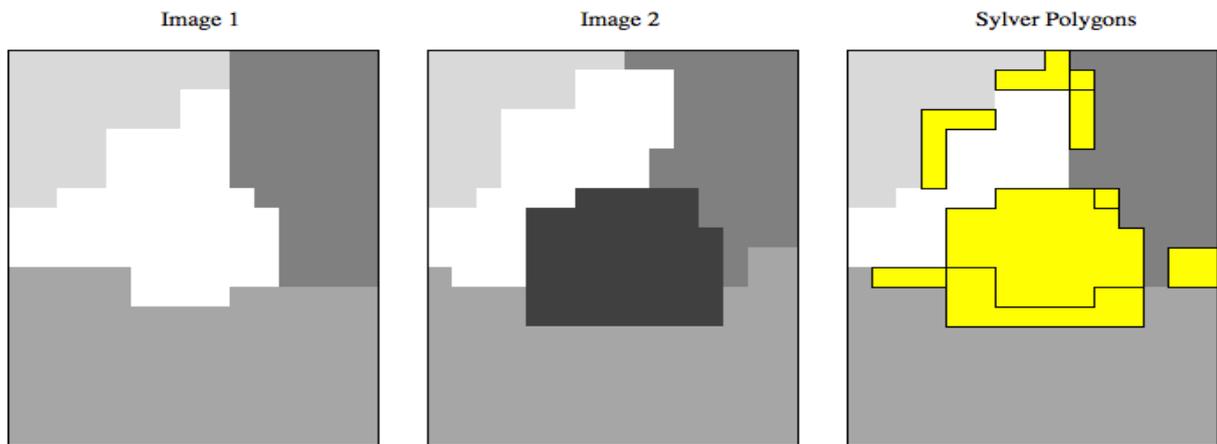


Figure IV.5 Schéma Sylver Polygons

IV.2.4.5.4 Le manque de correspondance entre objet et entité géographique

Ce phénomène apparaît généralement quand la segmentation considérée est la même pour toute la série d'images. Le manque de correspondance entre l'objet et l'entité géographique est dû au changement de la forme de l'entité géographique elle-même et à la rigidité des objets considérés au cours du temps. Elle peut également être présente dès le départ si l'utilisation d'une segmentation a priori (cartes préexistantes, bases de données SIG) n'est pas assez détaillée ou selon l'algorithme de segmentation appliqué.

Finalement et plus récemment, une méthode issue du domaine de la fouille de données Julea [102] met en évidence des motifs récurrents inhérents à une évolution cyclique, et isolent les motifs anormaux qui pourraient correspondre à un changement.

Bien que les méthodes orientées pixels soient toujours les plus couramment utilisées, de plus en plus d'études s'intéressent aux méthodes de détection de changement orientées objet. La performance croissante des systèmes de calculs et l'efficacité des algorithmes d'extraction de formes permettent de passer aisément d'un format raster à un format vecteur et ainsi de développer de nouvelles opportunités en matière de traitement d'images orienté objet.

Tableau IV.1 Classification des méthodes de changements

| Catégorie | Techniques |
|--------------------------|---|
| Algébrique | Analyse par vecteur de changement Différence d'indices de végétation Soustraction d'images de base Régression d'images Différence d'images Division d'images |
| Transformations | Analyse en composantes principales(ACP) Transformation Tasseled Cap Gramm-Shmidt Khi- arré |
| Classifications | Détection du maximum de probabilité Détection de changements non dirigée Comparaison de post- classification Détection de changements hybride Analyse spectrale temporelle Réseaux de neurones |
| Méthodes avancées | Méthode de paramètres biophysiques Modèle de réflectance de Li-Strahler Modèles de mixage spectral |
| Approche de SIG | Méthode d'intégration de SIG et de données de télédétection |
| Analyse visuelle | Interprétation visuelle d'image |
| Autres techniques | <ul style="list-style-type: none"> - Combinaison de trois indicateurs : indices de végétation, température de surface et structure spatiale - Méthode de génération de super ie (area production method) - Système d'observation basée sur la connaissance - Approche basée sur le théorème de courbe - Méthode basée sur la statistique spatiale - Mesure de dépendante spatiale - Approche basée sur la structure - Modèles linéaires généralisés Courbe de changements - Différencing d'image - Analyse de vecteur de changement - Analyse de données multi-dates |

IV.3 Les déserts, la détection de changement et les dunes

Si nous intéressons aux changements sur des zones de désert, nous constatons qu'il existe deux types d'événements immédiatement intéressant. Le premier concerne les changements ponctuels et le deuxième concerne le mouvement des sables. Ces deux types de changement peuvent se confondre dans les zones de sable mais les échelles de ces changements ne sont pas les mêmes. En cet, les déplacements de dunes sont de l'ordre de dizaines de mètres pour les dunes alors que les changements induits par un déplacement humain engendreront de perturbation de l'ordre du mètre. Dans un premier temps, nous nous concentrons sur l'étude des mouvements de dunes, en prenant en compte la direction de vent.

Les dunes de sable sont le résultat du mouvement du sable engendré par le vent. Quand ce dernier soue au-dessus d'une vitesse minimale, les irrégularités du terrain récent des zones de dépressions qui aspirent les grains de sable. Une fois décollés, eux-ci sont accélérés par le vent et retombent dans la prochaine zone de surpression,

La roche sous adjacente étant irrégulière, l'effet décrit dans le paragraphe i-haut se produit alors et du sable s'accumule sur les formes exposées aux vents dominants. Celles définissent par être recouvertes de sable et des dunes commencent à se réer. Comme pour tout écoulement de liquide, le vent est plus rapide dans les restrictions. Une fois que les dunes ont atteint des tailles importantes et proches, le phénomène de déplacement prend le pas sur la tendance à l'absorption et, sauf changement important de climat, le phénomène devient régulier [103].

IV.4 METHODOLOGIE

Le traitement des données satellitales permet d'exploiter les valeurs numériques des pixels pour suivre l'évolution des milieux à différentes échelles spatiales et temporelles. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'existence et l'état du sable dunaire on utilisons le NDSDI(Normalized diffirencial sand dune index).

La mise en évidence des modifications environnementales s'articule autour des méthodes d'analyses qui utilisent les différences spectrales pour détecter du changement entre les images.

Les méthodes de détection du changement que nous utiliserons sont la comparaison des images produit par ces indices et des opérations arithmétiques entre canaux (rapport d'images, indices de changement diachronique qui montrent le sens et la direction du changement).

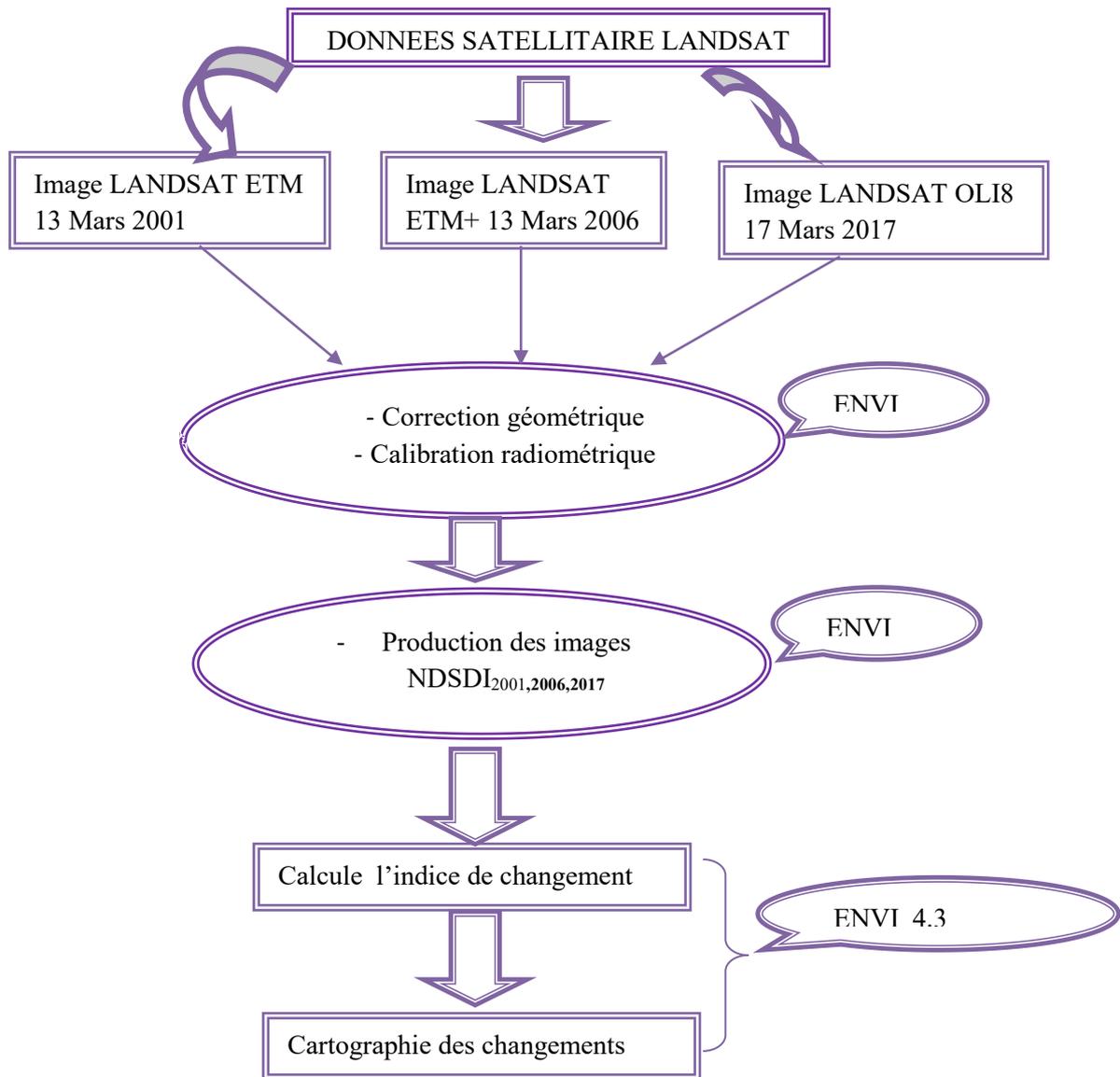


Figure IV.6 Arborecence du traitement des images satellitaires

IV.4.1 La technique de détection du changement

La détection de changement est le procédé qui consiste à identifier plusieurs états d'un objet ou d'un phénomène en les observant à différents moments [83]. Grâce aux avantages liés à l'observation macroscopique et multi-temporelle, les données de télédétection sont souvent utilisées pour obtenir et évaluer les informations sur le changement d'utilisation des sols et de couverture. Cette méthode ne devrait, idéalement, utiliser que des données issues d'un même capteur ou d'un capteur similaire, d'une même résolution spatiale, d'un même angle de vue, de mêmes bandes spectrales et obtenues à une même heure.

L'objectif de la détection des changements est de comparer la représentation spatiale de deux points dans le temps en mesurant les changements causés par la différence dans les variables d'intérêt [83].

Une bonne étude sur la détection de changement devrait fournir les informations suivantes [83].

- Les zones de changement et le taux de changement
- La répartition spatiale des types de changement
- Evaluation de l'exactitude des résultats de détection

IV.4.1.1 Application de détection de changement

Ils sont résumés principalement dans:

- ✓ L'utilisation des terres et le changement de la couverture terrestre
- ✓ Le changement de la végétation notamment les forêts
- ✓ L'évaluation des mortalités, des défoliations et des dommages en forêts.
- ✓ L'exploitation, la déforestation et la régénération forestière.
- ✓ Le changement des zones humides
- ✓ Les incendies de forêt
- ✓ La modification du paysage
- ✓ Le changement urbain
- ✓ Les changements environnementaux, suivi de la sécheresse, la surveillance des inondations, la surveillance des milieux marins côtiers, la désertification et la détection des zones de glissement
- ✓ La surveillance des cultures, suivi de culture itinérante, les segments de route et le changement dans l'équilibre de masse des glaciers et de faciès.

IV.4.1.2 Différente étapes de détection de changement

Une étude de détection de changement doit impliquer trois étapes suivantes ;

1. Prétraitement d'images, y compris la rectification géométrique, la normalisation radiométrique et la correction atmosphérique.
2. La sélection des techniques appropriées à mettre en œuvre pour l'analyse de détection de changement,
3. La précision d'évaluation et des résultats de la détection des changements qui dépendront de nombreux facteurs, notamment:

- Correction géométrique des images multi-temporelles
- Calibration ou normalisation entre les multi-images temporelles
- Disponibilité des données sur la vérité de terrain
- Complexité du paysage et les milieux de la zone d'étude
- Choix des méthodes de détection et des algorithmes utilisés
- Classification et le système de détection de changement,
- Compétences et l'expérience de l'analyste,
- Connaissance et la familiarité de la zone d'étude,
- Temps et le coût de l'étude.

IV.4.1.4 Les exigences de l'analyse multi-temporelle

Avant la mise en œuvre de l'analyse de détection de changement, quatre conditions doivent être remplies :

- Les images utilisées doivent être issues du même capteur (même enregistrement).
- Calibrage radiométriques et atmosphérique de différentes images multi-temporelles.
- Date de prise de vue des images doit être similaire pour éliminer les effets de sources externes telle que l'angle solaire et les différences saisonnières et phénologiques.
- L'utilisation de la même résolution spatiale et spectrale des images multi-temporelle.

IV.4.2 Description des logiciels utilisés dans ce travail

Dans notre étude, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel ENVI 4.3 (Environment for Visualising Image) pour son efficacité dans la visualisation, le traitement et l'analyse des images satellitaires, sa facilité d'utilisation et ses différentes interactivités possibles qu'il offre. C'est un logiciel performant qui permet de corriger, de traiter et d'analyser les images satellitaires ayant des tailles et des formats différents.

ENVI est le logiciel qui propose une grande gamme d'outils d'analyse d'image multi et hyper spectrales qui forme la source des données la plus fiable dans l'utilisation des terres et plus particulières à la foresterie. Il comprend également des outils nécessaires aux traitement des photographies aériennes et des images radar particulièrement utiles en présence de nuage.

IV.4.3 Images satellitaires utilisées

Nos images sont fournies gratuitement par l'USGS (US Geological Survey) (<http://www.usgs.gov>) avec un niveau de prétraitement *LI*. Ce dernier concerne une correction radiométrique et géométrique par rapport au système géodésique mondial WGS84 et la projection UTM (Universal Transverse Mercator), zone 30.

Résultats et discussion

Dans la présente étude trois images satellitaires ETM 2001, ETM+2006 et OLI8 2017 sont utilisées, chaque image comporte 7 bandes (canaux) dont chacune a un domaine d'application. À titre d'exemple la différenciation sol/végétation est fournie pour le canal 1 alors que la différenciation des espaces végétalisés est beaucoup plus identifiable dans le canal 3 de LANDSAT.

IV.4.3.1 Caractéristiques spatiales et spectrales des images satellitaires :

Pour une large couverture et un maximum de données, le choix des images s'est appuyé sur les images à moyenne résolution spatiale des produits Landsat avec un pixel de 30m x 30m au sol, avec des qualités proches de la réalité terrain.

Les caractéristiques de nos images sont portées sur le tableau IV.2:

**Tableau IV.2 : Principales caractéristiques des images satellitaires Landsat.
(D'après images header files et CCT documentation)**

| Image : Satellite/ Capteur / Référence | Date et heure de prise de vue | Angle d'élévation solaire en degré | Azimut solaire en degré | Nombre de canaux acquis | Résolution spatiale | Observation |
|--|-------------------------------------|---|-------------------------------|----------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| LANDSAT7 ETM elp198r039 | 20010313 à 14h:49mn | 48.0716868 | 137.3732231 | 8 | 30 | Couvre toute la zone d'étude |
| LANDSAT Etm+ E7198039 | 11/03/2006 à 13h:15mn | 49.251365 | 138.956321 | 9 | 28.5 | Couvre toute la zone d'étude |
| LANDSAT 8 OLI LC08_L1TP_198 039 | 17/03/2017 à 18h:22mn | 50.9512392 | 139.3358919 | 11 | 28.5 | Couvre toute la zone d'étude |

IV.4.3.2 Correction géométrique et radiométrique des images

La rectification des images se fait à partir d'un ensemble de points d'appui (points de repère connus en coordonnées et identifiables sur les images). Et, la plupart du temps, une translation et une rotation de l'image sont nécessaires, ce qui implique un ré-échantillonnage des pixels de l'image [104]. Les images ont été géoréférencées en utilisant le système WGS84 avec la projection UTM 30 nord. Concernant la correction radiométrique, la technique développée par [105] a été utilisée. L'image de 2017 a été prise comme référence car ses valeurs minimales étaient les plus faibles. Cette méthode vise à rectifier l'image de 2001 par rapport à l'image de référence et à compenser les erreurs de calibration du capteur ainsi que les effets des différences

atmosphériques et d'illumination entre les deux images. Pour cela, nous avons sélectionné des pixels en compte numérique dans chacune des zones les plus sombres (voisines de zéro) et les plus brillantes (voisines de 255) dans l'image de référence.

IV.5 Normalized Differential Sand Dune Index (NDSDI)

Le nouvel indice NDSDI est utilisé pour identifier et mettre en évidence l'existence des accumulations de dunes de sable dans la zone d'étude. L'indice suggéré basé sur la différence normalisée entre les valeurs spectrales RED et SWIR2. Cet indice vise à différencier les accumulations de dunes de sable, les sols dénudés et les autres types de sols. Un seuil a été utilisé pour masquer et extraire la dune de sable accumulations dans l'image traitée [106] NDSDI peut être exprimé comme: RED est la réflectance du rouge (bande3: 0,63-0,69 μm), et SWIR2 est l'infrarouge à courte longueur d'onde (bande7: 2,08-2,35 μm) des capteurs Landsat TM / ETM +.

En tenant compte de la réflectance des différentes dunes de sable et des surfaces de sable dérivantes et de la végétation, la différence entre les bandes RED et SWIR2 dans l'équation NDSDI est conçue pour distinguer la surface végétalisée ou aqueuse, les sables et le sol nu, tandis que la réflectance Dans le RED, les bandes SWIR2 peuvent distinguer les types de minéraux et de roches, sensibles au sol et à la teneur en humidité de la végétation. Le seuil a été appliqué en fonction des connaissances sur le terrain des accumulations de dunes de sable et de l'interprétation visuelle. La sélection d'une valeur de seuil appropriée par comparaison visuelle sur les images à l'aide de l'expérience acquise pendant le travail sur le terrain est une étape importante pour dériver les différentes accumulations de dunes de sable dans la zone d'étude.

Les valeurs de l'NDSDI sont comprises entre $(-1 \leq \text{NDSDI} \leq 1)$, alors que les accumulations de dunes de sable et les sables dérivants prennent souvent des valeurs inférieures à zéro (<0), tandis que la couverture végétative prend des valeurs supérieures à zéro (>0). les plans d'eau prennent les valeurs les plus élevées.

Tableau IV.3 Les valeurs de l' NDSDI pour des différents types de couverture

| NDSDI | < 0 | >0 | >0.5 |
|--------------------|------|--------|------------------|
| Type de couverture | Sble | Sol nu | végétation , Eau |

IV.5.1 Interprétation des résultats du NDSDI

Le NDSDI met en évidence l'activité du sable ; les valeurs de chaque pixel comprises entre le 0 et 1 représentent successivement le sol nu et le couvert végétal maximal, le néocanal résultant

Résultats et discussion

présente un gradient croissant d'activité sable allant de la couleur noir qui signifie absence de couverture sable jusqu'au blanc qui présente une très forte activité sable.

IV.5.2 Normalized Differential Sand Dune Index de l'image satellitaire Landsat de 2001

L'interprétation de l'image (NDVI2001), nous permettent d'identifier facilement la couverture sable, à partir des valeurs inférieure à 0 qui se localisent dans le nord est et généralement sur les plats, de la région d'étude (Figure IV.7). Les bases altitudes montrent une forte augmentation de cet indice. Ceci est dû à l'effet de l'érosion éolienne. On observe en même temps une dégradation de la végétation le long des couloirs des vents affectant les sols peu profonds et les couches sableuses. Toutes les valeurs négatives comprises entre (-1 et -0.5) de cet indice représentent les sols nus tels que le Hamada.

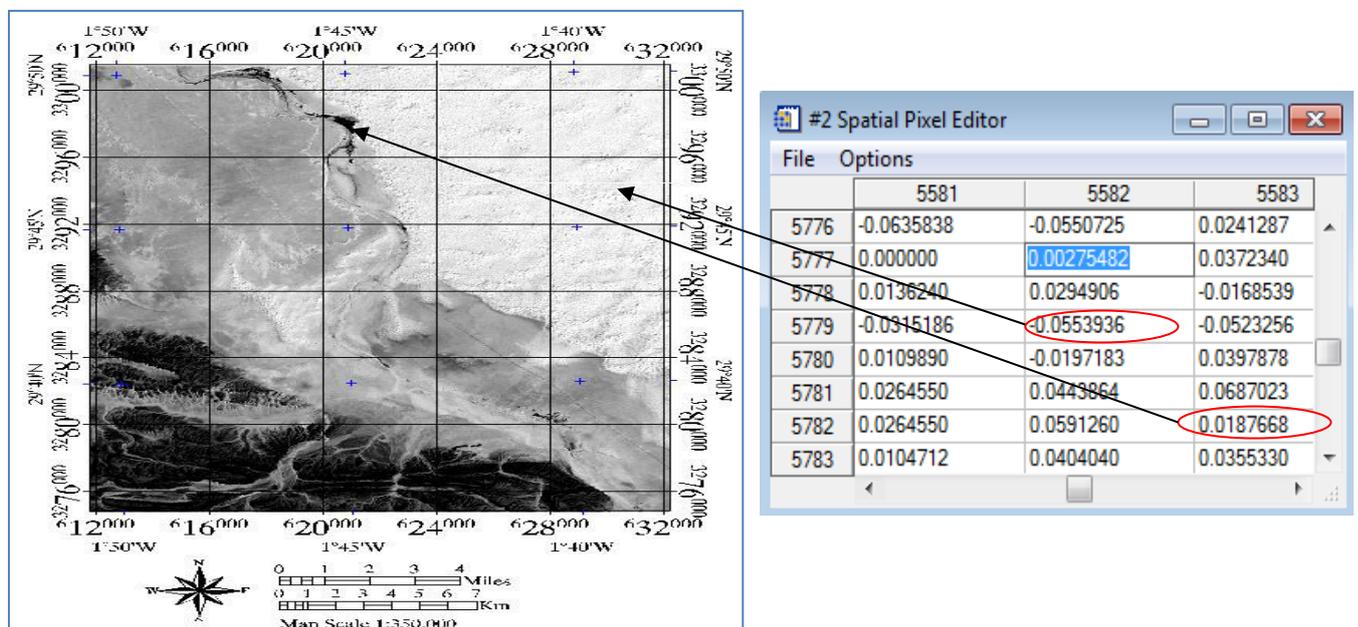


Figure IV.7 Image satellitaire de l'indice (NDSDI) du 13-mars-2001.

IV.5.3 Normalized Differential Sand Dune Index de l'image satellitaire LANDSAT de 2006

Les valeurs positives de cet indice représentent en premier lieu les cultures irriguées et la végétation dense telle que les mises en valeurs, les matorrals et enfin les parcours steppiques. Les valeurs nulles ou négatives représentent le sable, et les valeur compris entre 0.5 et 1 représente le sol nu et les dépressions fermées.

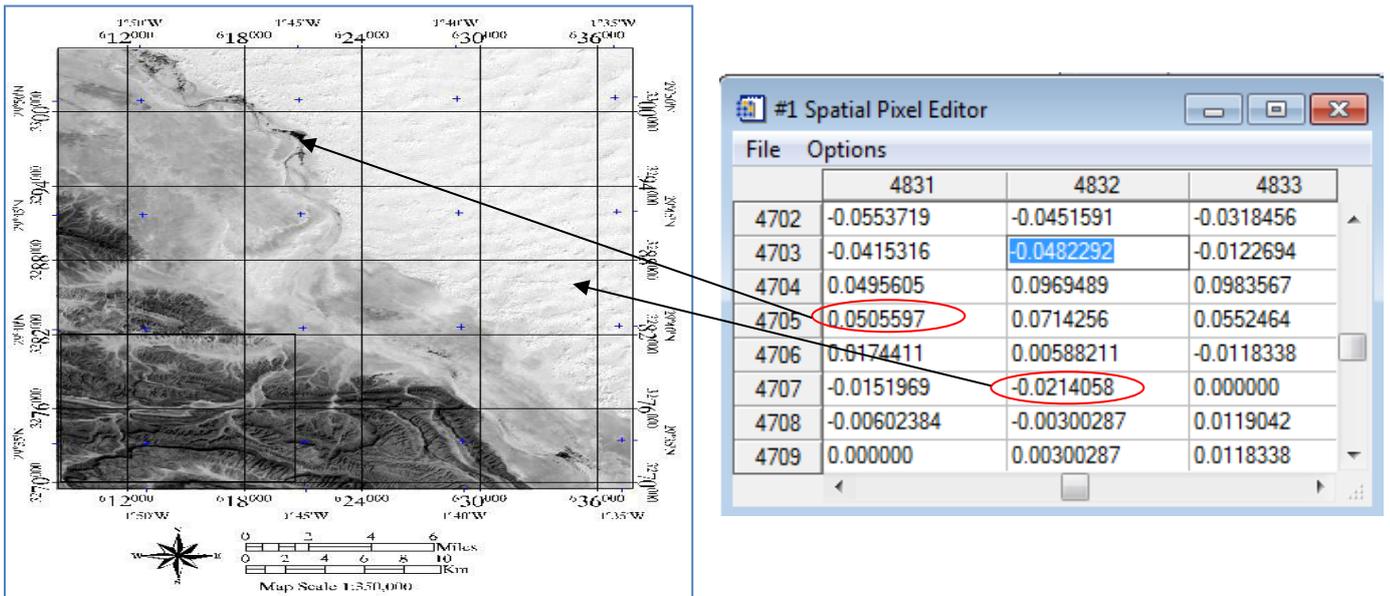


Figure IV.8 Image satellitaire de l'indice NDSI du 13-Mars-2006.

IV.5.4 Normalized Differential Sand Dune Index l'image satellitaire LANDSAT de 2017

Les valeurs positives de cet indice représentent en premier lieu les palmiers et la végétation dense telle que les mises en valeurs, les matorrals et enfin les parcours steppiques. Les valeurs nulles ou négatives représentent le sable,

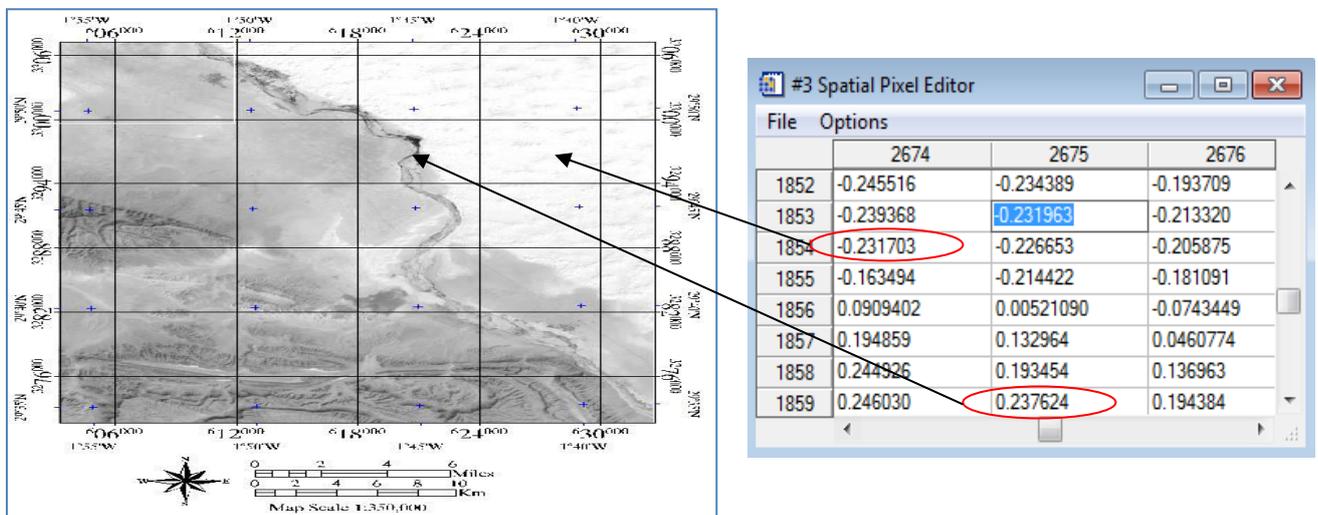


Figure IV.9: Image satellitaire de l'indice (NDSI) du 17-Mars-2017.

IV.6 Extraction des Endmembres

L'analyse en composantes principales (ACP) est appliquée aux trois images ETM2001, ETM+2006 et OLI8 2017 pour quantifier la dimensionnalité et la topologie de l'espace de mélange spectral des images. La rotation des composantes principales minimise les corrélations

entre les dimensions de sorte que les bandes de composantes principales (PC) résultantes représentent des composantes orthogonales de la variance décroissante.

La distribution des valeurs propres qui l'accompagne fournit une estimation quantitative de la partition de la variance entre les signaux et les composantes principales dominées par le bruit de l'image. En utilisant des capteurs hyperspectraux, cette partition et le nombre de composantes dominées par le signal peuvent constituer la base d'une n-dimensionnalité estimée de l'image ([106]). Les capteurs à large bande comme ETM + le nombre de dimensions spectrales pouvant être distinguées est généralement inférieur au nombre réel d'extrémités spectralement distinctes et donc à la dimensionnalité inhérente. Toutes les composantes contiendront un signal sous la forme d'une structure spatialement cohérente [107].

L'espace caractéristique multidimensionnel des composants principaux d'ordre inférieur fournit donc un espace de mélange spectral, qui peut être utilisé pour montrer les spectres individuels comme une combinaison de membres spectraux. Les diagrammes de dispersion des bandes non tournées pourraient représenter l'espace de mélange. L'utilisation de diagrammes de dispersion de PC donne une projection "optimale" de l'espace de mélange car la rotation du PC fournit un schéma d'ordre par rapport aux bandes de variance. Cela signifie que deux ou trois PC peuvent souvent présenter une représentation du premier ordre de l'espace de mélange, qui contient la majorité de la variance d'image.

Dans le cas des données Landsat TM, plus de 90% de la variabilité spectrale est cartographiée dans PC1 et PC2, ainsi les zones des membres spectraux peuvent généralement être sélectionnées à partir des diagrammes de dispersion de PC1 et PC2. Le processus de sélection des membres finaux sur la base des diagrammes de dispersion des composantes principales est illustré à la figure IV.10 .

Dans cette analyse, les valeurs propres, Les vecteurs propres et les composantes principales sont dérivés d'une rotation basée sur la covariance. Des images PCA et des diagrammes de dispersion ont été utilisés pour examiner des zones uniques et pour étudier la possibilité de dériver des membres non-mélangeurs à partir des données. Sélectionnez les trois extrémités du sol nu, la végétation verte, la terre de sable et le bâti. Les figures IV.10 et IV.11 montrent le sable, le sol nu et la répartition spatiale du couvert végétal dans la région de Bechar.

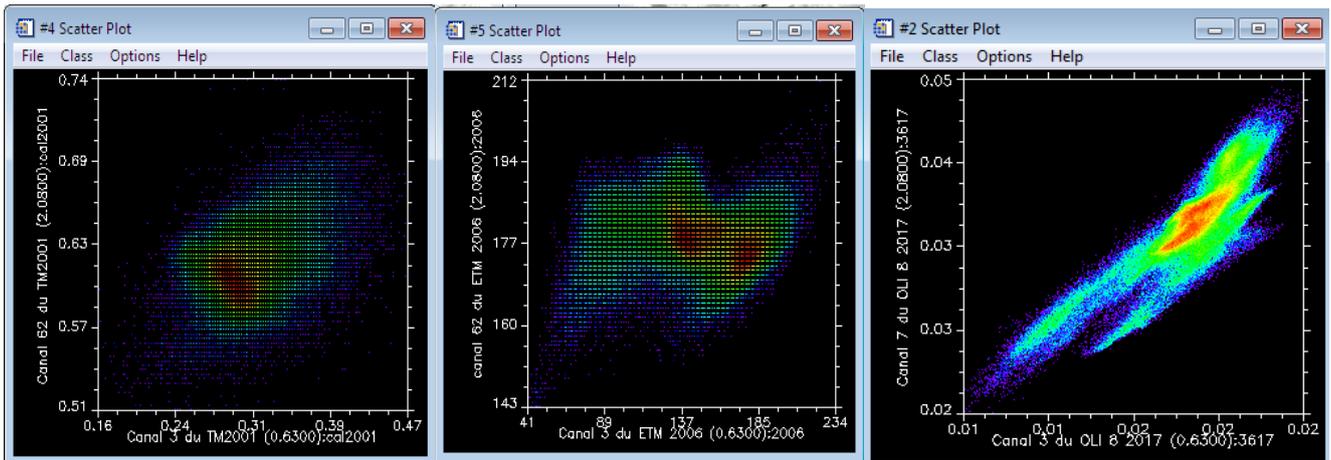


Figure IV.10 Scatters plots des deux PC's, location des Endmembers pour chaque année

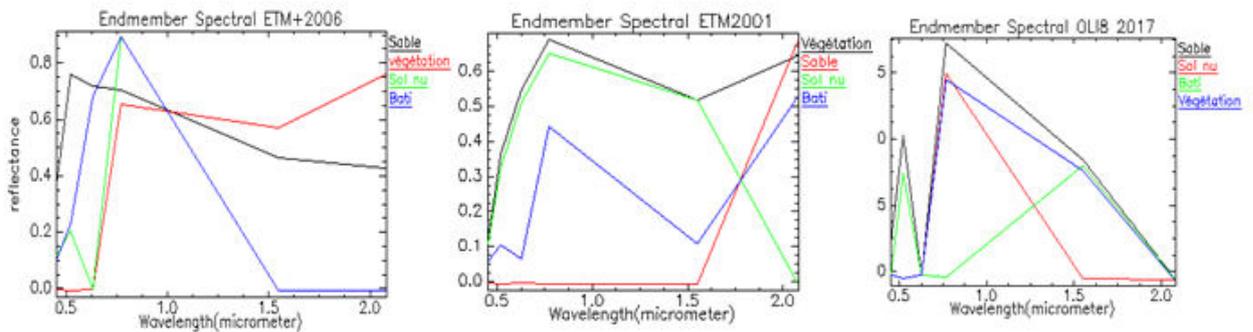


Figure IV.11 La réflectance des Endmembers pour chaque année

La réflectance du spectre des dunes à 0,63 micromètre (bande 3) est plus élevée que celle des spectres de végétation et de sol nu. La réflectance du spectre de végétation à 0,63 micromètre (bande 3) est supérieure à la réflectance à 0,55. micromètre (bande 2) qui indique une très faible chlorophylle des feuilles même pendant la saison des pluies.

Un type de sol a été identifié dans la zone d'étude sol nu représentait des sols sableux grossiers et des sols sableux fins avec une teneur élevée en matière organique couche respectivement. Les deux sols nus ont absorbé plus d'énergie à 2,08 micromètres (bande 7) qu'à 1,65 micromètre (bande 5), ce qui indique la disponibilité de la teneur en eau. Alors que le sol nu est vulnérable à l'érosion, la teneur en humidité est un facteur de résistance à l'érosion du sol.

IV.7 L'indice de changement diachronique

Les méthodes de détection des changements dites diachroniques consistent à évaluer les modifications intervenues entre deux ou plusieurs images. Elles exploitent les différences spectrales des pixels, soit entre plusieurs bandes ou entre les mêmes canaux à des dates différentes, dans le but de mettre en lumière les variations de la nature du sol ou de son couvert.

Leur mise en oeuvre requiert, entre autres, des opérations de superposition pixel par pixel (même résolution et correction géométrique) et une normalisation des images sur la moyenne et l'écart-type [108]. La normalisation s'applique selon la formule :

$$PN = \frac{\partial_R}{\partial_P} (p_{i,j} - \mu_P) + \mu_R \quad (\text{IV.2})$$

PN valeur normalisée du pixel

P_{ij} valeur originale du pixel dans l'image à normaliser

μ_R, σ_R moyenne et écart type de l'image de référence

μ_P, σ_P moyenne et écart-type de l'image à normaliser

L'indice de changement (IC) que nous utilisons sera appliqué aux mêmes bandes spectrales à des années différentes. Il procède par soustraction d'images et tient compte à la fois du sens et de l'ampleur du changement observé entre deux périodes.

Le sens du changement est calculé selon la formule :

$$IC_{i,j} = \frac{255 + D_{1(i,j)} - D_{2(i,j)}}{2} \quad (\text{IV.3})$$

D1 et D2 représentent la même bande spectrale entre deux dates

L'application de cette formule exprime le signe du changement dont le résultat est gardé sur un octet. Le non changement correspondant à 127, les pixels où le changement est positif ont des valeurs supérieures à 127, ceux où il est négatif présentent des valeurs inférieures à ce seuil (positif et négatif supposent une augmentation et une diminution des valeurs des pixels entre les deux dates).

Cet indice de changements est analysé simultanément entre les mêmes bandes des images Landsat. Il permet d'observer l'intensité des modifications des valeurs des pixels (forte, moyenne ou faible diminution ou augmentation).

Résultats et discussion

L'indice de changement nous servira à apprécier l'évolution multitemporelle des signatures spectrales qui induisent les modifications des surfaces terrestres dans le secteur étudié entre 2001, 2006 et 2017. Notons que l'augmentation des réflectances est souvent associée à une dégradation du milieu [108].

L'indice de changement diachronique a été appliqué entre les images LANDSAT ETM du 13-03-2001, ETM+ du 11-03-2006 et OLI8 du 17-03-2017. Il a été calculé sur plusieurs différentes longueurs d'ondes mais nous interpréterons uniquement les résultats des bandes rouge $0.63 \mu\text{m}$ (pour la forte réflectance des sols) et Shortwave Infrared (SWIR2) $2.08 \mu\text{m}$ pour suivre la dynamique de la couverture du sable. Les autres bandes ne montrent d'ailleurs pas de différences significatives quant aux changements survenus entre les deux périodes.

IV.7.1 Indices de changement entre 2001 et 2006

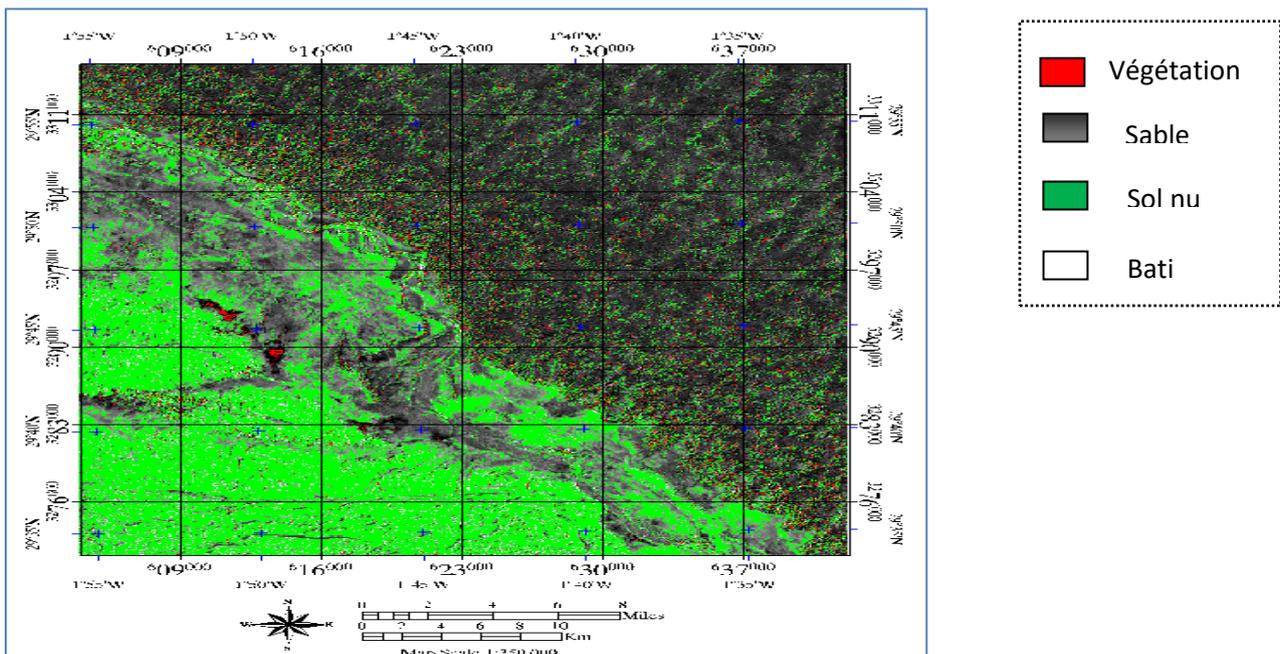


Figure IV.12 L'indice de changement entre 2001 et 2006

L'examen de celle-ci montre que des changements notables ont affecté les formations dunaires au niveau des trois bandes (NDSDI2001, NDSDI2006 et NDSDI2017) utilisés, qui montrent ± les mêmes tendances. Les valeurs de réflectance ont fortement augmenté dans la partie septentrionale de l'image de l'indice de changement 2001-2006. Les crêtes des dunes ont

Résultats et discussion

enregistré les modifications les plus importantes. Cette évolution spatio-temporelle peut s'expliquer par la recrudescence des phénomènes éoliens qui ont mobilisé les sables dunaires dépourvus de couverture végétale. La remise en mouvement des cordons dunaires se traduit par la formation de crêtes vives et l'ensablement des couloirs interdunaires.

Dans la partie méridionale de l'image, les indices révèlent également une augmentation des réflectances qui symbolise une dégradation environnementale entre 2001 et 2006 (Figure IV.12) et même en entre 2006-2017 (Figure IV.13). Au niveau des cordons dunaires, les remaniements successifs et la remise en mouvement des sables dénudés expliquent cette évolution. Cependant dans ce secteur nous observons également une diminution des valeurs de réflectance qui signifierait une restauration des surfaces dégradées.

IV.7.2 Indices de changement entre 2006 et 2017

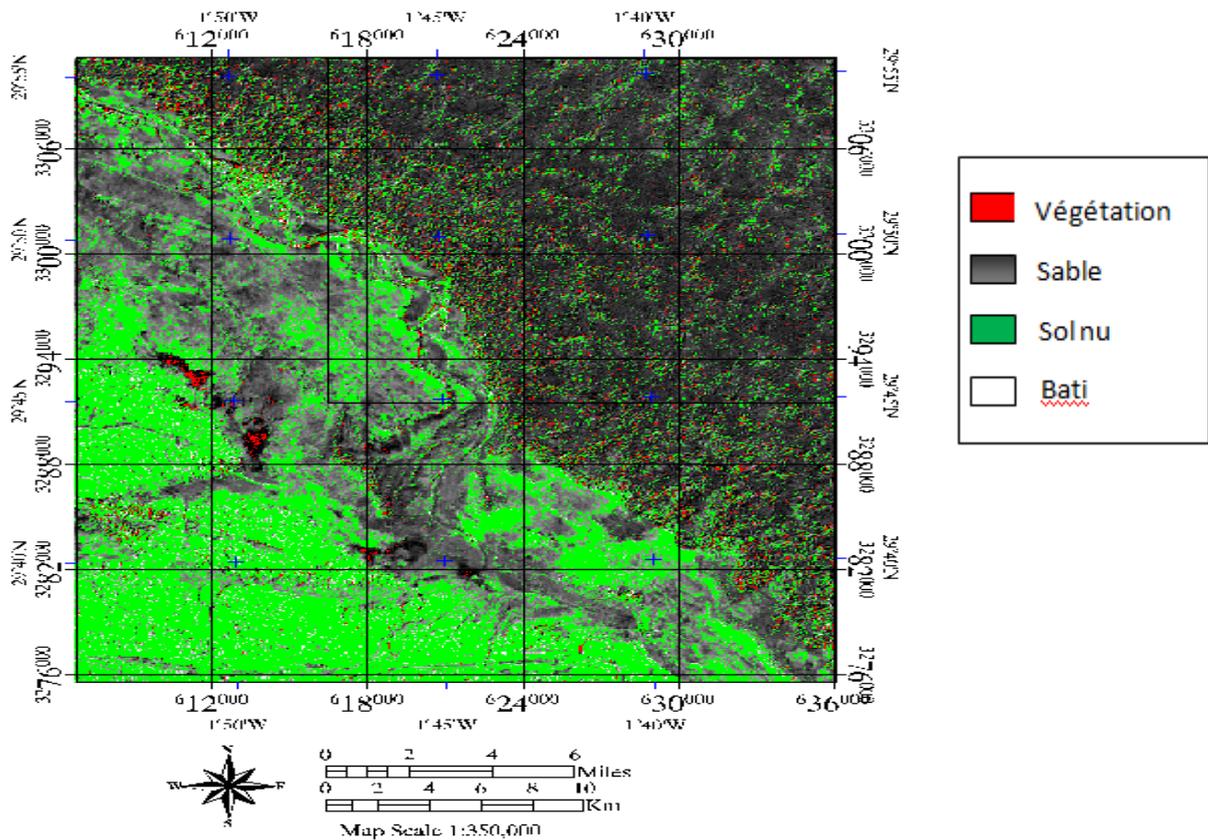


Figure IV.13 L'indice de changement entre 2006 et 2017

IV.8 Représentation et interprétation des résultats

Tableau IV.4 Données départementales de changement de l'utilisation des sols entre 2001 et 2017

| Nom de classe | Entre 2001-2006 | | Entre 2006-2017 | |
|----------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| | Nombre de points | Pourcentage % | Nombre de points | Pourcentage % |
| Végétation | 927973 | 1.549 % | 927973 | 1.469 % |
| Sable | 7532559 | 11.84 % | 7532559 | 15.08 % |
| Non changement | 19267990 | 62.32 % | 12670944 | 62.135% |
| Sol nu | 3493876 | 19.241 % | 3593562 | 18.336% |
| Bâti | 94432 | 1.05 % | 105632 | 2.88% |

Les résultats des images de détection de changement de l'année 2001 et de l'année 2017 présentent un grand changement sur toutes les entités étudiées. Dans cette partie, on va essayer d'évaluer l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol de la zone d'étude tout en essayant de retrouver des explications sur les causes directes et indirectes de ce changement.

L'analyse des histogrammes et du tableau de l'évolution temporelle montre :

- La formation sableuse avec ces deux types dunes et voiles sableux a connu une augmentation très considérable en matière de la surface occupée entre la date de 2001 et 2006. Les dunes ont augmenté de soit 11.84 % de la superficie de la zone d'étude de les années (2001-2006), par rapport un pourcentage de 15.08% des années de (2006-2017).
- La formation forestière, qui comprend les forêts naturelles et les reboisements, est caractérisée par une petite dégradation ; elle recule d'une 1.549 % de la superficie des années (2001-2006) par rapport d'un pourcentage de 1.469% des années(2006-2017).
- Les sols nus ont connu une diminution importante de l'ordre d'une pourcentage de 19.241% des années (2001-2006) a une pourcentage de 18.336% des années(2006-2017).
- Enfin, le Bâti et les infrastructures qui ont connus une importante augmentation avec un pourcentage de 1.05%, des années (2001-2006) a une pourcentage de 2.88% des années (2006-2017) .

IV.8.1 Analyse statistique des histogrammes des images

L'histogramme des canaux (indices de changement) permet d'avoir une idée sur la réflectance. Le logiciel ENVI permet d'obtenir l'histogramme des canaux et les valeurs minimales, maximales et moyennes de chaque canal. (Voir figure IV.14)

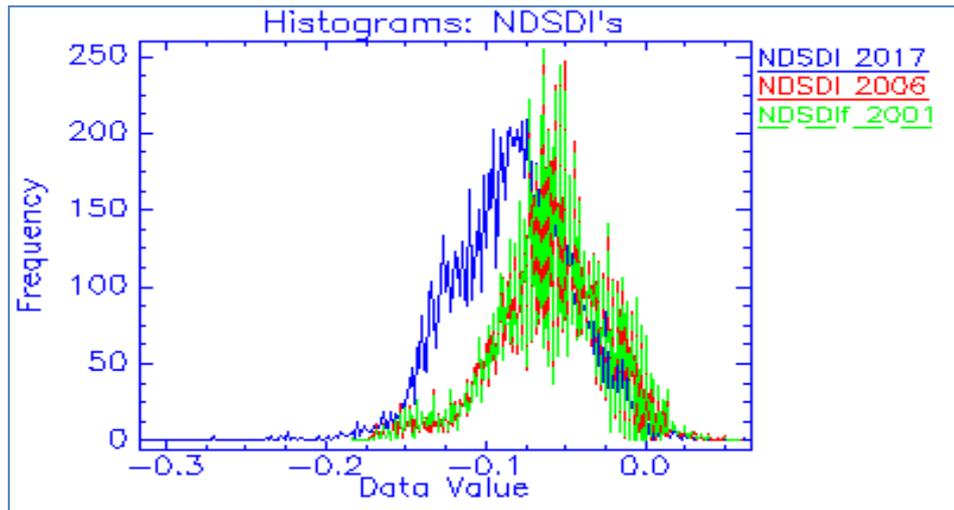


Figure IV.14 Histogramme de l'image de la zone d'étude des années 2001, 2006 et 2017

D'après les résultats statistiques obtenus par l'histogramme des indices de l'images 2001, 2006 et 2017 de la zone d'étude, nous avons constaté que les valeurs de la réflectance varient dans une fourchette de -0.3 à 0.0 qui représente les accumulations sableuse dévoile et plus expressive un changement important entre les trois dates d'acquisitions.

IV.8.2 Les histogrammes de fréquence

Nous utiliserons les histogrammes de fréquence pour comparer les distributions des échantillons.

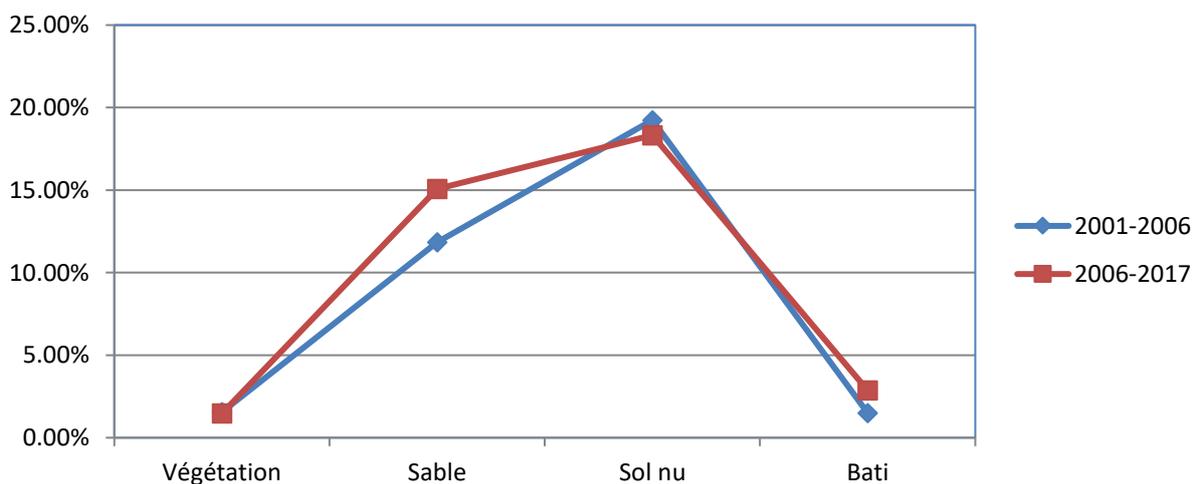


Figure IV.15 Histogrammes de fréquence des différents échantillons.

L'analyse de l'histogramme de changement entre l'NDSI's des trois images (2001, 2006 et 2009), nous a permis de dégager les remarques suivantes:

Résultats et discussion

- Les valeurs de changement de la classe sable des années (2001-2006) apparaissent nettement différentes par rapport à celle des années (2006-2017), avec une valeur de 11.84% , 15.08% ce qui nous permet de dire que il y un changement important observées des accumulations sableuse dans la zone d'étude.
- Le deuxième type de couverture du sol changeable c'est le sol nu parce que il y un déplacement des sables.
- Le groupe qui inclut la végétation représente -0.08% du territoire et il est important de noter qu'une faible couverture végétale apparaissant en terres sablonneuses est en train de mourir.

IV.9 La validation des résultats par la matrice de changement

Le croisement des couches d'occupation des sols de 2001 et 2017 a permet de générer une matrice de changement expliquant les grandes mutations d'occupation des sols entre ces deux dates et une carte de changement (voir tableau IV.5).

La matrice de changement joue deux rôles pertinents dans la détection de changement d'occupation des sols, le premier rôle c'est de calculer la superficie de chaque unité qui a subi le changement de l'année d'observation par rapport à l'année de référence, et le deuxième rôle c'est de faire ressortir la transformation des unités à une autre pour les deux dates d'étude, ce qui permet la compréhension de la dynamique globale intervenue au sein des unités par rapport à une période de référence donnée.

Tableau IV.5 La matrice de changements

| | | 2001-2006 | | | | |
|-----------|------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|
| | | Végétation | Sable | Non change | Sol nu | Bati |
| 2006-2017 | Végétation | -0.08% | 11.84 % | 66.32 % | 19.241 % | 1.05 % |
| | Sable | 15.08 % | +3.24% | 66.32 % | 19.241 % | 1.05 % |
| | Non change | 65.135% | 65.135% | -1.165% | 19.241 % | 1.05 % |
| | Sol nu | 18.336% | 18.336% | 18.336% | -0.905% | 1.05 % |
| | Bati | 2.88% | 2.88% | 2.88% | 2.88% | +1.83% |

IV.9.1 Interprétation des résultats de la matrice des changements

D'après les résultats fournis par la matrice des changements nous avons constaté que toutes les unités d'occupations des sols étudiées entre les deux dates subissent une dynamique de changement sous l'impulsion d'un ou plusieurs facteurs.

- Pour la classe des végétation, nous avons constaté que la régression d'un -0.08% est due probablement à l'effet des facteurs naturels (sécheresse, maladies, vieillissement des

- sujets) et des facteurs anthropiques ce qui transforme cette classe en terres de parcours et des sols nus, cela peut confirmer le processus de dégradation des forêts végétation.
- La classe des dunes présente une dynamique de +3.24% et de transition en classe des sols nus et des voiles sableux grâce à la nature du milieu dunaire qui est constitué principalement de grains de sable capables de se déplacer rapidement sous l'effet du vent (déflation) en laissant assiette d'un sol nu ou des petites formations sableuses des voiles sableux.
 - La classe bâtis et infrastructure occupe un changement important de +1.83%, en même temps, elle progresse sur un autre sol nu, ça est du essentiellement à l'évolution des villes.
 - La classe des sols nus est apparue comme la deuxième classe la plus diminue avec un pourcentage de -0.9% de plus cette classe ont été converti en parcours grâce à l'augmentation de la pluviométrie de l'année qui semble entrainer une amélioration du couvert végétal steppique.

Les résultats obtenus à travers cette étude et ces travaux ;

- Au niveau du la zone d'étude (sud de Bechar), un pourcentage de changement de 11.84% de la classe sable entre l'année 2001 et l'année 2006 et un pourcentage de 15.08% entre l'année 2006-2017 c'est à dire on à un évolution temporelle du processus de déplacement des dunes de sable considéré de 3.24% sur la superficie totale de la zone étude. Cela indique qu'on est face à un sérieux problème d'ensablement, donc des mesures appropriées doivent être prises incessamment pour juguler ce phénomène.

IV.10 Principales techniques de fixation des dunes

Le principe fondamental de la fixation des dunes est d'empêcher le sable de se déplacer pendant un laps de temps suffisant pour permettre à une végétation naturelle ou plantée de s'y établir.

Pour maîtriser l'ensablement, il faut réduire le phénomène de saltation, soit en stabilisant le sol, soit en atténuant le gradient de vitesse du vent près de la surface du sol. On peut également utiliser la vitesse du vent dans les techniques de gestion du sable et des masses dunaires; le vent en grande vitesse prend du sable et dégage ainsi les sites ensablés. Au contraire, il se déleste quand sa vitesse diminue, et dépose alors le sable. À partir de ces principes généraux, on distingue trois types de fixation.

Résultats et discussion

La fixation primaire permet soit de stabiliser mécaniquement les masses sableuses en ralentissant leur vitesse et leur déplacement, soit d'empêcher la formation de ces masses sableuses par:

- La mise en place de palissades et de clayonnages perpendiculaires au vent dominant.
- l'épandage d'un produit ou matériau pouvant couvrir uniformément le sol (mulching).
- le profilage de l'obstacle pour maintenir ou augmenter la vitesse du vent; cette technique accroît
- la capacité de mobilisation et de transport du sable

La fixation définitive ou biologique se fait par la mise en place et la protection d'une couverture végétale ligneuse permanente (semis direct, plantation, mise en défens, gardiennage).

IV.10.1 La fixation mécanique des dunes (les palissades)

La technique des palissades est un obstacle linéaire (palmes de dattier, branchages d'épineux, chaume de mil) interposé entre la source de sable et la zone menacée à protéger. Les accumulations de sable piégé aboutissent à la formation d'une dune artificielle qui devient à son tour un obstacle. La palissade placée à 200 ou 300 mètres du site à protéger est alors orientée perpendiculairement à la direction du vent dominant.

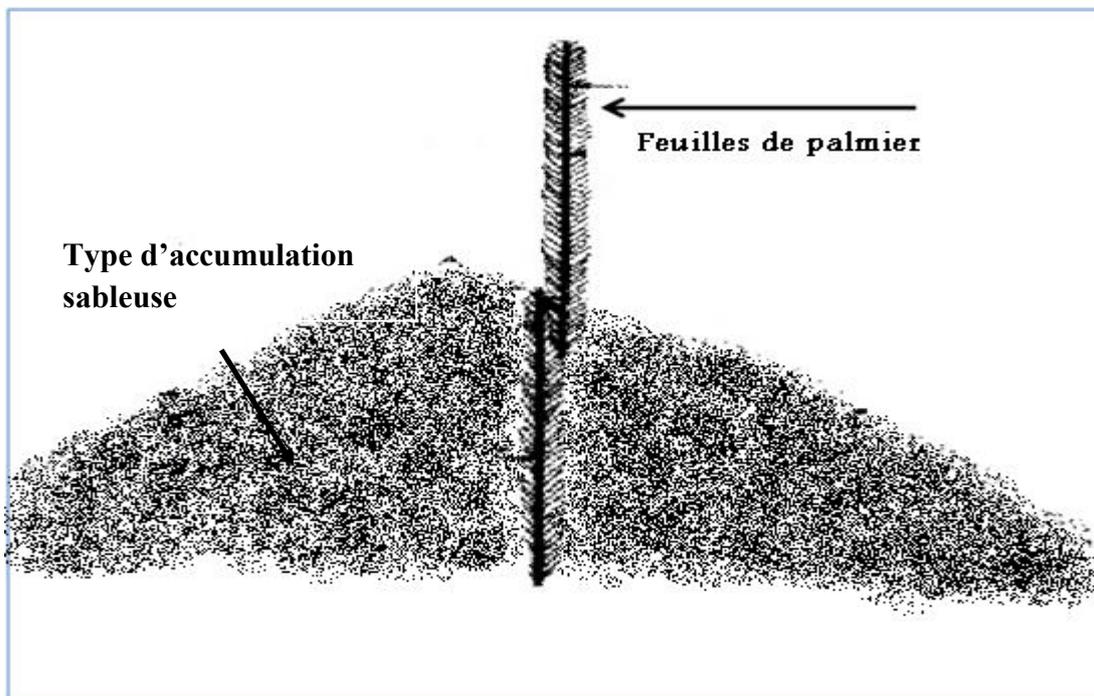


Figure IV.16 Rehaussement de la palissade après accumulation des dépôts de sables FAO 1988.

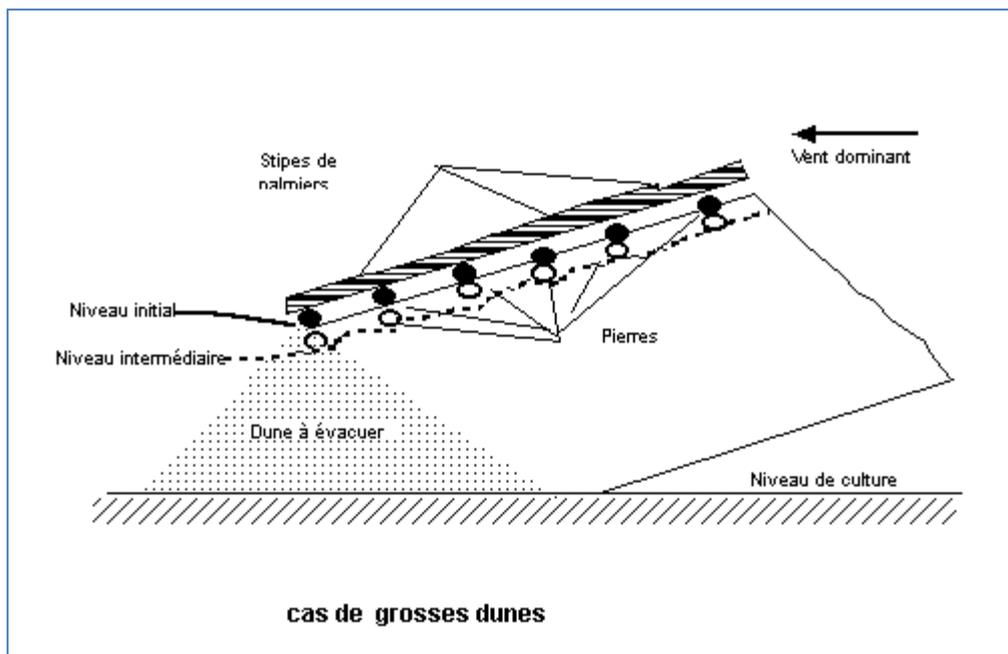
IV.10.2 Fixation biologique

Après la stabilisation des sables par des opérations mécaniques, il est indispensable de fixer les dunes de manière définitive en provoquant leur recolonisation par la végétation. Le but essentiel recherché est de créer l'ambiance du passé, c'est-à-dire la reconquête des espaces nus et des dunes mouvantes en les couvrant d'une végétation aussi dense que possible.

Le choix des espèces forestières, graminéennes locales ou exotiques, pour la fixation biologique des dunes dépend avant tout de la capacité d'adaptation des essences dans le milieu (aridité, structure des sols) et de la finalité du reboisement. Le choix des espèces à planter dans une zone donnée sera guidé nécessairement par les objectifs fixés dans le projet et par la capacité d'adaptations des espèces choisies aux conditions bioclimatiques de la zone en question. Se sont les espèces autochtones, les plus adaptées aux conditions locales seront toujours choisies préférentiellement aux espèces allochtones.

IV.10.3 La technique des pierres à turbulence

Elle utilise le vent comme moyen de lutte contre l'ensablement mais elle est moins fréquente car l'exploitation du vent pour évacuer le sable n'est pas vraiment toujours bien réussie. Mais si cette technique est maîtrisable nous recommandons qu'elle soit applicable dans les dunes qui longent les axes routiers car elle entraîne l'évacuation du sable et freine toute accumulation.



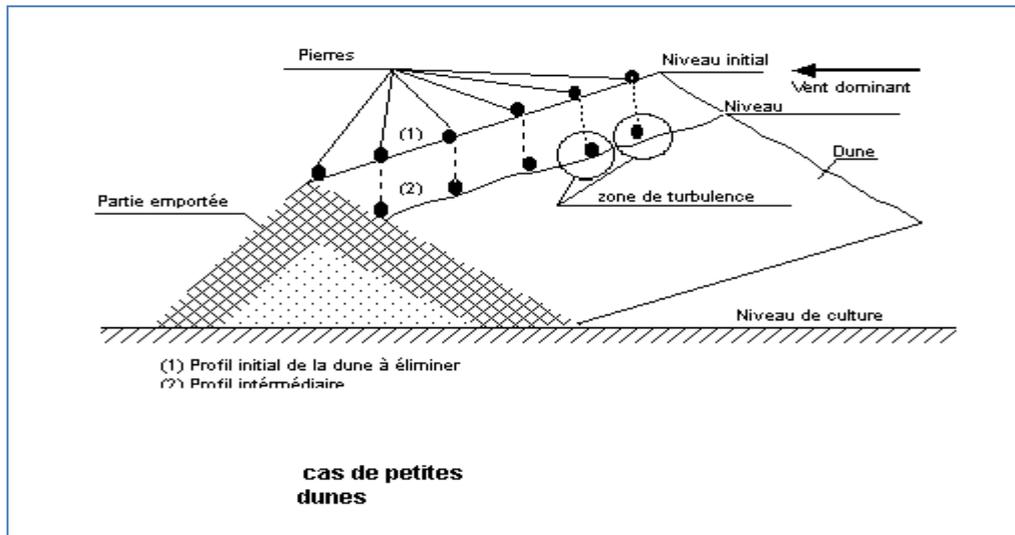


Figure IV.17 Technique De Pierre A Turbulence D'après B.Bensalem, 1983.

IV.10.4 Coûts des principales techniques de lutte contre l'érosion éolienne

Il faut 3200 mètres linéaires pour fixer un hectare. La fixation biologique réalisée sous le vent dans de nombreuses palmeraies, les phoéniculteurs vendent les palmes à l'unité. Il faut combiner les critères de coûts à d'autres critères comme le matériel localement disponible, les ressources hydriques, la main d'œuvre, etc.

Tableau IV.6 Les coûts des techniques de lutte contre l'érosion éolienne

| Aménagement | Techniques | Coût en euros par hectare |
|--------------------|--------------------|---------------------------|
| Palissades | palmes | 165 |
| | branchages | 311 |
| | fibrociment | 1600 |
| Quadrillage | mailles plastiques | 3 335 |
| Mulching | pneus usagés | 267 |
| | bitume généralisé | 603 |
| | bitume en bande | 166 |

(Cours d'avril 2005). Source : (CSFD, 2005)

IV.11 Références

- [82] [Thi Thanh Hien PHAM](#), Ferdinand BONN, and Jean-Marie DUBOIS. Démarche méthodologique pour la détection des changements d'un milieu morcelé en utilisant des images à moyenne résolution : Application à une région littorale au viêt-nam. *Revue Télédétection*, vol. 7, pages 303-323, août 2007.
- [83] [Lu D.](#), Mausel P., Brondizio E., and Moran E. Change detection tectonique. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n 12, pages 2365-2407, 2004.
- [84] [Rifman](#), S. S. et al., Experimental study of application of digital image processing technique to Landsat data: TRW Systems Group Report 26232-6004-TU-00 for NASAGoddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 1975.
- [85] [Sabins](#), F. F. JR., *Remote Sensing — Principles and interpretation*, W. H. Freeman and Company, 1978
- [86] [Victor L. Selivanov](#). Undecidability in Some Structures Related to computation Theory. *J. Log. Comput.*, vol. 19, no. 1, pages 177–197, 2009.
- [87] [Roland Billen](#) & Eliseo Clementini. Étude des caractéristiques projectives des objets spatiaux et de leurs relations. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 14, pages 145–165, 2004.
- [88] [Max J. Egenhofer](#) & Mark David M. Naive Geography. In *Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS - International Conference, COSIT'95*. volume 988 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–15. Springer Berlin / Heidelberg, 1995.
- [89] [Andrew U. Frank](#). Qualitative spatial reasoning about distances and directions in geographic space. *Journal of Visual Languages & Computing*, vol. 3, pages 343–371, 1992.
- [90] [David Hernández](#). Maintaining Qualitative Spatial Knowledge. In [Andrew U. Frank](#) & [Irene Campari](#), editeurs, *Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS - European Conference, COSIT'93*, numéro 716 in *Lecture Notes in Computer Science*, pages 36–53. Springer-Verlag, 1993.
- [91] [Roop K. Goyal](#) & [Max J. Egenhofer](#). Consistent Queries over Cardinal Directions across Different Levels of Detail. In *DEXA Workshop*, pages 876–880, 2000.
- [92] [Jean-Paul Cheylan](#), Sylvie Lardon, Helene Mathian & Léna Sanders. Les problématiques liées au temps dans les SIG. *Revue Internationale de Géomatique*, no. 4, pages 287–305, 1997.

- [93] Nelson, R. F., Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.49, p.1303-1314, 1983.
- [94] Engvall, J. L., Tubbs, J. D. and Holmes, Q. A., Pattern recognition of Landsat data based on temporal trend analysis, Remote Sensing of Environment, Vol. 6, p.303-314, 1977.
- [95] Malila, W. A., Change vector analysis: an approach for detection forest changes with Landsat, Proceedings of the 6th Annual Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, p. 326-335, 1980.
- [96] Cohen, J. and Cohen, P., Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd ed., Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1983.
- [97] Collins, J. B. and Woodcock, C. E., An assessment of several linear change detection technique for mapping forest mortality using multitemporal Landsat data, Remote sensing of Environment, Vol. 56, p.66- 77, 1996.
- [98] Lambin, E. F. and Strahler, A. H., Change-vector analysis in multitemporal space: A tool to detect and categorize land cover change processes using high temporal resolution satellite data, Remote Sensing of Environment, Vol.48, p.231-244, 1994.
- [99] Schowengerdt, R. A., Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing, Academic Press, Inc., London, 1983.
- [100] Weismiller, R.A., Kristof, S.J., Scholz, D.K., Anuta, P.E., and Momen, S.A., Change detection in coastal zone environments, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.43, p.1533-1539, 1977.
- [101] Lunetta, R. S., Application, project formulation and analytical approach, In: Remote Sensing Change Detection — environmental monitoring methods and application, Lunetta, R.S. and Elvidge, C. D., Eds, Taylor & Francis Ltd., London, 1999.
- [102] Chen, G., Hay, G., Carvalho, L., et Wulder, M. (2012). Object-based Change detection. International Journal of Remote Sensing , 33 (14), 4434-4457.
- [103] A.R. Lima, G. Sauermann, H.J Herrmann, and K. Kroy. Modeling a dune field. Physica A : Statistical Mechanics and its Applications, 310(3-4), pages 487-500, december 2002.
- [104] Bonn F. et Rochon G., 1992. Précis de télédétection Volume 1 : Principes Presses de l'Université du Québec/AUPELF.
- [105] Hall F.G., Huemmrich K.F., Goetz S.J., Sellers P.J. and Nickeson P.J. 1992. Satellite remote sensing of surface energy balance : success, failures and unresolved issues in FIFE Journal of geophysical research, 97, 19061-19089.

- [106] [L.zaoui](#), A.Hassini and A.H.Belbachir (2015), Using the vector Analysys for monitoring sand dune in algerian Sahara. Workshope 2015 ,LAAR, USTO ,Oran.
- [107] [Donnay, J.P.](#), 1998. Traitement d'images numériques en télédétection. (Corrections géométriques, classifications). Notes de cours, Univ. de Liège: 71-83.
- [108] [Courel, M.F.](#), 1986. Variations récentes de l'albédo de surface dans les régions sahéliennes et critique du mécanisme biogéographique de Charney. INQUA, Dakar symposium. «changements globaux en Afrique »: 87-90.

Bibliographie

[Aaron Beller](#), Tom Giblin, Khanh V. Le, Steve Litz, Tim Kittel & David Schimel. A temporal GIS prototype for global change research. In GIS/LIS'91, volume 2, pages 752–765, 1991.

[ABDELLAOUI, A.](#) (2009), Potentialité de l'imagerie satellitale moyenne résolution pour le suivi du transport de sable en milieu urbain pré-saharien", Séminaire International : Dynamiques des paysages et Télédétection", Tunis, 9-13 juin 2009.

[ABDELLAOUI A.](#) 1996- Changements globaux et désertification, précis de télédétection volume 02 AUPELF_UREF pp . 535-569.

[Agnès Voisard](#), Michel Scholl & Philippe Rigaux. Spatial databases with application to gis. Morgan Kaufmann, 2001.

[Alberto Belussi](#). Mauro Negri & Giuseppe Pelagatti. Management of data changes in geodatabases : time component in GIS. Geomatics Info Magazine International, vol. 13, no. 7, pages 41–43, 1999.

[Alpers W.R.](#) and Rüfenach C.L. The effect of orbital motions on synthetic aperture radar imagery of ocean waves. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Antennas Propag. AP-27 :685-690, 1979.

[Alina Dia Miron](#). Découverte d'associations sémantiques pour le Web Sémantique Géospatial : le framework ONTOAST. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2009.

[Andrew U. Frank](#). Qualitative spatial reasoning about distances and directions in geographic space. Journal of Visual Languages & Computing, vol. 3, pages 343–371, 1992.

[Anne Ruas](#). Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie. PhD thesis, Université de Marne la Vallée, 1999.

[Anne Ruas](#). Le changement de niveau de détail dans la représentation de l'information géographique. PhD thesis, Université de Marne-La-Vallée, 2004.

[Antony Galton](#). Fields and Objects in Space, Time, and Space-time. Spatial cognition and computation, vol. 4, no. 1, pages 39–68, 2004.

[Anthony G. Cohn](#) & Nicholas Mark Gotts. The 'Egg-Yolk' Representation of

Regions with Indeterminate Boundaries. In Burrough P.A. & Andrew U. Frank, editeurs, Geographic Objects with Indeterminate Boundaries., GISDATA Series, Vol. 2, pages 171–187. Taylor & Francis, 1996.

[A.R. Lima](#), G. Sauermann, H.J Herrmann, and K. Kroy. Modeling a dune field. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 310(3-4), pages 487-500, december 2002.

[BENALLA, M.](#) 1996. Érosion éolienne et ensablement dans le Tafilalet: cas des palmeraies de JorfHannabou et El Krai. Mémoire de géologie appliquée, Faculté des sciences, Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 48 p.

[BENSAID A.](#) et [SMAHI Z.](#) 2003. Utilisation de la télédétection et des SIG pour l'aide à la surveillance du risque de dégradation des parcours steppiques. *Revue Télédétection*, n° 5, Vol. 3, ISSN : 1028-7736.

[BIPM.](#) Résolution 1 de la 17e réunion de la CGPM (1983), 1983.

[Bonn F.](#) et [Rochon G.](#), 1992. Précis de télédétection Volume 1 : Principes et Méthodes, Presses de l'Université du Québec/AUPELF.

[Blom R.G](#) and [Ela hi C.](#) Multifrequency and multipolarization radar scatterometry of sand dunes and comparison with spaceborne and airborne radar images. *J.Geophys. Res.* 92 :7889- 3073, 1987.

[Blom R.G.](#) Effects of variation in look angle and wavelength in radar images of volcanic and aeolian terrains, or now you don't. *Int. J. Remote Sens.* 9(5) :945-965, 1988.

[Blom R.G](#) and [Ela hi C.](#) Spaceborne and airborne imaging radar observations of sand dunes. *J.Geophys.* 86, pages 30613073, 1981.

[Blumberg D.G.](#) Remote sensing of desert dune forms by polarimetric synthetic aperture radar (sar). *Remote Sens. Environ.* 65 :204-216, 1998.

[Claude Grasland.](#) Spatial analysis of social facts. In *Handbook of Quantitative Geography*. Bavaud F. & Mager C., 2010.

[Chen, G.](#), Hay, G., Carvalho, L., et [Wulder, M.](#) (2012). Object-based Change detection. *International Journal of Remote Sensing* , 33 (14), 4434-4457.

[Christophe Gouinaud](#), [Atteib Ibrahim Doutoum](#), [Pascale Gouinaud](#), and [Mamadou Kaba Traoré](#). Sar image automated detection of dune area. *Geosciences And Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2013 IEEE International. Melbourne - Australia, pages 14891492, july 2013.

[Christophe Claramunt](#) & Marius Thériault. Managing Time in GIS : An Event-Oriented Approach. In Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases, pages 23–42, London, UK, 1995. Springer-Verlag.

[Christine Plumejeaud](#), Jerome Gensel, Marlène Villanova-Oliver, Maher Ben Rebah & Guillaume Vergnaud. Modélisation de hiérarchies territoriales multiples -Vers la gestion d'informations spatio-temporelles évolutives. In Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2009), Paris, France, 2009.

[Christian Freska](#). Qualitative Spatial Reasoning. In David M. Mark & Andrew U. Frank, éditeurs, Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.

[Claude Grasland](#) & Jérôme Gensel. ESPON 2013 Database, 2nd Interim Report, 2010.

[Claude Grasland](#). Les maillages territoriaux : niveau d'observation ou niveaux d'organisation. In Actes des entretiens J. Cartier, volume 76-77-78 .

[Colette Cauvin](#). Au sujet des transformations cartographiques de position Cybergeog : Revue européenne de Géographie, no. 15, 1997.

[Cohen, J.](#) and Cohen, P., Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd ed., Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1983.

[Collins, J. B.](#) and Woodcock, C. E., An assessment of several linear change detection technique for mapping forest mortality using multitemporal Landsat data, Remote sensing of Environment, Vol. 56, p.66- 77, 1996.

[Courel, M.F.](#), 1986. Variations récentes de l'albédo de surface dans les régions sahéliennes et critique du mécanisme biogéographique de Charney. INQUA, Dakar symposium. «changements globaux en Afrique »: 87-90.

[David Hernández](#). Maintaining Qualitative Spatial Knowledge. In Andrew U. Frank & Irene Campari, éditeurs, Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS - European Conference, COSIT'93, numéro 716 in Lecture Notes in Computer Science, pages 36–53. Springer-Verlag, 1993.

[Denise Pumain](#) & Thérèse Saint-Julien. L'analyse spatiale - 1. Localizations dans l'espace. collection Cursus. Armand Colin, Paris, 1997.

[Denise Pumain](#) & Marie-Claire Robic. Le rôle des mathématiques dans une "révolution" théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970. Revue d'Histoire des Sciences Humaines, vol. 1, no. 6, pages 123– 144, 2002.

[Denise Pumain](#) & Thérèse Saint-Julien. L'analyse spatiale - 1. Localizations dans l'espace. collection Cursus. Armand Colin, Paris, 1997.

[Donna Peuquet](#). Representations of time and space. Guildford Press, New York, NY, USA, 2002.

[Donnay, J.P.](#), 1998. Traitement d'images numériques en télédétection. (Corrections géométriques, classifications). Notes de cours, Univ. de Liège: 71-83.

[Edwin McKenzie](#) & Richard Thomas Snodgrass. An evaluation of relational algebras incorporating the time dimension in databases. ACM computing surveys, vol. 23, no. 4, pages 501–543, 1991.

[Eliseo Clementini](#) & Robert Laurini. Un cadre conceptuel pour modéliser les relations spatiales. Revue des Nouvelles Technologies de l'Information (RNTI), vol. E-14, pages 1–17, 2008.

[Eliseo Clementini](#) & Paolino Di Felice. A spatial model for complex objects with a broad boundary supporting queries on uncertain data. Data and Knowledge Engineering, vol. 37, pages 285–305, 2001.

[Eliseo Clementini](#), Paolino Di Felice & Peter van Oosterom. A Small Set of Formal Topological Relationships Suitable for End-User Interaction. In SSD, pages 277–295, 1993.

[Engvall, J. L.](#), Tubbs, J. D. and Holmes, Q. A., Pattern recognition of Landsat data based on temporal trend analysis, Remote Sensing of Environment, Vol. 6, p.303-314, 1977.

[FRYBERGER S.G.](#) 1979: Dunes forms and wind regime. In: McKee, E.D. (edition) A study of global sand seas. U.S. Geological survey Professional paper, pp. 137-169.

[GIRARD M. C.](#) et [GIRARD C. M.](#), (1999) - Traitement des données de télédétection. Ed. Dunod. Paris, 511 p.

[Haddouche idriss](#) . La télédétection et la dynamique des paysages en milieu aride et semi-aride En algerie : cas de la region de naâma, thèse doctorat page 128,2009, Université Abou-bekr Belkaid Tlemcen.

[Hall F.G.](#), Huemrich K.F., Goetz S.J., Sellers P.J. and Nickeson P.J. 1992. Satellite remote sensing of surface energy balance : success, failures and unresolved issues in FIFE. Journal of geophysical research, 97, 19061-19089.

[Hasselmann K.](#), Raney R.K., Plant W.J., Alpers W.R., Shuman R.A., Lyzenga D.R., Rüfenach C.L., and Tucker M.J. Theory of synthetic aperture radar ocean imaging : A nadir view. *J.Geophys. Res.* 90 :4659-4686., 1985.

[Hélène Mathian](#) & Marie Piron. Echelles géographiques et méthodes statistiques multidimensionnelles. In Léna Sanders, editeur, *Modèles en analyse spatiale*. Hermès, 2001.

[IGN,France,IGNF-spatialRefSys](#)
http://lambert93.ign.fr/fileadmin/files/IGNFspatial_ref_sys.sql, 2010.

[Ian Gregory](#). Time-variant GIS Databases of Changing Historical Administrative Boundaries : A European Comparison. *Transactions in GIS*, vol. 6, no. 2, pages 161–178, 2002.

[Iguhi T.](#), Inomata H., Masaki H., and Fugono N. Ocean wave spectra derived from shuttle imaging radar-b imagery and surface measurements. *J.Geophys. Res.* 93 :15367-15373, 1988.

[James F. Allen](#). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Commun. ACM*, vol. 26, no. 11, pages 832–843, 1983.

[James F. Allen](#). Towards a general theory of action and time. *Artificial Intelligence*, vol. 23, pages 123–154, 1984.

[James F. Allen](#) & George Ferguson. Actions and events in interval temporal logic. Technical report tr521, Computer Science Department, University of Rochester, 1994.

[Jean-Paul Cheylan](#), Denis Gautier, Sylvie Lardon, Thérèse Libourel, Helene Mathian, Serge Motet & Léna Sanders. Les mots du traitement de l'information spatio-temporelle. *Revue internationale de Géomatique*, vol. 9, no. 1, pages 11–23, 1999.

[Jérôme Euzenat](#). Representation granulaire du temps. *Revue d'intelligence artificielle*, vol. 7, no. 3, pages 329–361, 1993.

[Jean-Paul Cheylan](#), Sylvie Lardon, Helene Mathian & Léna Sanders. Les problématiques liées au temps dans les SIG. *Revue Internationale de Géomatique*, no. 4, pages 287–305, 1997.

[Lambin, E. F.](#) and Strahler, A. H., Change-vector analysis in multitemporal space: A tool to detect and categorize land cover change processes using high temporal resolution satellite data, *Remote Sensing of Environment*, Vol.48, p.231-244, 1994.

[Lanaster N.](#) *Geomorphology of desert dunes* 1995. Routledge, New York.

Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W., Remote Sensing and Image Interpretation 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000.

Léna Sanders, Denis Gautier & Hélène Mathian. Les concepts de système spatial et de dynamique, un essai de formalisation. Revue internationale de Géomatique, vol. 9, no. 1, pages 25–44, 1999.

Lunetta, R. S., Application, project formulation and analytical approach, In: Remote Sensing Change Detection — environmental monitoring methods and application, Lunetta, R. S. and Elvidge, C. D., Eds, Taylor & Francis Ltd., London, 1999.

Lyzenga D.R. An analytic representation of the synthetic aperture radar image spectrum for ocean waves. J.Geophys. Res. 93 :13859-13865, 1988.

MAB, MAB Technical Notes 7 for the Map of the world distribution of arid regions, 1977, published by the UNESCO, Paris, 1979.

Malila, W. A., Change vector analysis: an approach for detection forest changes with Landsat, Proceedings of the 6th Annual Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, p. 326-335, 1980.

Marc D'Iorio Président , Société canadienne de la télédétection « Journal Canadien de la télédétection » (J C T),2000

Martin Ester, Hans-Peter Kriegel & Jörg Sander. Spatial Data Mining : A Database Approach. In Lecture Notes in Computer Science, editeur, Proc. Of the Fifth Int. Symposium on Large Spatial Databases (SSD '97), pages 47–66,Berlin, Germany, 1997. Springer.

MAUREL P., 2002 - Initiation à la télédétection – UMR Cemagref / ENGREF PP 5-39

Michael F. Worboys. A generic model for spatio-bitemporal geographic information. In M.J Egenhofer & R.G. Golledge, editeurs, Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information Systems., pages 25–39. Oxford University Press, 1998.

Muthar Qong. Estimation of linear dune features including height, slope and direction from SAR image., 1999. In Books of Abstracts, Second International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, ITC, The Netherlands.

Nelson, R. F., Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.49, p.1303-1314, 1983.

Ozer, P., Gassani, J., Hountoundji, Y.-C., Niang, A.J., Ambouta, K., 2007. La désertification est-elle en recul au Sahel ? Bois et forêts des tropiques, n° 293(3): 23-28.

[Paul Y. Villeneuve](#). Un paradigme pour l'étude de l'organisation spatiale des sociétés. Cahiers de géographie du Québec, vol. 16, no. 38, pages 199–211, 1972.

[Philippe Rigaux](#) & Michel Scholl. Multi-Scale Partitions : Application to Spatial and Statistical Databases. In SSD '95 : Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Spatial Databases, numéro 3-540-60159-7, pages 170–183, London, UK, 1995. Springer-Verlag.

[POUCHIN T.](#), 2001 a - Elaboration d'un observatoire paysager, Application à l'estuaire de Seine. Centre Interdisciplinaire de Recherche en Transports et Affaires Internationales, Le Havre, Thèse de Doctorat, 316 p.

[POUCHIN T.](#), 2001 b - Cours de télédétection. Université Le havre. France. p 44. l'estentionurbaine(wilaya de Djelfa). Mém. Ing. Centre universitaire de Djelfa, pp18-33.

[R.A. BAGNOLD](#). The physics of Blown Sand and Desert Dunes. London : Chapman and Hall, 1941.

[Richards, J.A](#) and [Jia X.](#), Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction (3rd ed., Springer Verlag, New York), 1999.

[Richard Thomas Snodgrass](#). Temporal databases. In Andrew U. Frank, I. Campari & U. Formentini, editeurs, Proceedings of Theories and Methods of Spatio-temporal reasoning, pages 22–64. Springer-Verlag, New-York, 1992.

[Rignot E.J.M.](#) and [Van Zyl J.J.](#) Change detection techniques for ers-1 sar data. IEEE transactions on geosciences and remote sensing, Vol.31, N4, pages 896906, july 1993.

[Rifman, S. S.](#) et al., Experimental study of application of digital image processing technique to Landsat data: TRW Systems Group Report 26232-6004-TU-00 for NASAGoddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 1975.

[Robert Chignoli](#), [Pierre Crescenzo](#) & [Philippe Lahire](#). Lien entre classes dans les langages à objets. Rapport de recherche 97-22, Laboratoire I2S, Université de Nice-Sophia-Antipolis, 1997.

[Roland Billen](#) & [Eliseo Clementini](#). Étude des caractéristiques projectives des objets spatiaux et de leurs relations. Revue Internationale de Géomatique, vol. 14, pages 145–165, 2004.

[Roop K. Goyal](#) & [Max J. Egenhofer](#). Consistent Queries over Cardinal Directions across Different Levels of Detail. In DEXA Workshop, pages 876–880, 2000.

[Sabins, F. F. JR.](#), Remote Sensing — Principles and interpretation, W. H. Freeman and Company, 1978

[Salim CHITROUB](#). Combinaison de classifieurs : une approche pour l'amélioration de la classification d'images multisources/multidates de télédétection. Xème Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF.

[Schowengerdt, R. A.](#), Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing, Academic Press, Inc., London, 1983.

[S. Jensen Christian](#), Curtis Dyreson, Michael Böhlen & al. The Consensus Glossary of Temporal Database Concepts. Temporal Databases : Research and Practice, vol. 1399, pages 367–405, 1998.

[Stefano Spaccapietra](#), Nadine Cullot, Christine Parent & Christelle Vangenot. On spatial ontologies. In 6th Brazilian Symposium On Geoinformatics, Campos do Jordao, Brazil, 22-24 November 2004.

[Sylvie Lardon](#), Thérèse Libourel & Jean-Paul Cheylan. Concevoir la dynamique des entités spatio-temporelles. Revue internationale de géomatique, vol. 9, no. 1, pages 67–99, 1999.

[Thi Thanh Hien PHAM](#), Ferdinand BONN, and Jean-Marie DUBOIS. Démarche méthodologique pour la détection des changements d'un milieu morcelé en utilisant des images à moyenne résolution : Application à une région littorale au viêt-nam. Revue Télédétection, vol. 7, pages 303-323, août 2007.

[Théodore MONOD](#). Terre et ciel. Entretien avec Sylvain Estibal. A tes sud, 317 pages, 1998.

[U.S. Geological Survey Earth Resources Observation and Science \(EROS\)](#)
NOAA Satellite, 2004, Télédétection – INRIA, Mars 2001

[Valenzuela G.R.](#) Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves - review. Bound. Layer Met. 13 :61-85, 1978.

[Va_hon P.W.](#) and Dobson F.W. Validation of wind vector retrieval from ers-1 image over the ocean. The Global Atmosphere and Ocean System 5 :177-187, 1996.

[Victor L. Selivanov](#). Undecidability in Some Structures Related to computation Theory. J. Log. Comput., vol. 19, no. 1, pages 177–197, 2009.

[Waldo R. Tobler](#). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, vol. 46, no. 2, pages 234–240, 1970.

[Waldo R. Tobler](#). Smooth pycnopylactic interpolation for geographical regions. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 74, pages 519–530, 1979.

[Weismiller, R.A.](#), Kristof, S.J., Scholz, D.K., Anuta, P.E., and Momen, S.A., Change detection in coastal zone environments, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.43, p.1533-1539, 1977

[Yasuhiko Takahara, D. Macko & Mihajlo D. Mesarovic](#). Théorie des systems hiérarchiques à niveaux multiples. *Economica*, 1980.

[Yumi Iwasaki](#). Real-World Applications of Qualitative Reasoning. *IEEE Expert : Intelligent Systems and Their Applications*, vol. 12, no. 3, May 1997.

[Yves Baudot\(Nadar\)](#) « Le peti guide de la télédétection » EODesk, belgian Science Policy, 2004

ANNEXES :

A : Normalized Differential Sand Dune Index (NDSDI).

B : La matrice de changement.

C : Les publications de l'auteur

Annexe A: NDSDI (Normalized Differential Sand Dune Index)

Le NDSDI met en évidence l'activité du sable ; les valeurs de chaque pixel comprises entre le 0 et 1 représentent successivement le sol nu et le couvert végétal maximal, le néocanal résultant présente un gradient croissant d'activité sable allant de la couleur noir qui signifie absence de couverture sable jusqu'au blanc qui présente une très forte activité sable.

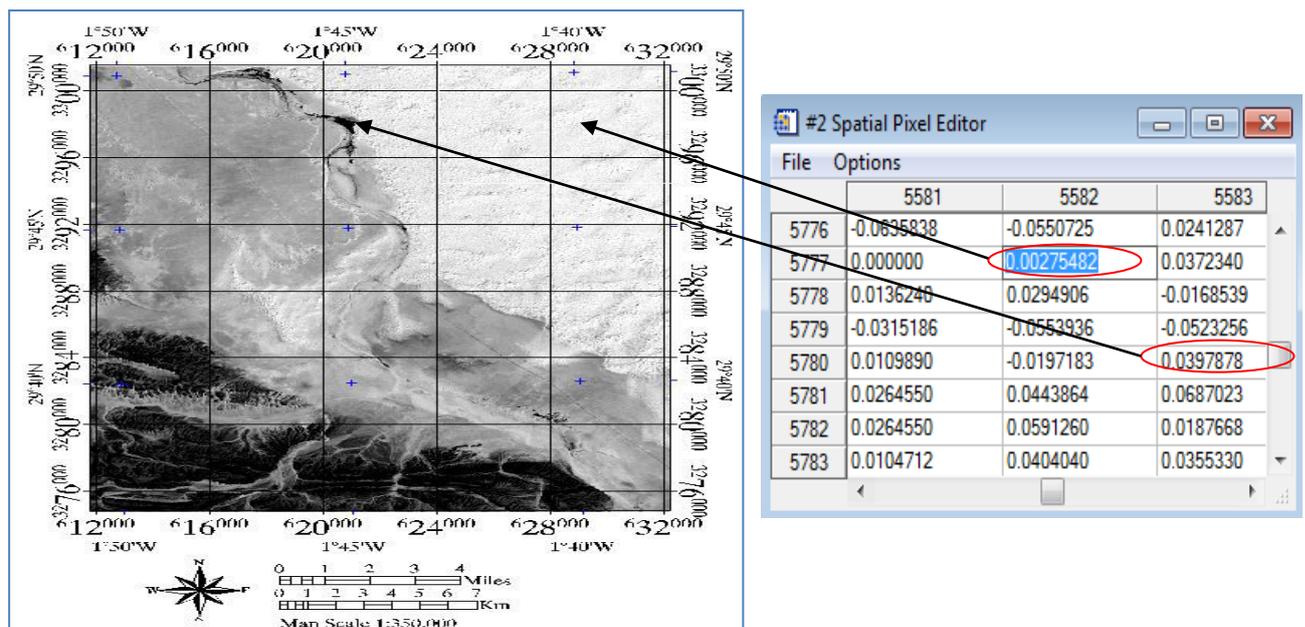


Figure IV.7 Image satellitaire de l'indice (NDSDI) du 13-mars-2001.

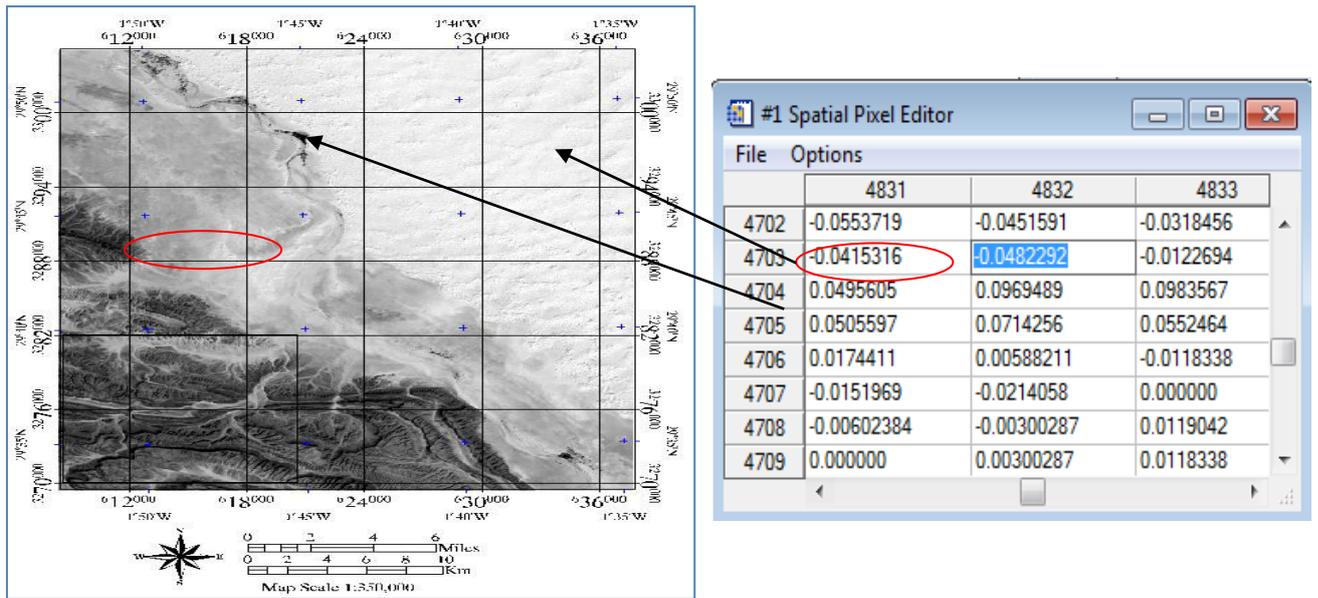


Figure IV.8 Image satellitaire de l'indice NDSI du 13-Mars-2006.

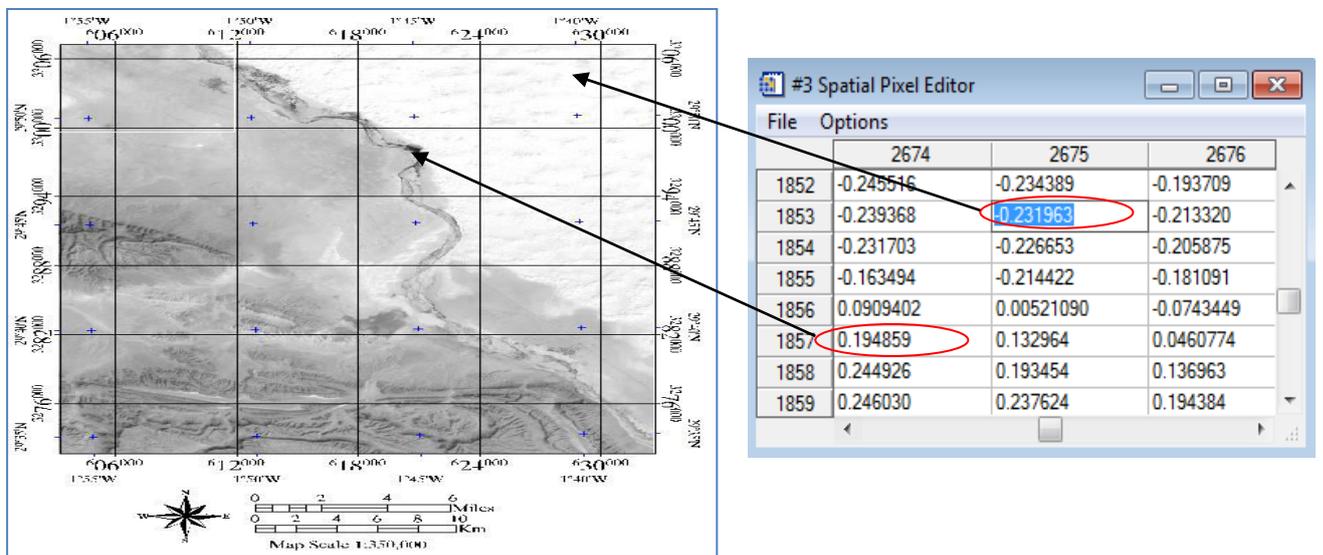


Figure IV.9: Image satellitaire de l'indice (NDSI) du 17-Mars-2017.

Annexe B: La matrice de changement

Le croisement des couches d'occupation des sols de 2001 et 2017 a permis de générer une matrice de changement expliquant les grandes mutations d'occupation des sols entre ces deux dates et une carte de changement (voir tableau IV.6).

La matrice de changement joue deux rôles pertinents dans la détection de changement d'occupation des sols, le premier rôle c'est de calculer la superficie de chaque unité qui a subi le changement de l'année d'observation par rapport à l'année de référence, et le deuxième rôle c'est de faire ressortir la transformation des unités à une autre pour les deux dates d'étude, ce qui permet la compréhension de la dynamique globale intervenue au sein des unités par rapport à une période de référence donnée.

Tableau IV.6 La matrice de changement

| | | 2001-2006 | | | | |
|-----------|------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|
| | | Végétation | Sable | Non change | Sol nu | Bati |
| 2006-2017 | Végétation | -0.08% | 11.84 % | 66.32 % | 19.241 % | 1.05 % |
| | Sable | 15.08 % | +3.24% | 66.32 % | 19.241 % | 1.05 % |
| | Non change | 65.135% | 65.135% | -1.165% | 19.241 % | 1.05 % |
| | Sol nu | 18.336% | 18.336% | 18.336% | -0.905% | 1.05 % |
| | Bati | 2.88% | 2.88% | 2.88% | 2.88% | +1.83% |

Annexe C: Les publications de l'auteur

C.1 Publication en revue internationale :

- [L.zaoui](#), A.Hassini and A.H.Belbachir (2017) , Assessing Spatio-Temporel Sand Dune Changes Within the Sahara of Algeria Using Landsat Satellite Data, Volume 32, Issue N°4 , Internationl Journal of Ecology & Development.

C.2 Communication nationale :

- 1- [L.zaoui](#), A.Hassini and A.H.Belbachir (2015), Using the vector Analysys for monitoring sand dune in algerian Sahara. Workshope 2015 ,LAAR, USTO ,Oran.
- 2- [L.zaoui](#), A.Hassini (2017) Spatio-temporel study of sand dune movement by Radar imagery : the case of the Algerian Sahara. Séminaire nationale sur le laser et ses Application.

Conclusion générale et Perspectives

Dans cette recherche, nous avons tenté de démontrer comment la télédétection pouvait venir en aide à l'acquisition d'information, au traitement et à l'interprétation de territoires arides et semi-arides aux prises avec le problème de l'ensablement. Nous avons pu procéder à des mesures ainsi qu'à la détection de zones de changements. Cette expérimentation démontre qu'il est effectivement possible d'évaluer les déplacements, mais seulement lorsque nous sommes en présence de dunes bien formées et visuellement identifiables.

De plus, les mesures ont une précision qui est déterminée par la résolution spatiale des images et par la facilité de distinguer les formes dunaires à l'aide de l'interprétation de l'image et des données auxiliaires d'une année de mesure à l'autre.

Le NDSDI (Normalization Different Sand Dune Index) est une voie prometteuse dans la détection des aires où il y a eu des changements ou déplacement de sable dont le contenu laissait entrevoir un matériau spectralement homogène et le contenant, une forme bien définie. Dans une perspective d'application, les approches présentées se complètent et elles constituent une source d'information non négligeable. Cependant, nous pouvons constater qu'à l'heure actuelle, la connaissance intime du territoire à étudier et l'accès à des données auxiliaires demeurent essentiels à la réussite. Il est donc parfois nécessaire de fusionner des données très hétérogènes.

De plus, dans une perspective quantitative, les informations satellitaires doivent être disponibles à une fréquence régulière et à une résolution spatiale encore plus fine. Pour le territoire étudié, une image tous les 8 ans semble une fréquence acceptable du fait que, pour ce laps de temps, il est encore possible d'observer le déplacement des organisations dunaires. Idéalement, la mise en place de témoins fixes sur le terrain qui seraient facilement identifiables à partir des plates-formes satellitaires constitue une assurance de résultats plus fiables. La télédétection s'avère enfin utile pour la localisation d'ouvrages à construire et l'évaluation de leur efficacité à contrer l'avancée des sables sur des territoires fertiles.

مساهمة الاستشعار عن بعد في رصد التطور الزمني و المكاني لزحف الكثبان الرملية

ملخص :

يكافح الجزء الجنوبي الغربي من الجزائر من ظاهرة واسعة الانتشار في البلدان المجاورة للبيئة الصحراوية والصحراوية. هذا هو التصحر والذباب. إن التهديد المستمر لتقدم الرمال على الأعمال البشرية في هذه المنطقة موجود إذا أخذنا في الاعتبار ، على سبيل المثال ، تدمير 60% من قرية بسبب عاصفة في أواخر السبعينيات. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير طرق قادرة على تحديد وتوصيف التغيرات في أسطح الكثبان من البيانات الساتلية المكتسبة في تواريخ LANDSAT المختلفة ETM2001 و ETM + 2006 و OLI8 2017 أنها توفر القدرة على رسم الخرائط وتصنيف ورصد المناطق المتضررة من الأحداث الطبيعية التي وقعت على مر الزمن. إن دراسة اختلاف الصور المستندة إلى استغلال معلمة جيوفيزيائية واحدة (NDSDI) جعلت من الممكن وصف الديناميات المكانية والزمانية لحالة الغطاء النباتي في منطقة بشار ولا تزال الجهود المبذولة لمكافحة طمر الطرق والأسطح (مثل: استعادة الكرم ، وزيادة المحاصيل المعمرة ، وتثبيت الكثبان الرملية) غير كافية. وكما أظهرنا أثناء بحثنا ، فإن النهوض بالصحاري في البيئات هو أيضا نتيجة لسلوك الرياح ، وقد صيغت المقترحات لإنشاء رؤية عالمية في التنمية ، والتي يجب أن تأخذ في الاعتبار الجوانب الإيكولوجية و الاجتماعية الثقافية.

الكلمات المفتاحية : الإستشعار عن بعد ، الزمني المكاني ، لاندسات، الكثبان الرملية.

APPORTS DE LA TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE DANS LE SUIVI DE L'ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES SABLES DUNAIRES

Résumé : La partie sud-ouest d'Algérie est aux prises avec un phénomène très répandu dans les pays limitrophes aux environnements sahariens et sahéliens. Il s'agit de la désertification et de l'ensablement. La menace constante de l'avancement du sable sur les oeuvres humaines dans ce secteur est bien présente si nous prenons en compte par exemple la destruction de 60 % d'un village par une tempête à la fin des années 1970. L'objectif de cette étude est de développer des méthodes capables d'identifier et de caractériser des changements affectant les surfaces des dunes à partir des données satellitaires acquises à différentes dates LANDSAT (ETM2001,ETM+ 2006 et OLI8 2017). Elles donnent ainsi, la possibilité de cartographier, de catégoriser et de surveiller des zones affectées par des événements naturels survenus au cours du temps. L'étude de différence d'image basée sur l'exploitation d'un seul paramètre géophysique(NDSDI) a permis de caractériser la dynamique spatio-temporelle de l'état de la végétation de la région de Bechar. Des efforts déployés pour lutter contre l'ensablement des routes et des surfaces (telles que : la reprise du vignoble, l'augmentation des cultures pérennes et la fixation des dunes) restent insuffisants. Comme, nous l'avons démontré au cours de notre recherche, l'avancée dessables dans les milieux est aussi le résultat du comportement du vent, des propositions ont été formulées pour asseoir une vision globale dans les aménagements, qui doit tenir compte des aspects écologiques et socio- culturels.

Mots clés : Télédétection, Spatio-Temporelle, Dunes, LANDSAT.

CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING IN MONITORING SPATIO-TEMPORAL EVOLUTION OF THE DUNE SAND

Abstract : The southwestern part of Algeria is struggling with a widespread phenomenon in countries bordering the Saharan and Saharan environments. This is desertification and silting. The constant threat of the advancement of sand on human works in this area is present if we take into account, for example, the destruction of 60% of a village by a storm in the late 1970s. The aim of the study is to develop methods capable of identifying and characterizing changes in dune surfaces from satellite data acquired at different LANDSAT dates (ETM2001, ETM + 2006 and OLI8 2017). They provide the ability to map, categorize and monitor areas affected by natural events that have occurred over time. The image difference study based on the exploitation of a single geophysical parameter (NDSDI) made it possible to characterize the spatio-temporal dynamics of the vegetation state of the Bechar region. Efforts to combat the silting of roads and surfaces (such as: the recovery of the vineyard, the increase of perennial crops and the fixing of dunes) remain insufficient. As we have shown during our research, the advancement of deserts in environments is also the result of wind behavior, proposals have been formulated to establish a global vision in the development, which must take into account ecological aspects. and sociocultural.

Keywords: remote sensing, Spatiotemporal, LANDSAT, Dunes.