



Faculté des Sciences
Département de physique
Spécialité : PHYSIQUE
Option : Rayonnement et Matière



MEMOIRE

Présenté par

Mr ZAOUI LARBI

Pour l'obtention du diplôme de magistère en physique

Thème

Analyse des données NOAA-AVHRR et MSG pour le suivi de
l'ensablement des régions semi-arides en Algérie.

Soutenu le 29/04/2013 à 10h00 devant la commission d'examen composée de :

<u>Qualité</u>	<u>Noms et prénoms</u>	<u>Grade</u>	<u>Etb d'origine</u>
Président	Mr.Belasri Ahmed	Professeur	USTO
Rapporteur	Mr.Benabadji Nouredine	Professeur	USTO
Examineur	Mr.Kamech Mustapha	Professeur	USTO
Examineur	Mr.Hassini Abdelatif	M.Conf.A	UNIV-Senia
Examineur	Mr.BelkaidM ^{ed} Nourddine	M.Conf.A	USTO

Résumé. Le nord-est du Grand Erg Occidental (Sahara Algérienne) est une région à couverture continue de sables grossiers organisés en alignements de grands dômes séparés par des couloirs où domine la déflation, des petites dunes vives à sables fins (akles) recouvrent les dômes, l'homogénéité du substrat rendant difficile une approche spectrale, une cartographie des dômes et des aires de déflation a été effectuée à partir des méthodes de la Morphologie Mathématique. Les images NOAA-AVHRR ont été utilisées, car elles sont les seules à avoir un pouvoir de résolution permettant de différencier les formes. L'image d'origine a subi des transformations morphologiques en teintes de gris visant à homogénéiser les aires d'Aklés, elle a ensuite été souillée et nettoyée, la validation a été effectuée par comparaison avec la photo-interprétation.

Mots clés : Cartographie, Géomorphologie, Morphologie Mathématique, Dunes vives, Photo-interprétation, régions semi-arides, reconnaissance de formes, NOAA, radiomètre AVHRR.

Abstract. North-East of the Great western Erg (Algerian Sahara) is an area continuously covered by coarse sands forming aligned great domes separated by inter-dunes corridors corresponding to deflation areas, Small dunes of fine sands (akles) are covering the domes. The homogeneity of the substratum makes spectral approach difficult. Therefore, methods of Mathematical Morphology have been used for mapping domes and deflation areas, NOAA-AVHRR images have been utilized, as their resolution power is the only one allowing discrimination of forms. Original image has been processed by grey-tone morphologic transformations in order to make the aspect of the akle areas more homogeneous. Then, it has been threshold and cleaned out. Validation has been made comparatively to photo-interpretation mapping.

Keyword: Geomorphology, Mathematical Morphology, photo-interpretation, NOAA, AVHRR radiometer.

Remerciement

Je tiens à remercier ici tous ceux qui m'ont apporté aides, conseil soutien dans la réalisation de ce travail.

L'ensemble de ce travail doit son existence à Mr N.BENABADJI, grâce à qui j'ai eu la chance d'effectuer un travail multidisciplinaire et enrichissant. J'ai bénéficié d'un contexte toujours favorable que ce soit professionnellement ou humainement.

J'exprime également ma gratitude et mes remerciements à Mr A.BELBACHIR, pour m'avoir permis d'effectuer ce travail au sein du Laboratoire d'Analyse et d'Application du Rayonnement (LAAR).

Je remercie également le président de la commission d'examen M.Belasri Ahmed et l'ensemble des examinateurs : M.Kamech Mustapha, M.Hassini Abdelatif et M. Mohamed Nourddine Belkaïd.

Ma grande gratitude à mon cher père, ma mère qui m'a toujours soutenu, ma très cher conjoint pour leurs soutiens moral dans les moments difficiles, ainsi que tous mes amis et spécialement mon très cher H.OMAR ,mon oncle Z.MILOUD et à ce qui m'ont aidé de près ou de loin.

Enfin je remercie toute l'équipe de la télédétection ainsi que tous les membres du Laboratoire d'Analyse et d'Application du Rayonnement.

Sommaire

Chapitre I		Généralités	
I.1	Introduction		3
I.2	La télédétection		3
I.3	Le rayonnement électromagnétique.....		5
I.4	Le spectre électromagnétique		5
I.4.1	le visible		6
I.4.2	l'ultraviolet		7
I.4.3	l'infrarouge		7
I.4.4	Les hyperfréquences		8
I.5	Détection passive et active		9
I.6	Caractéristiques d'un satellite : l'orbite et sa fauchée.....		10
I.6.1	Résolution spatiale		13
I.6.2	Résolution spectrale		14
I.6.3	Résolution radiométrique		15
I.6.4	Résolution temporelle.....		16
I.6.5	Balayage multi-spectral		18
I.7	L'acquisitions et le traitement des données NOAA et MSG		20
I.7.1	Les satellites NOAA		20
I.7.1.1	Leurs missions		20
I.7.1.2	Les données NOAA.....		21
I.7.1.3	Le capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiomètre)		22
I.7.2	Les satellites de METEOSAT		22
I.7.2.1	Programme METEOSAT		23
I.7.2.2	Le capteur SEVIRI		24
I.8	Conclusion		25

Chapitre II	Comprendre l'ensablement	
II.1	Introduction	26
II.2	Comprendre l'ensablement.....	26
II.2.1	Erosion éolienne	26
II.2.2	La violence du vent	26
II.2.3	Les mécanismes des mouvements globaux.....	28
II.2.4	L'état de la végétation.....	29
II.2.5	La nature et l'état du sol.....	29
II.2.6	Origine du sable	29
II.3	Effets de l'érosion éolienne	30

II.3.1 Sur le sol.....	30
II.3.2 Sur la végétation.....	30
II.4 Accumulations éoliennes	30
II.4.1 Les voiles éoliens	30
II. 4.2 Les nebkas	31
II. 4.3 Les barkhanes	31
II. 4.4 Les dunes linéaires ou sifs.....	33
II. 4.5 Les aklés	34
II. 4.6 Les ergs	35
II.5 Identification des sites ensablés	35
II.6 La cartographie des zones ensablées	37
II.7 Types de traitement	37
II.8 Intérêt des images satellitaires dans l'étude de l'ensablement.....	37
II.9 Détection des changements dynamiques de l'ensablement.....	39
II.10 Correction radiométrique et atmosphérique	41
II.10.1 Ré échantillonnage	42
II.10.2 Correction géométrique	42
II.11 Méthodes de détection de changements dynamiques de l'espace	42
II.11.1 Identification rapide et quantification de l'évolution significative de l'extension de l'ensablement	42
II.11.1.1 Tendance de l'évolution rapide	43
II.11.2 Technique de la composition colorée multi-date.....	44
II.11.3 Techniques de l'indice dynamique de couverture des sols	45
II.12 Conclusion	46

Chapitre III Les méthodes de traitement

III.1 Introduction	47
III.2 Les méthodes de traitement	47
III.2.1 La méthode de dépôt des voiles sableux	47
III.2.2 La méthode de différence normalisée JENSEN (1996)	50
III.2.3 La méthode de la Morphologie Mathématique	52
III.2.3.1 Réalisation d'une mosaïque à référence spatiale	53
III.2.3.2 Traitements appliqués à la mosaïque	55
III.3 Conclusion	55

Chapitre IV Résultats et Perspectives

IV.1 Introduction	56
IV.2 Présentation de la zone	56
IV.3 Cartographie par l'analyse morphologique.....	58
IV.3.1 photo-interprétation et cartographie.....	58
IV.4 Les transformations morphologiques principales	59
IV.4.1 Transformations morphologiques sur des images binaires.....	59
IV.4.2 Éléments structurants sur des grilles carrées et hexagonales.....	63
IV.4.3 Transformations sur des images numériques	63
IV.4.4 Transformations morphologiques sur des images en niveaux de gris	65
IV.5 Cartographie des formes éolienne.....	67

IV.5.1	Méthodologie	67
IV.5.2	Transformations morphologiques pour les zones d'extraction de déflation	68
IV.6	Validation de la cartographie automatisée	73
IV.7	Orientation des formes éoliennes	74
IV.8	Détection des zones de lumière	74
IV.9	Délimitation des ensembles de dômes.....	78
IV.10	Estimation des orientations des alignements dômes.....	79
IV.10.1	Les méthodes d'estimation.....	79
IV.10.2	Orientations des dômes	80
IV.11	Conclusion	83
	Conclusion générale	84

Introduction générale

1. LA PROBLEMATIQUE DE L'ENSABLEMENT

Le phénomène de l'ensablement s'est amplifié durant ces dernières années, le bilan établi par le Ministère de l'Agriculture montre que 5 millions d'hectares parmi les 20 millions d'hectares menacés se trouvent dans un état avancé de dégradation. De même, la carte de sensibilité à la désertification établie par le Centre National des Techniques Spatiales sur la totalité de la zone steppique, révèle que 7 millions d'hectares de terres dégradées nécessitent en urgence des aménagements.

En Algérie près de 20 millions d'hectares sont menacés par l'érosion éolienne, depuis Longtemps, l'érosion éolienne et ses effets néfastes sur le milieu naturel et l'environnement constituent un sérieux problème notamment dans les régions semi-arides. Ces dernières années, suite à l'exploitation irrationnelle des ressources naturelles (fourragères) et à la mise en culture des terres fragiles (défrichement) ce processus s'est particulièrement accentué.

Dans ce type de réflexion, la télédétection spatiale par le nombre élevé de données, par l'homogénéité synoptique conférée aux informations transmises, par la répétitivité de l'acquisition de ces données, trouve une place privilégiée comme outil performant de suivi de l'ensablement et de son orientation.

Dans une perspective spatio-temporelle, il devient utile de trouver des nouvelles sources d'information qui pourront saisir d'un seul coup d'œil le déplacement et l'orientation de ce mouvement des sables et ce, à l'échelle régionale.

Aujourd'hui, grâce aux images satellitaires à haute résolution telles que celles acquises par le capteur AVHRR de NOAA, il est possible d'obtenir une information suffisamment pertinente pour analyser le paysage à l'échelle souhaitée.

L'utilisation des données satellitaires est cependant limitée dans le temps, dans le cas de la plate-forme NOAA, pour bien visualiser et évaluer le comportement du sable dans le temps, nous avons besoin d'une période de temps plus grande, afin d'obtenir une vision réaliste des changements et de la dynamique qui y est associée, nous devons donc posséder des informations multi-dates sur une longue période.

2. OBJECTIF DU MEMOIRE

L'objectif de cette recherche est de voir comment l'utilisation des données de télédétection (tant d'origine satellitaire) jumelées avec des données auxiliaires peut aider, non seulement à mieux percevoir le problème de l'ensablement, mais aussi à bien saisir ses conséquences sur le paysage à court et à long terme. Nous nous concentrerons sur le Grand Erg Occidental du Sahara Algérienne qui s'étend sur une superficie de 29 825 Km², une région fortement touchée par le phénomène de l'ensablement. L'ensablement, n'est pas tout à fait spécifique des régions semi arides car il dépend de la présence d'un régime éolien important, la migration du matériel éolien peut se manifester même dans les régions humides. Plus spécifiquement, il s'agit de colliger les informations sous un même format numérique afin de voir comment elles nous permettent d'identifier les changements et, dans une certaine mesure, de déterminer l'orientation et le déplacement des masses sableuses et d'évaluer les superficies qui ont été ensablées.

Ce mémoire comporte quatre chapitres principaux qui décrivent le travail élaboré et qu'a pour l'étude et le suivi de l'ensablement par images satellitaires.

Après cette introduction générale, nous passons au premier chapitre qui englobe les notions et la définition générale sur les satellites d'observation de la terre et l'imagerie satellitaires.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la définition détaillée de phénomène d'ensablement.

Le troisième chapitre présente les différentes méthodes de traitement et suivi de l'ensablement.

Nous abordons dans le quatrième chapitre les résultats obtenus par l'utilisation de la Morphologie Mathématique dans le suivi de l'ensablement par les images NOAA-AVHRR on utilise le logiciel du laboratoire LAAR (PCSATWIN) pour réaliser et tester les résultats. .

Nous terminons par une conclusion qui contient une évaluation du travail effectué.

Chapitre I

Généralités

I.1 Introduction

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 réfléchie 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.

I.2 La télédétection

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plateformes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Elle suppose l'acquisition d'information à distance, sans contact direct avec l'objet détecté. La télédétection est un ensemble de techniques se différenciant les unes des autres par le type de vecteur (avion, satellite ou navette spatiale), le mode d'acquisition (analogique ou numérique, actif ou passif), la résolution spatiale, la gamme spectrale utilisée et la surface observée.

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs (Figure I-1).

[1]

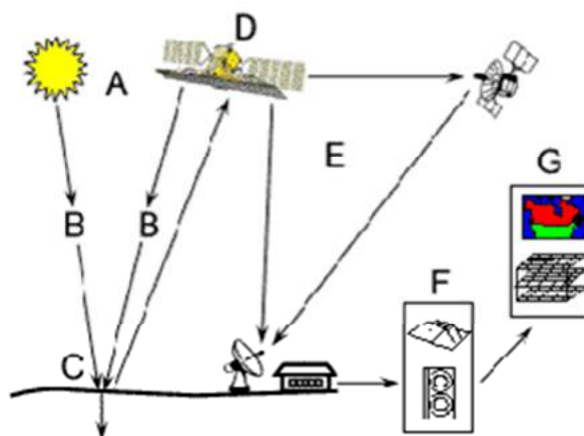


Figure I-1 : Le processus de la télédétection

Source d'énergie ou d'illumination (A) - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

Rayonnement et atmosphère (B) - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

Interaction avec la cible (C) - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.

Transmission, réception et traitement (E) - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

Interprétation et analyse (F) - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

Application (G) - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

Ces sept étapes couvrent le processus de la télédétection, du début à la fin. C'est dans cet ordre que tout au long de ce cours, nous vous invitons à construire, étape par étape, votre connaissance de la télédétection.

I.3 Le rayonnement électromagnétique

Premièrement, une source d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique est nécessaire pour illuminer la cible, à moins que la cible ne produise elle-même cette énergie. Selon la théorie des ondes, tout rayonnement électromagnétique possède des

propriétés fondamentales et se comporte de façon prévisible. Le rayonnement électromagnétique est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M). Le champ électrique varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement. Le champ magnétique est orienté de façon perpendiculaire au champ électrique. Les deux champs se déplacent à la vitesse de la lumière (Figure I-2). [2]

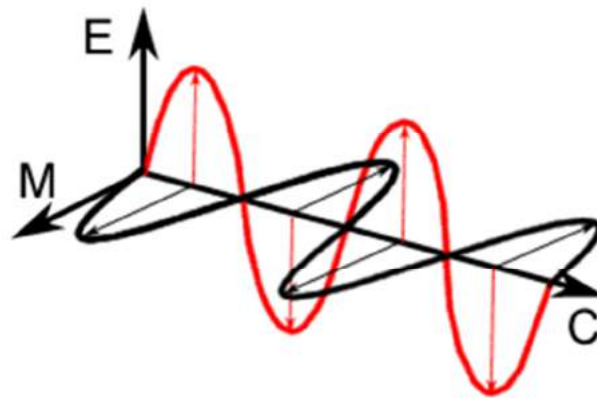


Figure I-2 : Le rayonnement électromagnétique.

I.4 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio).

La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique.

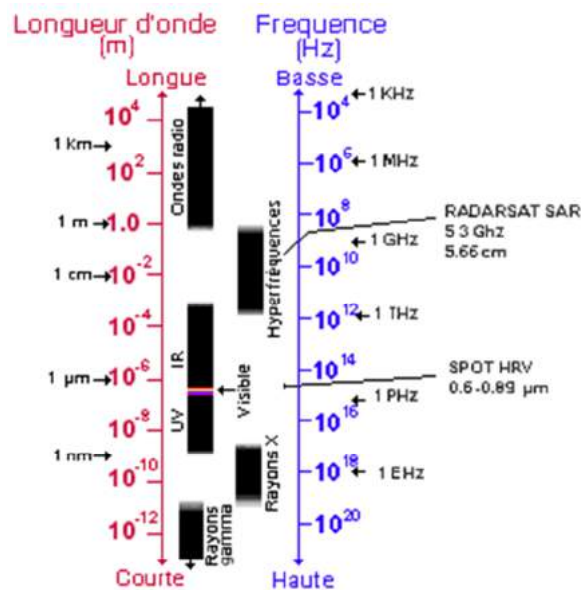


Figure I-3 : Le spectre électromagnétique.

I.4.1 le visible :

La lumière que nos yeux (nos tout premiers "capteurs de télédétection") peuvent déceler se trouve dans ce qui s'appelle le "spectre visible". Il est important de constater que le spectre visible représente une bien petite partie de l'ensemble du spectre. Une grande partie du rayonnement électromagnétique qui nous entoure est invisible à l'œil nu, mais il peut cependant être capté par d'autres dispositifs de télédétection. Les longueurs d'onde visibles s'étendent de 0,4 à 0,7 μm . La couleur qui possède la plus grande longueur d'onde est le rouge, alors que le violet a la plus courte. [1],[4]

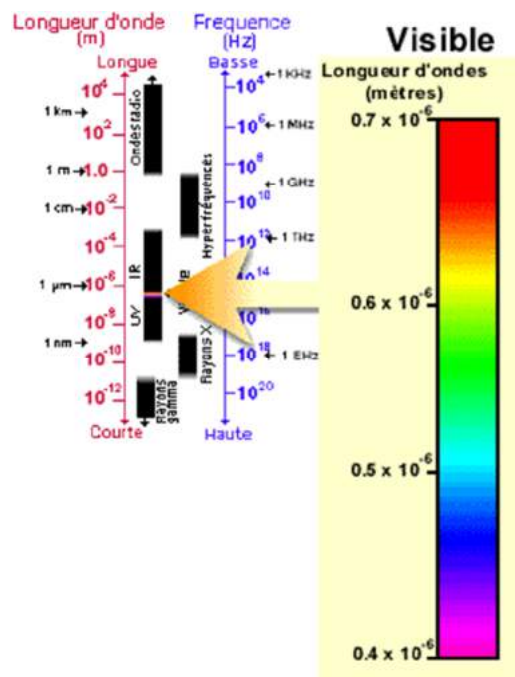


Figure I-4 : Le spectre visible.

I.4.2 l'ultraviolet :

Les plus petites longueurs d'onde utilisées pour la télédétection se situent dans l'ultraviolet. Ce rayonnement se situe au-delà du violet de la partie du spectre visible. Certains matériaux de la surface terrestre, surtout des roches et minéraux, entrent en fluorescence ou émettent de la lumière visible quand ils sont illuminés par un rayonnement ultraviolet. [3]

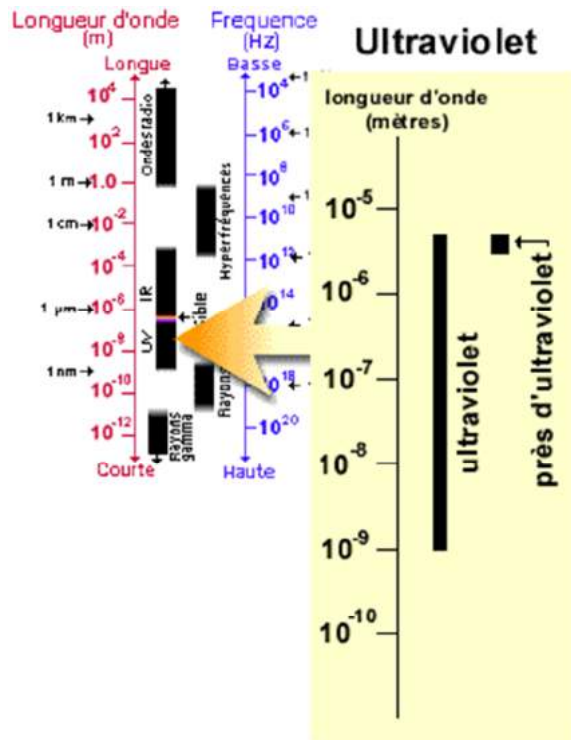


Figure I-5 : Le spectre Ultraviolet.

I.4.3 l'infrarouge :

Examinons maintenant la partie de l'infrarouge (IR) du spectre (figure I-6). L'infrarouge s'étend approximativement de 0,7 à 100 μm , ce qui est un intervalle environ 100 fois plus large que le spectre visible. L'infrarouge se divise en deux catégories : IR réfléchi et IR émis ou thermique. le rayonnement dans la régions de l'infrarouge est utilisé en télédétection de la même façon que la rayonnement visible . L'infrarouge réfléchi s'étend approximativement de 0,7à 3 μm .

L'infrarouge thermique est très différent du spectre visible et de l'infrarouge réfléchi. Cette énergie est essentiellement le rayonnement qui est émis sous forme de la chaleur par la surface de la Terre et s'étend approximativement de 3à 100 μm . [1],[2]

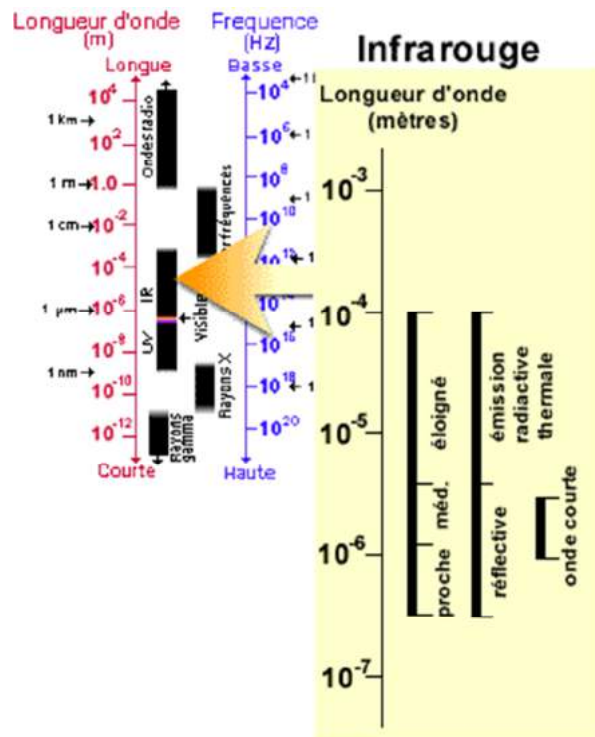


Figure I-6 : Le spectre Infrarouge

I.4.4 Les hyperfréquences :

Depuis quelques temps, la région des hyperfréquences suscite beaucoup d'intérêt en télédétection. Cette région comprend les plus grandes longueurs d'onde utilisées en télédétection et s'étend approximativement de 1 mm à 1 m. Les longueurs d'onde les plus courtes possèdent des propriétés semblables à celles de l'infrarouge thermique, tandis que les longueurs d'onde les plus grandes ressemblent aux ondes radio. [2]

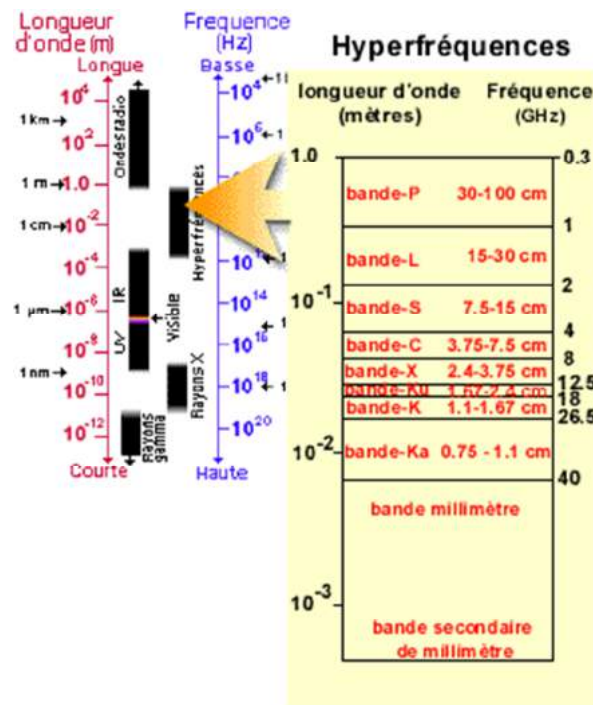


Figure I-7 : Les hyperfréquences.

I.5 Détection passive et active

Jusqu'à maintenant, dans ce chapitre, nous avons vu que le Soleil est une source d'énergie ou de rayonnement pratique pour la télédétection. L'énergie du Soleil est soit réfléchie (la portion visible) ou absorbée et retransmise (infrarouge thermique) par la cible. Les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie disponible naturellement sont des capteurs passifs. Le capteur passif peut seulement percevoir l'énergie réfléchie lorsque le Soleil illumine la Terre. Il n'y a donc pas d'énergie solaire réfléchie le soir, tandis que l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être perçue le jour ou la nuit.

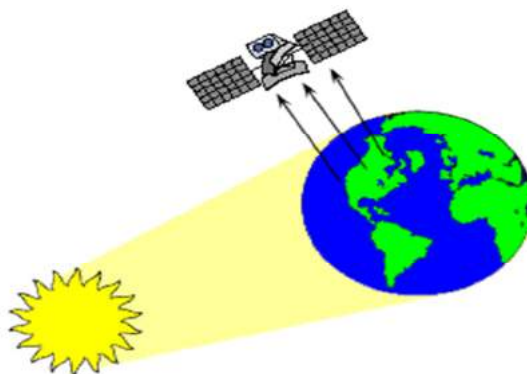


Figure I-8 : Le capteur passif.

Un capteur actif produit sa propre énergie pour illuminer la cible : il dégage un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers la cible. Le rayonnement réfléchi par la cible est alors perçu et mesuré par le capteur. Le capteur actif a l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Les capteurs actifs utilisent les longueurs d'onde qui ne sont pas produites en quantité suffisante par le Soleil telles que les hyperfréquences ou pour mieux contrôler la façon dont une cible est illuminée. Par contre, les capteurs actifs doivent produire une énorme quantité d'énergie pour bien illuminer une cible. Le laser fluor météré et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.[3]

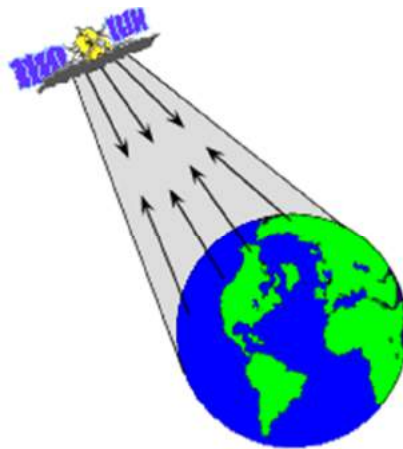


Figure I-9 : Le capteur actif.

I.6 Caractéristiques d'un satellite : l'orbite et sa fauchée

Dans la section précédente, nous avons vu que les capteurs peuvent être placés sur différentes plates-formes. Bien que les plates-formes terrestres ou aéroportées soient utilisées, ce sont les satellites qui fournissent la majeure partie des données recueillies par télédétection de nos jours. Certaines caractéristiques propres aux satellites en font des instruments particulièrement utiles pour l'acquisition d'information sur la surface de la Terre.

La trajectoire effectuée par un satellite autour de la Terre est appelée orbite. L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission. Le choix d'une orbite est déterminé par l'altitude (la hauteur du satellite au-dessus de la surface de la Terre), l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre. Certains satellites ont une altitude très élevée et regardent toujours la même région de la surface de la Terre, ils ont une orbite géostationnaire.

Ces satellites géostationnaires ont une altitude d'environ 36 000 kilomètres et se déplacent à une vitesse qui correspond à celle de la Terre, donnant ainsi l'impression qu'ils sont stationnaires, cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une région spécifique. Les satellites de communication et d'observation des conditions météorologiques sont situés sur de telles orbites. L'altitude élevée de certains satellites météorologiques leur permet d'observer les nuages et les conditions qui couvrent un hémisphère complet de la Terre.[4]

D'autres plates-formes spatiales suivent une orbite allant pratiquement du nord au sud ou vice versa. Cette configuration, combinée à la rotation de la Terre (ouest-est), fait qu'au cours d'une certaine période, les satellites ont observé la presque totalité de la surface de la Terre. Ce type d'orbite est appelé orbite quasi polaire à cause de l'inclinaison de l'orbite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la Terre. La plupart des satellites sur orbite quasi-polaires ont aussi une orbite héliosynchrone; de cette façon, ils observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Pour une attitude donnée, la position du Soleil dans le ciel au moment où le satellite survole une certaine région au cours d'une saison donnée sera donc toujours la même.

Cette caractéristique orbitale assure des conditions d'illumination solaire similaires, lorsqu'on recueille des données pour une saison particulière sur plusieurs années ou pour une région particulière sur plusieurs jours. Ceci est un facteur important lorsqu'on compare deux images successives ou lorsqu'on produit une mosaïque avec des images adjacentes, puisque les images n'ont pas à être corrigées pour tenir compte de l'illumination solaire.

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

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

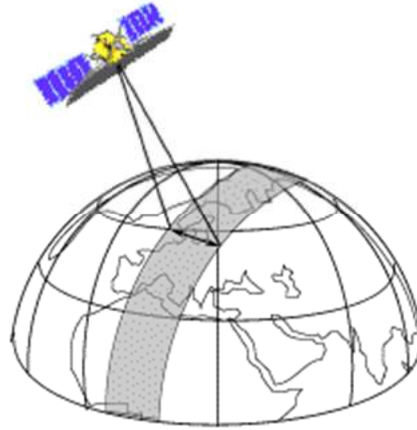


Figure I-10 : Satellite à orbite ascendante et orbite descendante.

Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur "observe" une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de couloir-couvert ou fauchée. Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et une centaine de kilomètres. Pour les satellites à orbite quasi-polaire, le satellite se déplace selon une trajectoire nord-sud.

Cependant, vue de la Terre, la trajectoire du satellite semble avoir une composante vers l'ouest à cause de la rotation de la Terre. Ce mouvement apparent du satellite permet à la fauchée du capteur d'observer une nouvelle région à chacun des passages consécutifs du satellite. L'orbite du satellite et la rotation de la Terre travaillent donc de concert, permettant une couverture complète de la surface de la planète après un cycle orbital complet.[5]

Les points sur la surface de la Terre qui se trouvent directement en dessous de la trajectoire du satellite sont appelés les points nadir. On définit le cycle de passage du satellite comme étant la période de temps nécessaire pour que le satellite revienne au-dessus d'un point nadir pris au hasard. Le satellite aura alors effectué un cycle orbital complet. La période de temps nécessaire pour compléter un cycle orbital complet varie d'un satellite à l'autre. La durée du cycle orbital ne doit pas être confondue avec la période de revisite.

Avec les capteurs orientables, les instruments peuvent observer une surface avant et après les passages de l'orbite au-dessus de la cible, ce qui permet une période de revisite beaucoup plus courte que le cycle orbital. La période de passage au nadir est un facteur important pour plusieurs applications de la télédétection, spécialement lorsque des images fréquentes sont nécessaires (par exemple : pour surveiller la dispersion lors d'un déversement d'hydrocarbures ou pour mesurer l'ampleur d'une inondation). Les satellites à

orbite quasi-polaire ont une couverture plus fréquente des régions de latitude élevée par rapport à la couverture des zones équatoriales. Cette plus grande couverture est due à l'élargissement, vers les pôles, de la zone de chevauchement entre deux fauchées adjacentes.

I.6.1 Résolution spatiale :

Pour certains instruments de télédétection, la distance entre la cible observée et la plate-forme joue un rôle important puisqu'elle détermine la grandeur de la région observée et le détail qu'il sera possible d'obtenir. Un capteur placé sur une plate-forme éloignée de la cible pourra observer une plus grande région, mais ne sera pas en mesure de fournir beaucoup de détails.

Le détail qu'il est possible de discerner sur une image dépend de la résolution spatiale du capteur utilisé. La résolution spatiale est fonction de la dimension du plus petit élément qu'il est possible de détecter. La résolution spatiale d'un capteur passif (nous regarderons plus loin le cas spécial des capteurs actifs) dépend principalement de son champ de vision instantanée (CVI). [7]

Le CVI est défini comme étant le cône visible du capteur (A) et détermine l'aire de la surface "visible" à une altitude donnée et à un moment précis (B). La grandeur de cette aire est obtenue en multipliant le CVI par la distance de la surface au capteur (C). Cette aire est appelée la superficie de résolution ou cellule de résolution qui constitue une étape critique pour la détermination de la résolution spatiale maximale du capteur.

Pour pouvoir différencier un élément de la surface observée, l'élément en question doit être de dimension égale ou supérieure à la cellule de résolution. Si l'élément est plus petit, il ne sera généralement pas différencié puisque c'est l'énergie moyenne des éléments de la cellule de résolution qui sera captée. Cependant, dans certaines conditions, un élément plus petit peut être détecté si sa réflectivité domine celle des autres éléments présents dans la cellule de résolution. On parle alors de détection plus fine que la résolution.

Comme nous l'avons mentionné, les images de télédétection sont composées d'une matrice d'éléments appelés pixels. Le pixel est le plus petit élément d'une image. Il est normalement carré et représente une partie de l'image. Il est cependant important de faire la distinction entre l'espacement des pixels et la résolution spatiale. Si un capteur a une résolution spatiale de 20 mètres et qu'il est possible de charger à l'écran une image provenant de ce capteur avec la pleine résolution, chaque pixel à l'écran représentera une superficie correspondant à 20 m sur 20 m au sol. Dans ce cas, la résolution et l'espacement des pixels sont identiques. Par contre, il est possible d'afficher la même image avec un espacement des

pixels qui soit différent de la résolution. Sur de nombreuses affiches montrant des images de la Terre prises à partir d'un satellite, on combine plusieurs pixels en les moyennant, mais ceci ne modifie en rien la résolution spatiale du capteur utilisé.[6]

I.6.2 Résolution spectrale

Auparavant, nous avons abordé la réponse spectrale et les courbes d'émissivité spectrale qui caractérisent une cible ou une surface pour un ensemble de longueurs d'onde. Il est souvent possible de distinguer des classes de caractéristiques et de détails dans une image en comparant leurs réponses différentes sur un ensemble de longueurs d'onde. Comme nous l'avons vu à la section I.6.1, des classes très larges, comme l'eau et la végétation, peuvent être séparées en utilisant un intervalle de longueurs d'onde assez grand (le visible et l'infrarouge par exemple). Des classes plus spécifiques comme par exemple différents types de roche ne sont pas aussi faciles à différencier et nécessitent l'utilisation d'un intervalle de longueurs d'onde beaucoup plus fin. Pour ce faire, nous devons utiliser un capteur ayant une résolution spectrale beaucoup plus grande. La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Plus la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites.

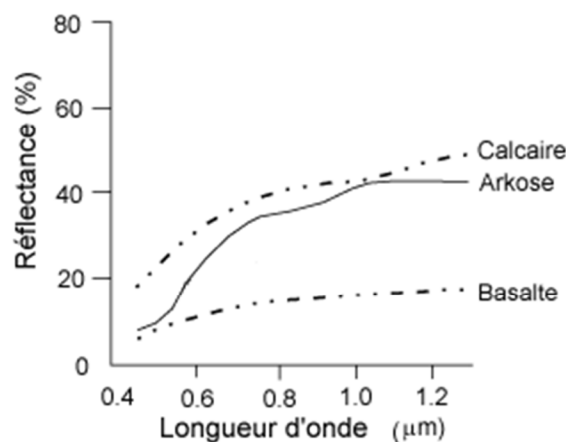


Figure I-11 : La réponse spectrale des objets.

Plusieurs instruments de télédétection peuvent enregistrer l'énergie reçue selon des intervalles de longueurs d'onde à différentes résolutions spectrales. Ces instruments sont appelés capteurs multispectraux et seront décrits plus en détail dans les sections suivantes. Des capteurs multispectraux plus développés, appelés capteurs hyperspectraux, sont capables de détecter des centaines de bandes spectrales très fines dans la portion du spectre des ondes électromagnétiques réunissant le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen. La très grande résolution spectrale des capteurs hyperspectraux facilite la

différenciation des caractéristiques d'une image basée sur la réponse différente dans chacune des bandes spectrales.[1],[6]

I.6.3 Résolution radiométrique

L'arrangement des pixels décrit les structures spatiales d'une image tandis que les caractéristiques radiométriques décrivent l'information contenue dans une image. Chaque fois qu'une image est captée par une pellicule ou un capteur, sa sensibilité à l'intensité de l'énergie électromagnétique détermine la résolution radiométrique. La résolution radiométrique d'un système de télédétection décrit sa capacité de reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique. Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue. La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible se nomme plage dynamique.[10]

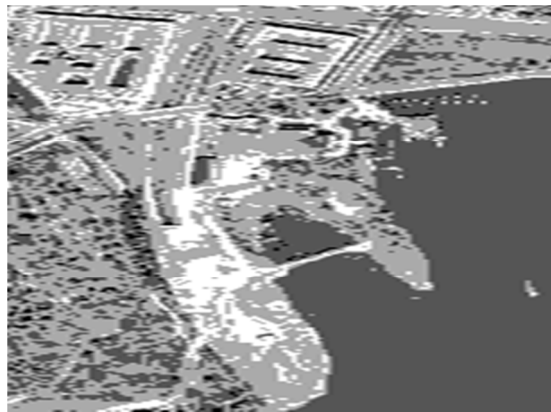


Figure I-12 : Image satellitaire.

Les données images sont représentées par une valeur numérique variant entre 0 et 2 à une certaine puissance moins un. Cet intervalle correspond à un nombre de bits utilisés pour encoder des valeurs en format binaire. Chaque bit représente un exposant de la base 2 (par exemple, 1 bit = $2^1 = 2$). Le nombre maximum de niveaux d'intensité disponibles dépend du nombre de bits utilisés pour représenter l'intensité enregistrée. Par exemple, un capteur utilisant 8 bits pour enregistrer les données aura $2^8 = 256$ niveaux d'intensité disponibles car il aura 256 valeurs numériques disponibles allant de 0 à 255.

Si seulement 4 bits sont utilisés, alors seulement $2^4 = 16$ valeurs allant de 0 à 15 seront disponibles. La résolution radiométrique sera donc plus faible. Les données enregistrées sont souvent affichées en tons de gris, avec le noir représentant une valeur

numérique de "0" et le blanc représentant la valeur numérique maximale. En comparant une image de 2-bits à une image de 8-bits à une image de 8-bits d'une même scène, on peut voir l'énorme différence dans le nombre de détails qu'il est possible de distinguer selon la résolution radiométrique.

I.6.4 Résolution temporelle

En plus de la résolution spatiale, spectrale et radiométrique, l'autre concept important en télédétection est celui de la résolution temporelle. Nous avons déjà fait allusion à ce concept dans la section 2.2, quand il a été question de la période de passage au nadir d'un satellite, qui est le temps que prend un satellite pour effectuer un cycle orbital complet. Cette période est généralement de quelques jours. Il faut donc quelques jours à un tel satellite pour qu'il puisse observer de nouveau exactement la même scène à partir du même point dans l'espace. La résolution temporelle absolue du système de télédétection est donc égale à cette période.

Toutefois, certaines régions de la surface peuvent être observées plus fréquemment puisqu'il y a chevauchement entre les couloirs-couverts adjacents et que ces zones de chevauchement deviennent de plus en plus grandes en s'approchant des pôles. Certains satellites ont aussi la possibilité de pointer leurs capteurs en direction du même point pour différents passages du satellite. La résolution temporelle effective du satellite dépend donc d'une variété de facteurs dont la grandeur de la zone de chevauchement entre les couloirs-couverts adjacents, la capacité du satellite et de ses capteurs et également la latitude (figure I-13).[2]

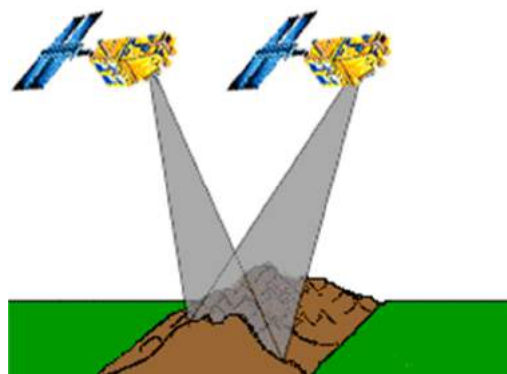


Figure I-13 : Le balayage multi-temporel

L'un des grands avantages de la télédétection satellitaire est sa capacité à amasser périodiquement de l'information d'une même région de la Terre. Les caractéristiques spectrales de la région observée peuvent changer avec le temps. La comparaison d'images multi-temporelles permet de détecter ces changements. Par exemple, durant la période de

croissance de la végétation, de nombreuses espèces se transforment continuellement et notre capacité à détecter ces changements dépend de la fréquence avec laquelle les données sont recueillies. En amassant des données périodiquement et de façon continue, il est possible de suivre les changements qui surviennent à la surface de la Terre, qu'ils soient naturels (comme le développement de la végétation ou l'évolution d'une inondation) ou de source humaine (comme le développement des milieux urbains ou la déforestation).

Le facteur temps est important en télédétection lorsque :

- la couverture nuageuse est persistante (par exemple sous les tropiques), ce qui limite les moments où il est possible d'observer la surface.
- l'on veut surveiller des phénomènes de courte durée (inondations, déversements d'hydrocarbures, etc.).
- l'on a besoin d'images multi-temporelles (par exemple, pour étudier d'une année à l'autre, l'étendue d'une maladie s'attaquant aux forêts).
- les changements temporels dans l'apparence d'une caractéristique sont utilisés pour différencier celle-ci d'une autre caractéristique similaire (par exemple, pour faire la différence entre les cultures de blé et de maïs).

I.6.5 Balayage multispectral

Contrairement aux capteurs photographiques, plusieurs capteurs électroniques acquièrent leurs données en utilisant un système à balayage. Ce système utilise un capteur dont le champ de vision instantanée (CVI) est étroit, mais qui balaie la surface de façon à en produire une image bidimensionnelle de la surface. Les systèmes à balayage peuvent être utilisés sur des plates-formes aériennes ou spatiales, et opèrent essentiellement de la même façon. Un système à balayage qui utilise plusieurs longueurs d'onde pour acquérir les données est appelé un balayeur multispectral (BMS). Ce dernier système est le plus commun. Il y a deux méthodes principales (ou modes) de balayage pour amasser des données multispectrales : le balayage perpendiculaire à la trajectoire et le balayage parallèle à la trajectoire.

Le balayage perpendiculaire à la trajectoire ratisse la Terre en une série de lignes. Le balayage s'effectue d'un côté du capteur à l'autre, en utilisant un miroir rotatif (A). La radiation atteignant le capteur est divisée en plusieurs composantes spectrales qui sont détectées séparément. L'UV, le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge sont séparés selon leurs longueurs d'onde. Un ensemble de détecteurs (B) internes, sensibles à chacune

des bandes spectrales, mesurent et enregistrent l'énergie en convertissant le signal électrique produit par les détecteurs en données numériques.[5]

Le CVI (C) du capteur et l'altitude de la plate-forme déterminent la dimension de la cellule de résolution au sol (D) et la résolution spatiale. Le champ de vision angulaire (E) est déterminé par le balayage effectué par le miroir. Ce champ de vision est mesuré en degrés et détermine la largeur du couloir-couvert (F). Les balayeurs à bord d'aéronefs balaient de grands angles de 90 à 120 degrés, alors que ceux qui sont sur plate-forme spatiale balayent de petits angles de 10 à 20 degrés, mais couvrent quand même une grande région grâce à leur altitude plus élevée.

Comme la distance entre le capteur et la cible augmente en allant vers le bord du couloir-couvert, la cellule de résolution augmente aussi, ce qui cause de la distorsion géométrique dans l'image. Le temps de résidence est un facteur influençant la résolution spatiale, spectrale et radiométrique de ce genre de système. La résolution est influencée par le temps de résidence, ce laps de temps généralement assez court où le CVI est orienté vers une cellule de résolution au sol.[4]

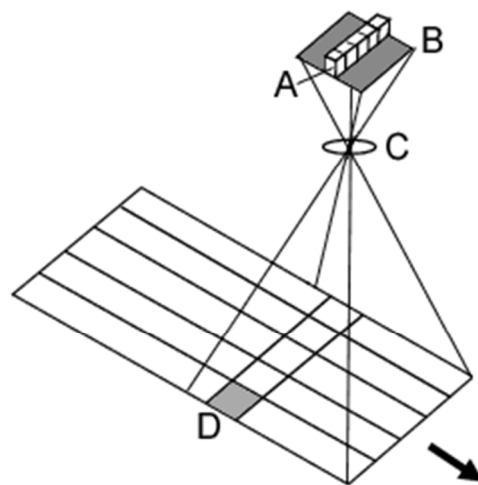


Figure I-14 : Le balayage multispectral.

Le balayage parallèle à la trajectoire utilise aussi le mouvement de la plate-forme afin d'enregistrer les données le long de lignes successives et de construire une image dimensionnelle. Le miroir est cependant remplacé par un ensemble de détecteurs alignés (A) et situé sur le plan focal de l'image (B) formée par un système de lentilles (C). Ces détecteurs sont "poussés" le long de la trajectoire de la plate-forme. Ces systèmes sont parfois appelés

balayeur à barrettes. Les détecteurs individuels mesurent l'énergie pour une cellule de résolution au sol (D), le CVI détermine donc la résolution spatiale du système. Un ensemble distinct de détecteurs est nécessaire pour chacune des bandes spectrales. L'énergie est détectée électroniquement par chacun des détecteurs de chacun des ensembles linéaires de détecteurs. Les données sont ensuite enregistrées numériquement.[5]

Le balayage parallèle à la trajectoire, qui utilise des ensembles linéaires de détecteurs, présente plusieurs avantages par rapport au balayage perpendiculaire à la trajectoire, qui utilise un miroir. L'ensemble de détecteurs, combiné au mouvement de balayage, permet d'avoir un temps de résidence plus long pour chacune des cellules de résolution au sol. Ceci permet aux détecteurs de capter plus d'énergie provenant de chaque cellule de résolution, ce qui améliore la résolution radiométrique. Le temps de résidence accru permet d'avoir un CVI plus petit, ainsi que de plus petites bandes spectrales. Ces systèmes ont donc des résolutions spatiale et spectrale plus fines, sans pour autant réduire la résolution radiométrique.

De plus, comme les détecteurs sont des dispositifs micro-électroniques, ils sont généralement plus petits, plus légers, nécessitent moins d'énergie, sont plus fiables et plus durables car ils n'ont pas de pièces mobiles. En contrepartie, le calibrage de milliers de détecteurs dans le but d'obtenir une sensibilité uniforme pour l'ensemble du système est une tâche nécessaire mais compliquée.

I.7 L'acquisitions et le traitement des données NOAA et MSG

I.7.1 Les satellites NOAA :

Les (National Oceanic and Atmospheric Administration) sont des satellites météorologiques américains à orbite polaire observant la Terre depuis une altitude d'environ 850 km. Ils appartiennent au mis en place par l'Organisation Météorologique Mondiale.

Le premier d'entre eux fut mis sur orbite en 1970, et depuis cette date, 18 satellites NOAA furent lancés. Au fil des ans, l'instrumentation embarquée a évolué du point de vue technologique et les performances offertes actuellement sont évidemment bien supérieures à celles du début de la filière.



Figure I-15 : Satellite NOAA en orbite.

I.7.1.1 Leurs missions :

Elles sont principalement orientées vers :

- l'observation des phénomènes météorologiques
- la cartographie de la structure thermique superficielle des océans
- l'agro-météorologie
- l'étude de l'évolution de l'environnement marin et côtier

Les satellites de la série NOAA évoluent à une altitude de l'ordre de 820 à 855 km sur une orbite inclinée de 99° par rapport au plan équatorial et sont donc héliosynchrones. Leur période est de 101 à 102 minutes si bien qu'ils survolent l'équateur au moins 14 fois par jour en passage ascendant. Les satellites NOAA opérationnels sont déphasés : une même région est survolée 4 fois par jour à des intervalles d'environ 6 heures ; en matinée et en soirée par le satellite de numéro pair (actuellement, NOAA 18, lancé en mai 2005) ; de nuit et en début d'après-midi pour le satellite de numéro impair (actuellement NOAA 17, lancé le 24 juin 2002).

Les satellites NOAA sont équipés de multiples capteurs dont le plus connu est le capteur-imageur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer).

Il s'agit d'un radiomètre à balayage caractérisé par un champ d'observation très large.

On peut citer :

- l'AVHRR/2 dont la fauchée est de 2600 km et la résolution de 0,5 km (visible) et de 1,0 km (IR)
- l'AVHRR/3 dont la fauchée est de 2940 km et la résolution de 0,5 km (visible) et de 1,0 km (IR)

Ce radiomètre permet de cartographier la végétation et les formations nuageuses et de déterminer la température et l'humidité dans l'atmosphère et sur la Terre. La résolution spatiale est de 1,1 km, au niveau de la surface de la Terre, à la verticale du satellite. Dans l'infrarouge thermique, la résolution est de 0,12°C. [6]

I.7.1.2 Les données NOAA :

Les satellites NOAA sont essentiellement connus par les nombreuses images de la Terre et de l'atmosphère qu'ils délivrent chaque jour. Les données acquises à bord de ces satellites sont transmises vers des stations de réception au sol, soit en mode APT (Automatic Picture Transmission, basse résolution), soit en mode HRPT (High Résolution Picture Transmission).

En France, le Centre de Météorologie Spatiale de Météo-France, situé à Lannion (22) a pour mission de recevoir, traiter, diffuser et archiver ces données.

I.7.1.3 Le capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer):

	Satellites NOAA 6, 7 et 8	Satellites NOAA 7, 9, 11, 12, 14	Satellites NOAA 15, 16, 17
Canal	AVHRR/1 Bandes spectrales	AVHRR/2 Bandes spectrales	AVHRR/3 Bandes spectrales
1	0,58 à 0,68 micromètre	0,58 à 0,68 micromètre	0,58 à 0,68 micromètre
2	0,72 à 1,10 micromètre	0,72 à 1,10 micromètre	0,72 à 1,10 micromètre
3 (A)			1,58 à 1,64 micromètre
3 (B)	3,55 à 3,93 micromètres	3,55 à 3,93 micromètres	3,55 à 3,93 micromètres
4	10,50 à 11,50 micromètres	10,50 à 11,50 micromètres	10,50 à 11,50 micromètres
5	10,50 à 11,50 micromètres	11,50 à 12,50 micromètres	11,50 à 12,50 micromètre

L'instrument principal embarqué à bord des satellites NOAA est le radiomètre imageur AVHRR dont différentes versions ont successivement équipé les satellites :

Ces versions diffèrent par :

- La fauchée (2700 km pour AVHRR/1, 2600 km pour AVHRR/2, 2940 km pour (VHRR/3)
- La résolution spatiale (1,1 km pour AVHRR/1 ; 0,5 km dans le visible et 1,1 km dans l'infrarouge pour AVHRR/2 et AVHRR/3).
- Les bandes spectrales (redondance des canaux 4 et 5 pour AVHRR/1 ; canal 3(A) supplémentaire pour AVHRR/3).

A noter que dans les canaux 4 et 5 (infrarouge thermique), la résolution radiométrique

est de $0,12^{\circ}\text{C}$, ce qui permet d'accéder à des thermographies précises de la température de surface de la mer.

Avec le radiomètre AVHRR, la détection des rayonnements émis ou réémis par la Terre et l'atmosphère s'opère dans cinq (ou six) bandes spectrales, du visible à l'infrarouge thermique. Une scène AVHRR comporte donc cinq (ou 6) images simultanées de la Terre vue dans ces cinq (ou six) domaines de longueur d'onde. [7], [8]

I.7.2 Les satellites de METEOSAT :

METEOSAT ou Météosat (Météosat en anglais) est une famille de satellites météorologiques réalisés sous maîtrise d'œuvre, c'est-à-dire qu'ils conservent toujours la même position par rapport à la Terre, foyer de l'humanité et est surnommée la planète bleue. C'est la troisième planète du système solaire en partant du soleil, et permettent donc l'observation est l'action de suivi attentif des phénomènes, sans volonté de les modifier, à l'aide de moyens d'enquête et d'étude en continu d'une zone précise du globe.



Figure I-16 : Météosat de première génération.

Les satellites Météosat envoient régulièrement sur Terre de nombreuses images numériques, il existe de nombreuses acceptions au mot surface, parfois objet géométrique, parfois frontière physique, souvent abusivement confondu avec sa mesure, terrestre et autres dans les technologies de l'information (TI), une donnée est une description élémentaire, souvent codée, d'une chose, d'une transaction d'affaire, d'un événement, qui permettent aux météorologues, à partir des observations d'anticyclones, dépressions atmosphériques, masses nuageuses (etc.), d'élaborer les bulletins météorologiques. Ces données sont également essentielles pour anticiper certains phénomènes météorologiques ravageurs tels que les

ouragans, tempêtes ; et pour le suivi de l'évolution du climat Selon la dernière définition de l'Union astronomique internationale (UAI), « une planète est un corps céleste (a) qui est en orbite autour du Soleil.[10]

I.7.2.1 Programme Météosat

Le premier satellite, Météosat 1, a été lancé le 23 novembre 1977. En 1995, EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) est une organisation intergouvernementale créée par une convention, a officiellement pris la responsabilité du financement et de l'exploitation des satellites Météosat et dans le langage courant, le terme diffusion fait référence à une notion de « distribution », de « mise à disposition » (diffusion d'un...) de leurs données.

Aujourd'hui, trois satellites Météosat de première génération sont encore en exploitation : Météosat 5 observe l'Inde , Météosat 6 et Météosat 7 observent l'Europe est considérée comme un continent ou une partie de l'Eurasie (péninsule occidentale), voire de l'Eurafrasié, selon le point de vue. Elle est parfois...).

Il faut noter que ce programme est le premier grand (voire seul) programme d'application opérationnel de l'ESA assurant une continuité de service grâce à des satellites de remplacements (ceux de première génération, puis ceux de seconde est le féminin de l'adjectif second, qui vient immédiatement après le premier ou qui s'ajoute à quelque chose de nature identique. La seconde est une unité de mesure du temps. Avec même, depuis les années 80, une redondance de satellites en orbite: il y en a toujours deux sur le méridien de Greenwich, prêts à continuer le service, si l'un tombe en panne.

Le 28 août 2002 a été lancé le premier satellite MSG (Météosat de Seconde Génération), cette famille de satellites dispose de radiomètres imageurs plus sophistiqués, 12 canaux contre 3 pour la précédente génération, et fournissent des images tous les quarts heures est une unité de mesure, soit deux fois plus fréquemment.

Depuis 1977, neuf satellites de la famille Météosat ont été mis en orbite autour de la Terre, dont deux satellites MSG. Le dernier lancement en date, celui de MSG 2, a été effectué le 21 décembre 2005.

I.7.2.2 Le capteur SEVIRI

Le radiomètre SEVIRI transmet des images des structures météorologiques à une résolution de 3 Km pour tous les canaux à l'exception du canal visible haute résolution (HRV) qui a une résolution d'un Km. Ses 12 canaux permettent de procéder à ce qu'on appelle un "pseudo sondage", la fréquence de son cycle de vue rapide, avec une nouvelle

image toutes les 15 minutes, permet de suivre les phénomènes météorologiques à évolution rapide, ce qui s'avère d'une grande utilité pour les prévisionnistes qui peuvent ainsi reconnaître et prévoir les phénomènes météorologiques dangereux, orages, pluies violentes, brouillards ou le développement de dépressions aussi petites qu'intenses susceptibles d'aboutir à des tempêtes dévastatrices. Le capteur SEVIRI est un radiomètre à balayage et c'est la rotation du satellite autour de son axe principal d'inertie qui est utilisée pour réaliser l'acquisition des images.

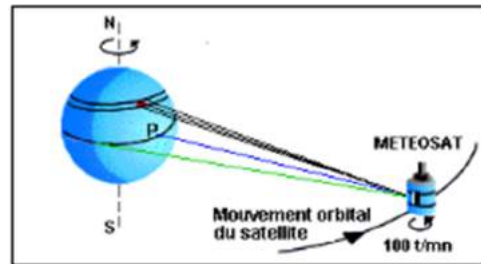


Figure I-17 : Le capteur SEVIRI .

Le satellite tourne à 100 tours par minute autour d'un axe parallèle à l'axe Nord-Sud de la terre. Le télescope du radiomètre de Météosat vise la terre par l'intermédiaire d'un miroir et balaie à chaque révolution du satellite une étroite bande de la surface de la terre. L'angle de balayage correspondant, de 18° , est décrit en 30 ms. Pendant les 570 ms suivantes, le télescope vise l'espace et cette durée est mise à profit pour modifier l'orientation du miroir, de façon qu'au tour suivant, il balaie au sol une bande contiguë à la précédente, mais plus au nord. La phase de non acquisition de données est mise à profit pour calibrer les détecteurs.

Le radiomètre est l'instrument principal dont les satellites météorologiques sont équipés. Cet instrument balaye la surface de la terre ligne par ligne. Chaque ligne consiste en une série d'images élémentaires ou pixel. Pour chaque pixel, le radiomètre mesure l'énergie radiative dans différentes bandes spectrales. Cette mesure est numérisée, puis transmise à une station au sol où elle est traitée, avant d'être envoyée à la communauté des utilisateurs.

Autre SEVIRI, les satellites MSG ont à bord l'instrument GERB de mesure du bilan radiatif de la terre qui fournit des informations précieuses sur le rayonnement de la planète, permettant aux chercheurs de calculer avec une grande précision le bilan radiatif terrestre, c'est-à-dire le rapport entre le rayonnement venant du Soleil et celui renvoyé dans l'espace. En complément de ces deux instruments, les satellites MSG sont dotés d'une charge utile de télécommunications très perfectionnée, nécessaire à l'exploitation, à ses télécommunications et à la diffusion des données aux utilisateurs.[10]

I.8 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 comportent l'image de télédétection et la complexité de l'acquisition de celle-ci pour ce faire.

Chapitre II

Comprendre l'ensablement

II.1 Introduction

Dans les zones sahariennes, l'ensablement constitue un problème majeur menaçant la stabilité et la durabilité des systèmes socio-économiques et biologiques, au sud de l'Algérie. L'avancée du sable provoque de grandes pertes économiques, le sable envahit les villes, les infrastructures et les oasis qui sont les principales sources d'eau et de revenus, ce qui a pour conséquence la migration de la population locale, ce phénomène a également des effets néfastes sur la végétation naturelle, ces effets se manifestent par la perte de la biodiversité et surtout par la dégradation des pâturages.

II.2 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.

II.2.1 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.2.2 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.1).

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

Comprendre l'ensablement

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.

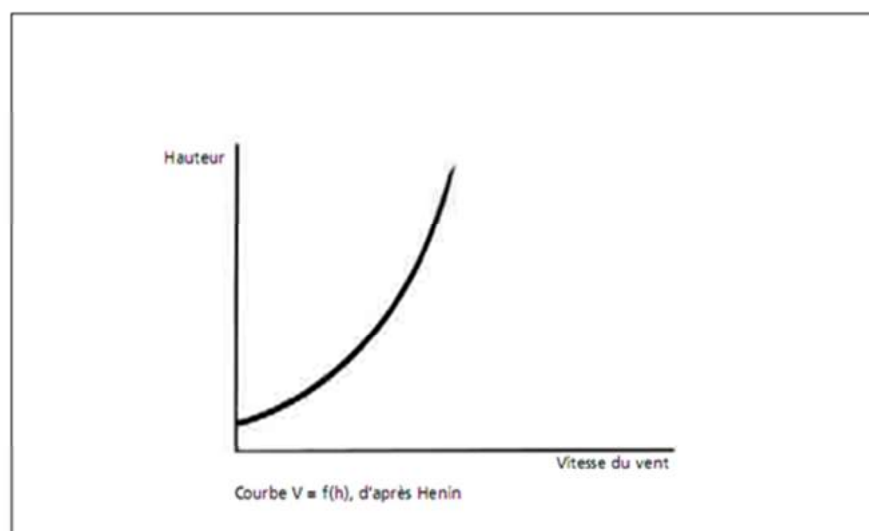


Figure II.1 Vitesse du vent en fonction de l'altitude.

La nature du mouvement des particules varie selon leur dimension (Figure II.2), 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.

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.2.3 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.

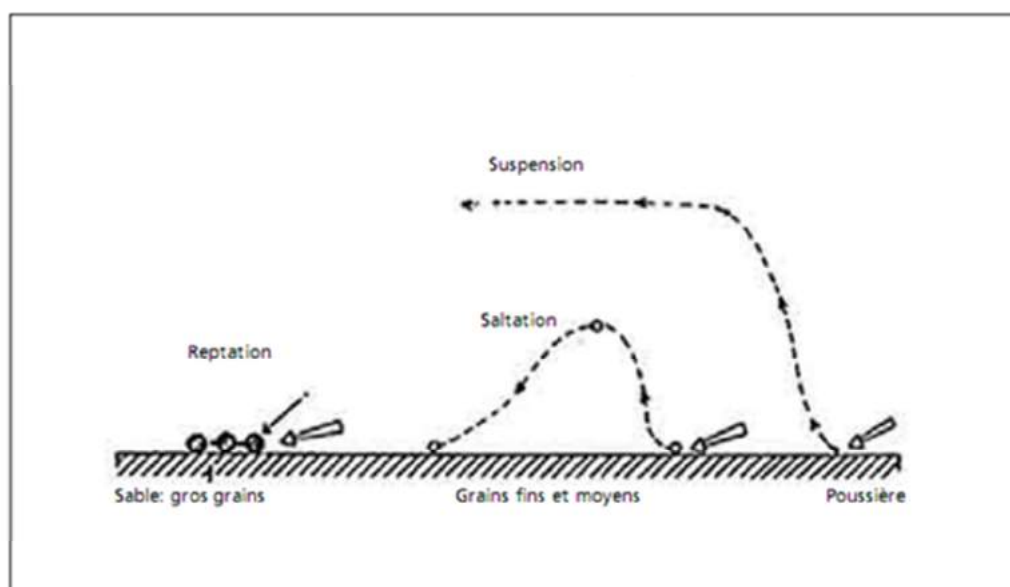


Figure II.2 modes d'entraînement des particules par le vent.

II.2.4 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.2.5 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 émietté (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.2.6 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.[10]

II.3 Effets de l'érosion éolienne

II.3.1 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.3.2 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, ou c'est ce déficit qui modèle le plus la végétation locale, car cette dernière doit s'adapter au manque d'eau sévère. [11]

II.4 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.4.1 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.

II. 4.2 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.

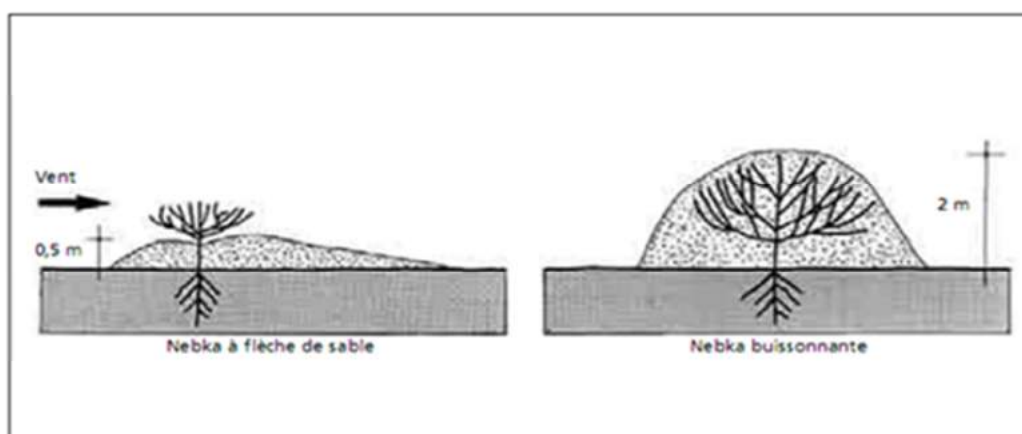


Figure II.3 Nebkas.

II. 4.3 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.

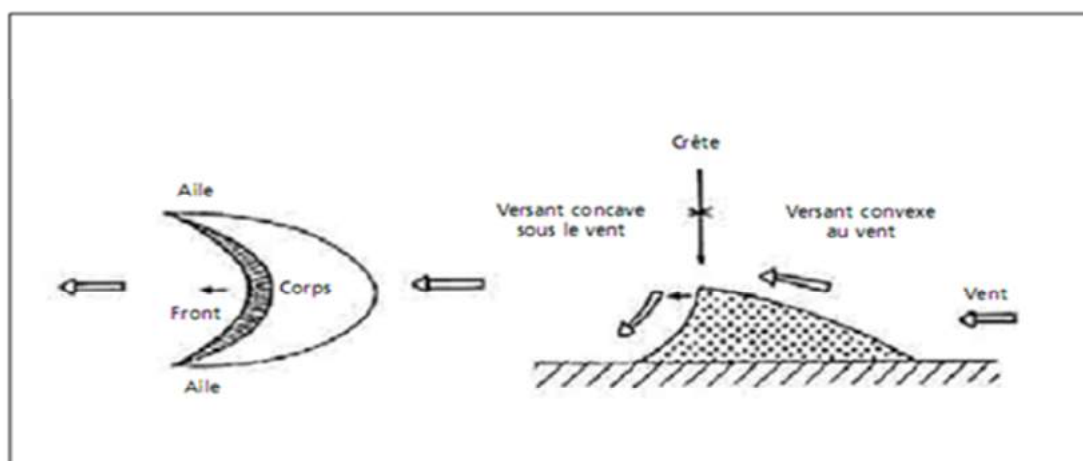


Figure II.4 Barkhanes.



Figure II.5 Barchanes isolées.



Figure II.6 Champ barchanique ou barchanes jointives.

Suivi du dièdre barchanique et enfin l'état de barchane, en général, les barchanes ne restent pas isolées, elles peuvent se rejoindre et former des ensembles complexes, allant des trains barchaniques à de véritables massifs dunaires.

La migration des barchanes 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 barchanes étant des constructions

instables, mobiles et sans cesse remodelées par le vent, leur vitesse de déplacement peut atteindre plusieurs dizaines de mètres par an.

II. 4.4 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.5), 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 ridages, 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.6). 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.7). 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.[14]

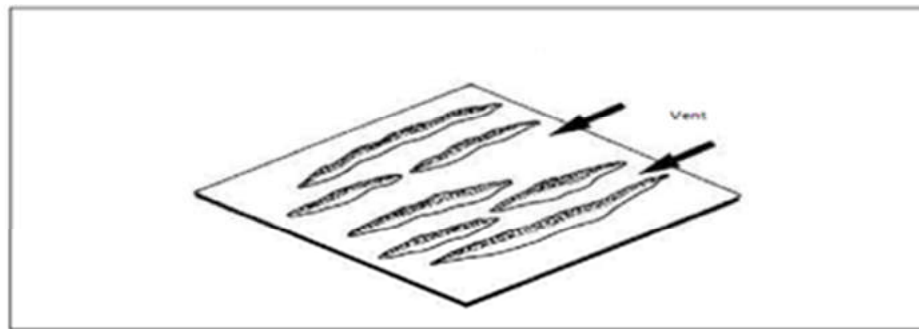


Figure II.7 Dunes linéaires.

II. 4.5 Les aklés

Ce type de formation, est un assemblage complexe de dunes qui se chevauchent (Figure II.8).

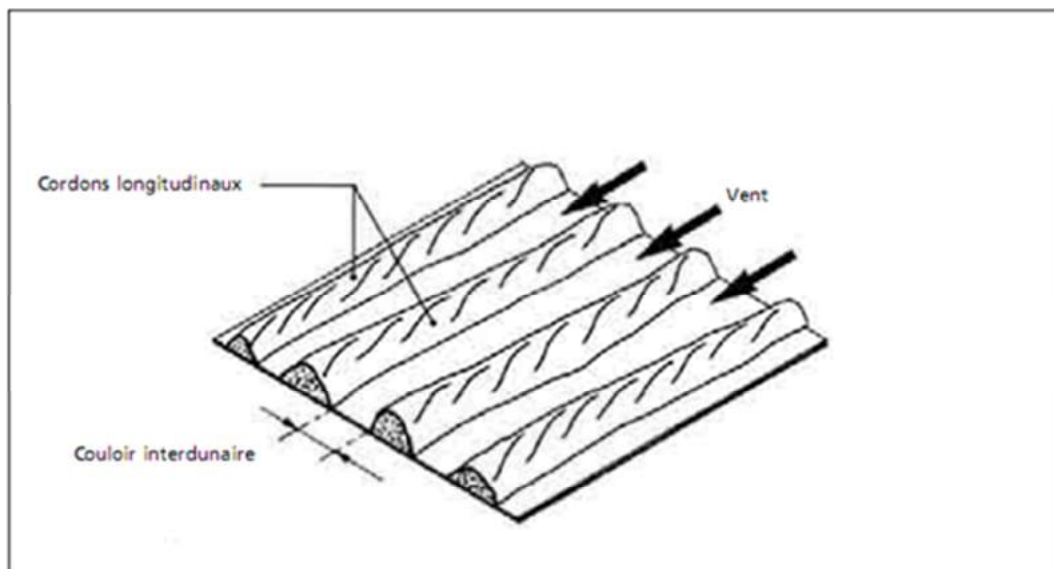


Figure II.8 Cordons longitudinaux.

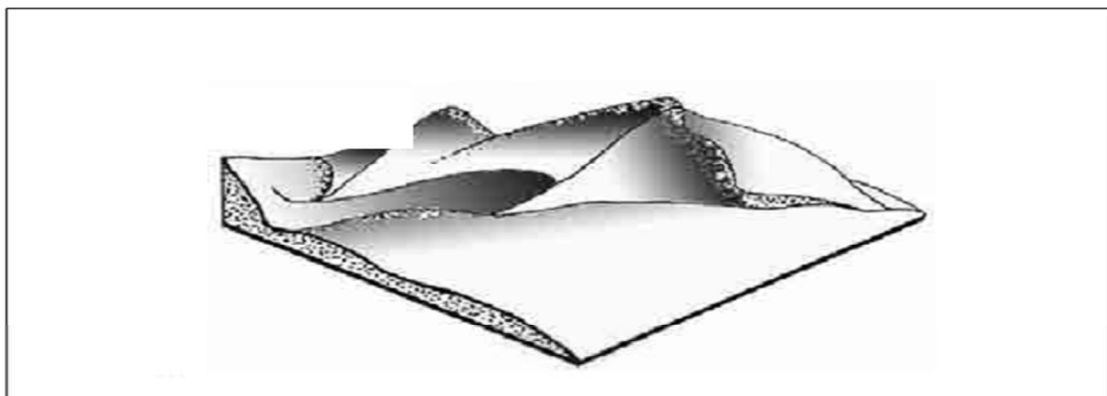


Figure II.9 Dunes linéaires

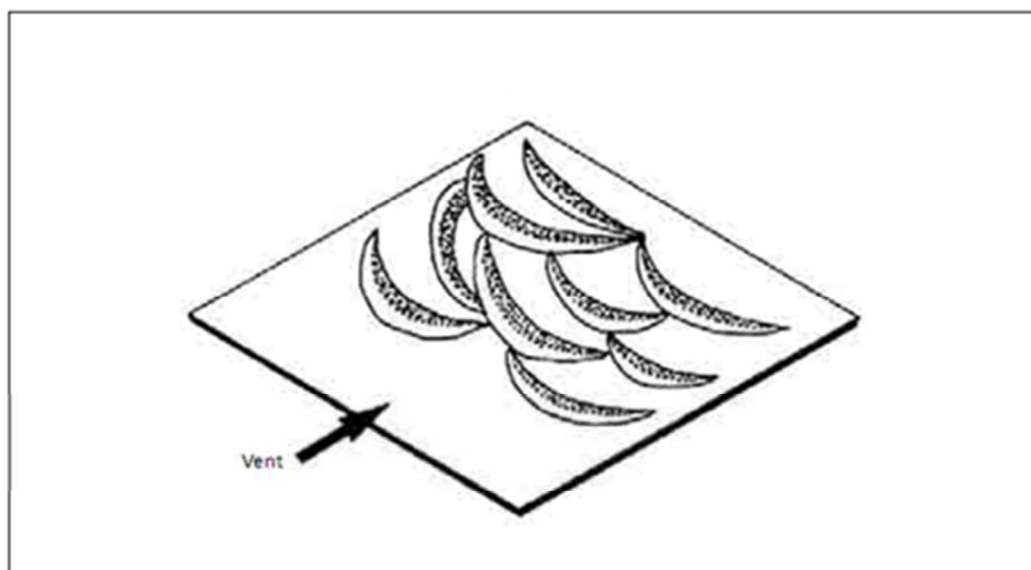


Figure II.10 Akhlés

II. 4.6 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. [12]

II.5 Identification des sites ensablés

Observations sur le terrain lorsqu'un site est menacé d'ensablement, il est nécessaire d'identifier avec soin les sources de sable, les zones de transport et les secteurs d'accumulation (Figure II.11), les sources de sable peuvent être d'origine locale ou mixte (autochtone ou allochtone).

Le sable peut également provenir de la dégradation du couvert végétal, d'anciennes dunes remises en mouvement, d'apports actuels provenant des épandages de crues, des terrasses alluviales ou des oueds. Une bonne localisation des étendues de sources de sable permet de bien définir les techniques de stabilisation à adopter.

Les zones de transport sont des surfaces sur lesquelles le sable se déplace par saltation et roulage, en laissant sur son passage des traces telles que les voiles éoliens et les nebkas. L'orientation de ces traces indique la direction de déplacement du sable vers les zones de dépôt. Les secteurs d'accumulation ou les zones de dépôt sont d'importantes masses de sable, comme les barkhanes, les dunes linéaires, les cordons longitudinaux, etc.

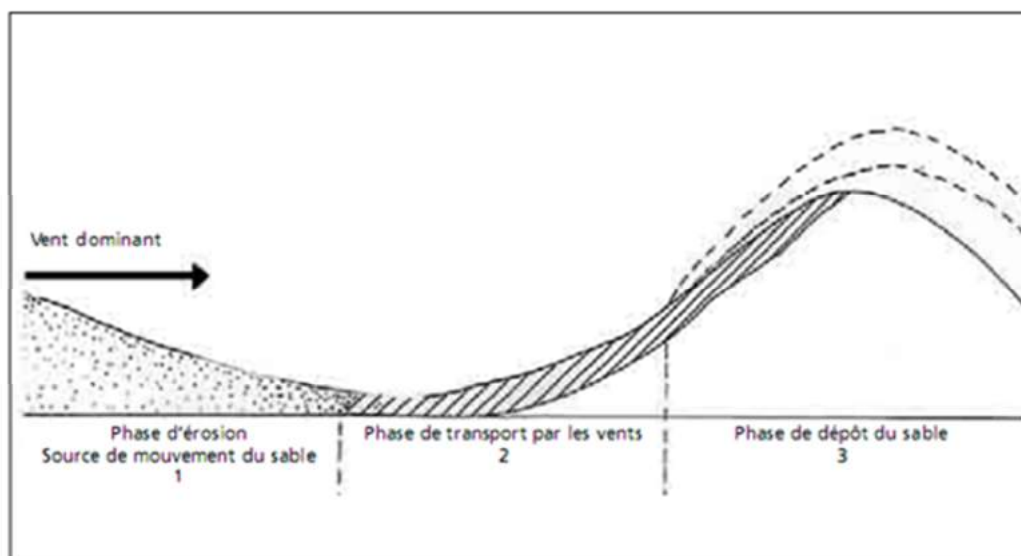


Figure II.11 Dynamique de l'avancée du sable

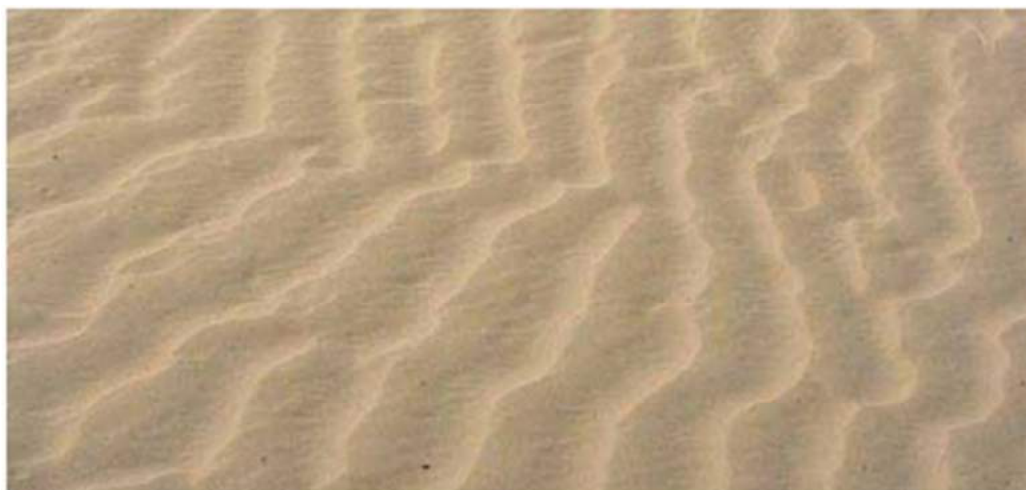


Figure II.12 Champ barkhanique ou barkhanes jointives

Ces masses sableuses sont très dangereuses pour les villages, les infrastructures routières, les périmètres maraîchers et les palmeraies, ces masses se transforment en fronts de dunes lorsqu'elles rencontrent un obstacle placé sur leur trajectoire. Les crêtes de ces fronts signifient qu'elles constituent des pièges à sable, qui peuvent se développer sur plusieurs mètres de haut en risquant de tout ensevelir à mesure qu'elles avancent, les secteurs d'accumulation constituent également d'importantes masses de matériel sableux qui, transporté par le vent, risque d'envahir d'autres sites. [13]

II.6 La cartographie des zones ensablées

Les sites ensablés doivent être inventoriés, répertoriés et cartographiés, et leurs coordonnées géographiques bien précisées. Les études feront ressortir les directions de l'ensablement, les secteurs de dépôt sableux, ainsi que les types de traitement proposés.

[13]

II.7 Types de traitement

Pour fixer des dunes mobiles, il est nécessaire d'étudier la composition et les caractéristiques du sable, la force, la fréquence et la direction du vent, la quantité, la durée et la fréquence des pluies, ainsi que l'existence ou non de végétation naturelle sur ces 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 deux types de fixation.

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 et/ou herbacée permanente (semis direct, plantation, mise en défens, gardiennage). [13]

II.8 Intérêt des images satellitaires dans l'étude de l'ensablement

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, ces interpolations 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.

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, (2001) 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, a 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.[14]

II.9 Détection des changements dynamiques de l'ensablement

La détection et l'identification des changements, apparaissant à la surface de la terre, constituent l'une des préoccupations essentielles pour les scientifiques et les gestionnaires impliqués dans la compréhension et la gestion des écosystèmes naturels et artificiels (MANIERE R., 1987). Ainsi, ces dernières années, on assiste à un véritable changement dynamique de la steppe avec l'avancée et l'extension de l'ensablement vers l'intérieur du pays, en effet, les effets néfastes des périodes de sécheresses à partir des années de 1970 conjugués avec l'accroissement de la population ainsi que la conjoncture qu'a connu le pays dans les années 1990 ont fortement bouleversé l'équilibre fragile du milieu aride.

Ces effets néfastes risquent d'entraîner la disparition partielle ou totale des parcours semi-arides (irréversibilité) et certaines parties des réserves nationales que cependant, la localisation dans l'espace et dans le temps des différents secteurs en mutation les plus significatifs permet aux spécialistes de l'aménagement du territoire et aux responsables locaux de bien comprendre ces différentes mutations socio spatiales qui affectent la steppe sud-ouest de l'Algérie, de la sorte, en milieu semi-aride, évaluer l'ampleur des changements peut aider à mieux appréhender le processus de l'ensablement et la régression des graminées (*Stipa tenacissima*, *Artemisia herba Alba* et *Lygeum spartum*) dans leur dimension spatiotemporelle.

Au niveau de la zone d'étude les données de terrain concernant le phénomène d'ensablement sont rares, toutefois, si elles existent, elles ne permettent pas de présenter le processus de l'ensablement dans une vision synoptique, la plus part des études qui existent concernent uniquement des zones restreintes alors que le phénomène nécessite d'être étudié dans une approche multidimensionnelle (échelles supranationale, régionale et locale). A cet égard, le recours aux données de télédétection est primordial afin de dresser des bilans et des hypothèses fiables sur la dégradation des parcours et l'installation des édifices dunaires.

Dans tous les travaux sur ce domaine les images des données satellitaires et multitudes constituent une excellente source d'information, toutefois elles demeurent insuffisamment exploitées pour l'évaluation de la dynamique des espaces semi-arides.

La carte d'occupation du sol reste un document nécessaire mais insuffisant pour l'appréhension de l'évolution rapide du phénomène d'ensablement et les mouvements des dunes, en effet, la surveillance régulière de ce phénomène sur de longues périodes en utilisant les imageries satellitaires peut mieux évaluer le mécanisme d'évolution des dunes sur les terrains de parcours semi-arides.

D'après les travaux menés par BOURCIER A ,et al., (1999) l'estimation régulière (année après année) de la transformation d'un milieu permet de dresser des courbes qui illustrent la tendance de l'évolution du phénomène, dès lors, il est possible de prévoir les évolutions dans le futur proche des phénomènes naturels et d'établir un calendrier pour l'acquisition des images en fonction de la rapidité d'évolution de l'ensablement.

La réalisation des cartes d'occupation du sol n'est donc pas nécessaire puisqu'elle exige des missions d'échantillonnage des années concernées ou à des périodes non éloignées de celles-ci, de telle manière que l'état des parcours présente une situation analogue à celle existant au moment de la prise de vue.

Les méthodes de détection des changements sont généralement soumises à des niveaux de contraintes : radiométrique et spatiale, les conditions d'éclairement et d'atténuation atmosphérique sont très variables dans le temps et dans l'espace, les images nécessitent donc obligatoirement des corrections radiométriques et atmosphériques, afin d'homogénéiser les données multispectrales des images multitudes utilisées. Enfin, il importe que les images soient également corrigées géométriquement.

Plusieurs méthodes de détection des changements de l'ensablement ont été utilisées, ces méthodes se basent sur la comparaison des scènes de satellite. Toutefois, elles ont été

utilisées dans l'analyse rapide de l'évolution du milieu, cette analyse est basée sur l'interprétation des différentes images multidates, avant l'application des méthodes de détection des changements qui affectent le milieu, les images ont subi des traitements d'amélioration géométrique, radiométrique et atmosphérique.

Dans la zone d'étude la détection des mutations significatives de l'ensablement a nécessité la réalisation des étapes suivantes :

- sélection d'images multispectrales multidates.
- choix de l'image de référence.
- correction radiométrique des images satellitaires.
- correction géométrique des images satellitaires.
- méthodes de détection de changements :

Méthode I : identification rapide et quantification de l'évolution des changements.

Méthode II : technique de la composition colorée multidade.

Méthode III : indice dynamique de couverture des sols. [15]

II.10 Correction radiométrique et atmosphérique

En télédétection, l'information concernant la surface de la terre est le rayonnement électromagnétique, les mesures satellitaires, faites au niveau du capteur embarqué sur un satellite, sont généralement très difficiles à exploiter pour un processus d'interprétation des images, puisque les propriétés du rayonnement sont perturbées par l'atmosphère au cours du double trajet : soleil -terre et terre -capteur.

La propagation du signal dans l'atmosphère et les caractéristiques propres du capteur introduisent une distorsion dans la mesure radiométrique, la couverture nuageuse rend difficile en effet l'acquisition de mesures régulièrement réparties dans le temps, dans une étude multidates ou un suivi dynamique régulier d'un phénomène par télédétection, il est opportun de corriger les images radiométriquement, car ces dernières sont prises dans des conditions de prise de vue très différentes (éclairage solaire, coefficient de calibration, angle zénithal, angle azimutal, etc.) qui changent au cours du temps.

La correction radiométrique a pour but de minimiser ces perturbations causées par l'atmosphère, et de déterminer la vraie réponse spectrale, reçue par le satellite, de la cible visée, pour cela, on a recours à des modèles de correction radiométrique et atmosphérique pour :

- Une étude multitemporelle, afin de mettre toutes les images dans un même référentiel radiométrique, ce qui rend facile la détection des changements réels qui ont eu lieu entre les différentes dates.
- Réaliser des mesures absolues dont le but de suivre la dynamique d'un phénomène donné.
- Améliorer le processus de classification automatique.

II.10.1 Rééchantillonnage

Le rééchantillonnage des images spatiales a pour but de les ramener à une même résolution spatiale, cette étape est utilisée afin de faciliter l'interprétation visuelle des images et la détection des changements.

II.10.2 Correction géométrique

La correction géométrique consiste à rectifier géométriquement une image par rapport à l'autre de façon à ce qu'un élément au sol ait les mêmes coordonnées sur les deux images. [15]

II.11 Méthodes de détection de changements dynamiques de l'espace

Une fois les images satellitaires corrigées géométriquement et radiométriquement, on amène à appliquer plusieurs approches qui sont basées sur l'utilisation des données multi-dates pour la détection des changements, le principe de ces approches diffère d'une méthode à une autre.

II.11.1 Identification rapide et quantification de l'évolution significative de l'extension de l'ensablement

L'analyse qualitative et quantitative de l'évolution rapide du paysage et plus particulièrement l'évolution de l'ensablement s'avère intéressante dans la mesure où elle permet de dresser un bilan provisoire sur l'état actuel de la zone d'étude, à l'aide de cette analyse on peut sensibiliser la population, les élus locaux ainsi que les décideurs sur l'ampleur du phénomène de l'érosion éolienne.

Avant d'entamer ce travail d'analyse dynamique rapide du milieu, on doit rencontrer quelques difficultés dans la détermination et la connaissance de l'état de référence du milieu de la zone d'étude, en effet, il n'est pas possible de dresser un bilan sur l'état de dégradation du milieu et de l'ensablement si on ne se réfère pas à un état antérieur ou à des conditions initiales.

Le seul moyen pour connaître l'état de référence est de faire une recherche sur les documents anciens et historiques, toutefois, dans la plus part des cas ces documents n'existent pas, a ce stade les seuls documents de référence que on va acquérir datent des années soixante dix, concernent les photos aériennes de l'IGN, la carte géologique et les cartes topographiques, on préfèrent travailler sur les cartes topographiques, car la carte géologique est établie à une échelle plus petite (1 : 500 000) que les cartes topographiques.

Après avoir établi le fichier de référence des espaces ensablés, on procèdent à l'étude de dynamique éolienne en utilisant des images satellitaires récentes, ces images ont subi plusieurs opérations de traitement d'images en vue de leur exploitation notamment :

- correction géométrique des images afin de les rendre superposables aux cartes topographiques.
- établissement d'une composition colorée.

Création d'une image binaire où figure uniquement le thème sable, les autres thèmes ont été masqués pour éviter toute confusion entre ces derniers lors du traitement, toutefois, cette technique est délicate dans la mesure où elle demande une certaine précision dans la définition de l'intervalle des valeurs extrêmes qui bornent le thème sable, une erreur sur la définition de l'intervalle pouvait influencer le résultat sur la quantification des superficies ensablées.

A cet égard, on procèdent à des vérifications sur les limites des zones ensablées en se basant sur quelques photographies aériennes, de plus, pour rendre le résultat du traitement assez acceptable, on appliquent un filtre morphologique (dilatation) sur l'image binaire afin d'éliminer les pixels isolés et pour rendre les structures de l'élément sable plus homogènes :

- digitalisation directe sur l'écran de l'ordinateur des limites des zones ensablées.
- vectorisation et croisement du fichier avec les limites.

II.11.1.1 Tendance de l'évolution rapide

La quantification de la dynamique des espaces ensablés réalisée précédemment a permis de dresser un bilan sur l'état actuel et récent de la surface du sol, toutefois, cette quantification doit être replacée dans un contexte temporel, selon POUCHIN T., (2001) l'analyse dynamique s'avère insuffisante afin de mettre en lumière la vision cinématique des phénomènes et ainsi de connaître leurs tendances d'évolution cependant, à l'aide d'une série de courbes on peut appréhender la tendance de l'ensablement à l'intérieur de chaque

limite, cela on permettrons de connaître la date du déclenchement du phénomène ainsi que sa rapidité de propagation spatiale, ces informations sont très utiles dans la mesure où elles permettront, en les combinant avec d'autres informations (pluviométrie, période desécheresse, extension de la surface agricole utile, les aménagements déjà réalisés, évolution du cheptel, etc.), de bien comprendre les causes de l'extension du phénomène à l'échelle spatio-temporelle, de même, les formes géométriques des courbes de tendance caractérisent la dynamique du phénomène pour chaque espace, par exemple, une tendance linéaire caractérise un mouvement dynamique régulier de l'érosion éolienne (progression de l'ensablement au fur et à mesure que la végétation régresse).

Toutefois, avec le peu de données images que l'on possède, on ne peut pas déterminer avec une meilleure précision la vraie date de déclenchement du phénomène, cela demanderait l'utilisation de plusieurs images au moins une image par an.

II.11.2 Technique de la composition colorée multi-date

Afin de dégager les grandes changements ayant affecté la zone d'étude on a amenés à utiliser la technique de la composition colorée multi-date, cette technique est facile et plus rapide à mettre en œuvre, elle consiste en la superposition des canaux de date différente, sur cette composition colorée la couleur des pixels inchangés sera codée en jaune pour les objets ayant des réluctances fortes et moyennes (bâti, sol nu, sable, etc.), et en noir pour les réluctances faibles (eau, boisement), quant aux pixels qui ne présentaient pas les mêmes valeurs de réluctance entre les deux dates, ils seront codés en couleur rouge et verte plus au moins saturée selon la grandeur et l'ampleur du changement.

Vu l'étendue et la grandeur de la zone d'étude, on préfère montrer des zones pilote qui ont connu des changements réels du paysage, il est difficile de montrer tous les changements à l'intérieur de la zone à l'échelle d'une feuille de papier A4.

Il faut rester prudent vis-à-vis de l'interprétation des images de compositions colorées en fausse couleur, en effet d'autres considérations (date de prise de vue, erreur de géo-référencement, défaillance d'un instrument de prise de vue, condition de prise de vue, rotation de culture) peuvent engendrer des variations de réponse spectrale considérables qui peuvent fausser le résultat des changements.

A cet effet, l'utilisation des images à très haute résolution spatiale est recommandée, avec ce type d'image, en plus de la couleur, d'autres paramètres sont pris en compte notamment : la taille, la texture, la position et la forme de l'objet afin de définir avec précision la catégorie de changement (POUCHIN T., 2001).

La composition colorée des canaux rouges des images , le choix du canal rouge a été dicté du fait que dans ce dernier, la végétation est représentée par de faibles valeurs radiométriques et les zones minéralisées sont caractérisées par de fortes valeurs, donc, ce fort contraste entre la végétation et les sols nus favorise sans doute la mise en évidence des zones de changement affectées par la présence humaine, ces changements sont mis en évidence par la modification radiométrique des pixels qui ont subi un changement à leur surface.

Il importe de noter que d'après l'interprétation de l'image diachronique il ressort que les travaux de restauration des sites ne sont réalisés qu'au niveau de zones très restreintes, or vu les dimensions spatiales des édifices dunaires existants dans la région sablée, ces travaux de restauration et de reboisement constituent une menace aux limites, à court terme les reboisements à base de *Tamarix gallica* vont stopper l'avancée du sable mais à long terme ils se transforment en véritables pièges de sable et contribuent à la formation de grandes dunes.

II.11.3 Techniques de l'indice dynamique de couverture des sols

L'utilisation du principe de la composition colorée diachronique basé sur le canal rouge est un bon moyen pour faire ressortir les différentes mutations de l'espace semi-aride à l'échelle globale, toutefois, ces changements nécessitent une interprétation visuelle basée sur le principe du modèle de couleur additive ou soustractive, donc un utilisateur non expérimenté dans le domaine aura des difficultés pour comprendre et interpréter la composée diachronique.

A cet effet, on préfère utiliser l'indice dynamique de couverture des sols (IDCS) qui permet d'appréhender les alternances entre le sol et la végétation.

En premier lieu on teste l'indice de végétation, l'indice de brillance, l'analyse en composante principale diachronique et l'indice de cuirasse pour déterminer les vrais changements.

L'utilisation de l'indice de végétation dans les zones arides n'est pas recommandée, car la réponse spectrale de la végétation est fortement influencée par la réponse spectrale des sols nus et plus particulièrement le sable, ceci rend difficile le suivi dans le temps du phénomène de changement dans les régions où le recouvrement de la végétation est faible par rapport au sol nu, toutefois, son utilisation donne de bons résultats lorsqu'il s'agit d'une zone où la végétation présente un bon recouvrement.

Dans cet indice, la progression des espaces minéralisés est représentée par les fortes valeurs, par contre la progression des espaces végétalisés est codée par les faibles valeurs, de plus, dans le canal rouge le phénomène de variation de la végétation pendant les saisons demeure stable.

Pour la visualisation de l'indice dynamique de couverture des sols on applique une échelle de couleur qui s'étale du niveau sombre jusqu'au rouge saturé en passant respectivement par le bleu, le cyan, le vert et le jaune, ainsi, la progression et la régénération de la végétation occupent les faibles valeurs de IDCS et prend la couleur noire et violette.

Cependant, l'absence totale de la végétation (progression minérale) se manifeste par des nuances de couleurs de IDCS du rouge saturé au jaune vert, quant aux zones inchangées elles apparaissent en bleu et en cyan. Sur la base de cette palette de couleur nous avons réalisé un seuillage sur IDCS, les valeurs radiométriques ont été regroupées et codées selon trois classes différentes.

La classification de l'IDCS en trois classes a permis de faire un lien entre l'état de la végétation et le type de changement qui a affecté la zone d'étude, la progression minérale est liée à une dégradation de l'état de la végétation et à la progression de l'ensablement, par contre, l'augmentation de la végétation est un signe de variation progressive de la végétation, la radiométrie inchangée correspond aux zones relativement stables.

Face à cette situation on a été obligé de faire un travail d'investigation sur le terrain ainsi qu'un travail de photos-interprétation effectué sur les deux compositions colorées des deux dates afin de surmonter les difficultés. [18]

II.12 Conclusion

L'utilisation des données de télédétection au travers de l'indice dynamique de couverture des sols et de la composition colorée diachronique nous a permis de mettre en évidence les différents changements.

Ces changements concernant les mutations des unités paysagères en zone semi-aride ont nécessité de tester plusieurs indices de changement (indice de végétation, indice de brillance, indice de curasse et l'analyse en composante principale) afin de minimiser les erreurs sur l'appréciation des résultats sur les changements, il est important de savoir qu'on télédétection le résultat de changement dynamique est influencé par les variations conjoncturelles (saison, conditions météorologiques), d'où la nécessité d'appliquer les corrections radiométriques et atmosphériques sur les images.

Chapitre III

Les méthodes de traitement

III.1 Introduction

En Algérie semi-aride, l'ensablement est considéré comme l'une des manifestations les plus importantes et remarquables de la désertification, son suivi a été longtemps effectué à l'échelle stationnaire, mais avec les nouvelles technologies offertes par la télédétection, il est devenu aussi possible de caractériser ce phénomène à l'échelle spatiale, grâce à une exploitation réfléchie des données cartographiques existantes et une démarche basée sur des méthodologies itératives et claires pour le traitement des données satellitaires.

III.2 Les méthodes de traitement

La dynamique éolienne est un élément classiquement invoqué dans les études sur l'ensablement. Elle présente un facteur potentiel de perte de productivité lors de l'ensablement des zones de culture ou de déflation des sols notamment. Quelques travaux d'auteurs qui ont traité le processus de l'ensablement des zones arides et semi arides sont cités en bibliographie. Ainsi, Marius C. (1995) traite du problème d'ensablement et ses impacts négatifs sur les mangroves du Sénégal, Callot et al. (1996) analyse la dynamique des sables éoliens dans le Nord-Ouest saharien. Plus récemment, Benmohammadi et al. (2000) ont analysé les interrelations anthropiques et naturelles et leurs impacts sur la recrudescence des phénomènes d'ensablement et de désertification au Sud-Est marocain, Desjardins et al. (2005) ont mis en évidence l'avancée des dunes dans plusieurs zones du Sud-Est marocain en utilisant des images civiles et militaires haute résolution spatiale pour comprendre la progression des édifices dunaires sur une période de quatre années. Bensaid A. (2006) a utilisé l'imagerie satellitale pour l'étude de l'ensablement dans la wilaya de Naâma (Algérie) en zone aride. [16]

III.2.1 La méthode de dépôt des voiles sableux

On s'intéresse essentiellement au dépôt du voile sableux (un des indicateurs du mouvement de sable), les données anémométriques à partir des travaux de Dubief (1963), en analysant les fréquences annuelles des vents. Il faut remarquer que la période allant de novembre à mars se caractérise par les vents dominants Nord-Ouest, de juin à septembre, la direction Sud-Ouest apparaît nettement au dépend de la direction Nord-Ouest qui s'estampe à son tour, la direction Sud-Est joue probablement un rôle déterminant dans la mise en place des placages de bas de versants Est et Sud-Est des crêtes et de la grande dune, il s'agit d'une direction préférentielle des vents de sable d'été (Sirocco) plus violents en général qu'en hiver, la période estivale favorise également la déflation des sédiments dans les oueds à sec.

Cependant la fréquence des vents au sol peut être perturbée par les reliefs qui s'organisent suivant la direction Sud-Ouest – Nord-Est, par conséquent, les seuils signalés antérieurement en orographie jouent un rôle prépondérant dans la circulation des vents.

Directions	Fréquences
NW	30%
W	15%
N	15%
SW	10%
NE	10%
SE	5%
S	3-8%

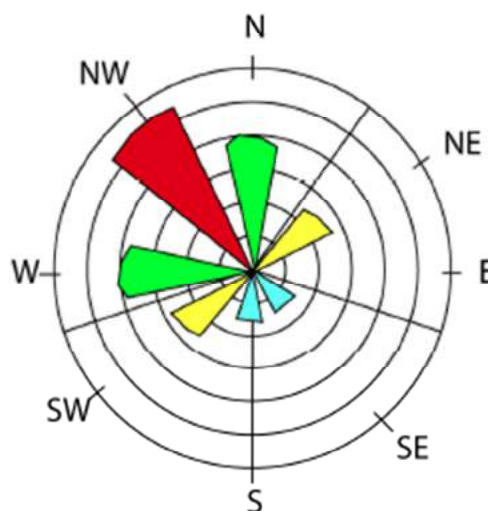


Figure III.1 Exemple des fréquences des vents

Le nouvel espace bâti est aux pieds des zones d'accumulation de sable sans ouvrage de protection (écran de végétation, par exemple), les hamadas sont souvent couvertes d'une pellicule rousse de sable à forte teneur en quartz (66% en moyenne) pour la fraction grossière, l'analyse sur un échantillon de la fraction fine réalisée par Coude-Goussen et Rognon (1995) lui fournit les minéraux suivants, en plus du quartz : illite (33%), palygorskite (20%), smectite (16%), Halite et gypse (teneur inférieure à 10% pour les deux derniers minéraux), d'après cette composition minéralogique, il conclut que la pellicule rousse dérive plus des roches tertiaires continentales que des formations alluviales des grands oueds.

Vu le cortège minéral identifié dans la fraction fine de cette pellicule, on favorisent plutôt une source nourricière se rapportant aux dayet, sebkhas ou chotts, la présence des minéraux : palygorskite, halite et gypse militent en faveur de sédiments de milieux salés (Marmi, 1995) la palygorskite est un argument qui corrobore notre hypothèse.

Le sable constitue ainsi un facteur de risque permanent de plus en plus ressenti aussi bien pour la santé publique, la qualité de vie, mais également un danger pour les zones de mise en valeur agricole, il devient alors pertinent de mettre au point un moyen de localisation et de surveillance de la dynamique des édifices de sable dans la zone.

L'ensablement constitue l'une des manifestations les plus spectaculaires de la désertification, mais les matières solides en suspension dans l'air constituent une autre source de danger pour la santé publique. Par un jour de vent de sable en milieu saharien, l'atmosphère est si chargée de matière solide que l'on se croirait au crépuscule. [17]

L'indice du voile sableux

L'utilisation de plusieurs images satellitaires à différentes résolutions spatiales et dates d'acquisition différentes nous conduit à répondre à trois questions particulières :

- la localisation des formations sableuses
- la pérennité des directions dominantes des transports éoliens
- l'activité du phénomène de transport de matériaux solides

Pour ces trois questions, on s'appuie sur la présence du voile sableux, les traitements conventionnels de l'image satellitaire (comme les compositions colorées , les indices thématiques, ...) ne permettent pas de différencier correctement le voile sableux du sol, de la roche mère en place ou des carrières de production d'agregats , ni à mettre en évidence facilement les champs de mini dunes, on a alors développé un indice thématique spécifique IVS pour lever ces ambiguïtés et localiser la couverture sableuse, cet indice utilise les canaux Bleu, Rouge et P.I.R (Proche Infra-Rouge) et fait apparaître « le voile sableux éolien » en blanc et les sables/graviers du lit de l'oued en gris, nuance attribuée à la profondeur de l'oued et du mélange sablo-limoneux .

$$\text{IVS} = (\text{tm1} + a*\text{tm3} + b*\text{tm5}) / (1 + \text{tm1}) \quad \text{Eq.III.1}$$

Cet indice a été validé sur plusieurs images de résolution et de dates d'acquisition différentes, le voile sableux y apparaît toujours avec des valeurs très fortes, affichées en blanc. L'indice est donc stable aux niveaux des types d'images et de la date d'acquisition, d'après des travaux déjà faits. Toutefois, on signale une différence importante par rapport aux indices conventionnels (NDVI, par exemple) dont le résultat est toujours un nouveau canal dont les pixels prennent des valeurs obtenues calculées au moyen d'une fonction dont les opérandes sont les canaux d'origines à combiner, l'indice IVS, au contraire, à pour effet d'accentuer les valeurs des pixels considérés « voile sableux » et d'atténuer les valeurs des autres pixels sans les éliminer, on garde ainsi une vision du paysage et un « repérage » géographique sur l'image.[18]

III.2.2 La méthode de différence normalisée JENSEN (1996)

JENSEN propose différentes étapes pour en arriver à une démarche scientifique de suivi et d'analyse de l'ensablement, les algorithmes retenus pour l'étude de l'ensablement et de leurs conséquences sont d'abord la différence normalisée entre les années d'acquisition des données et l'analyse en composantes principales des données enfin, on utilise des filtres morphologiques qui balaient les images combinées deux à deux afin d'isoler les dunes ou champs de dunes dans une perspective de vision de leur déplacement.

L'approche par différence normalisée consiste à soustraire, de la même façon qu'un indice de végétation (NDVI) la première bande de la seconde, En fait, l'expression mathématique de cette opération est la suivante :

$$D(bandes1, 2) = \frac{Bande2 - Bande1}{Bande2 + Bande1} \quad \text{Eq.III.2}$$

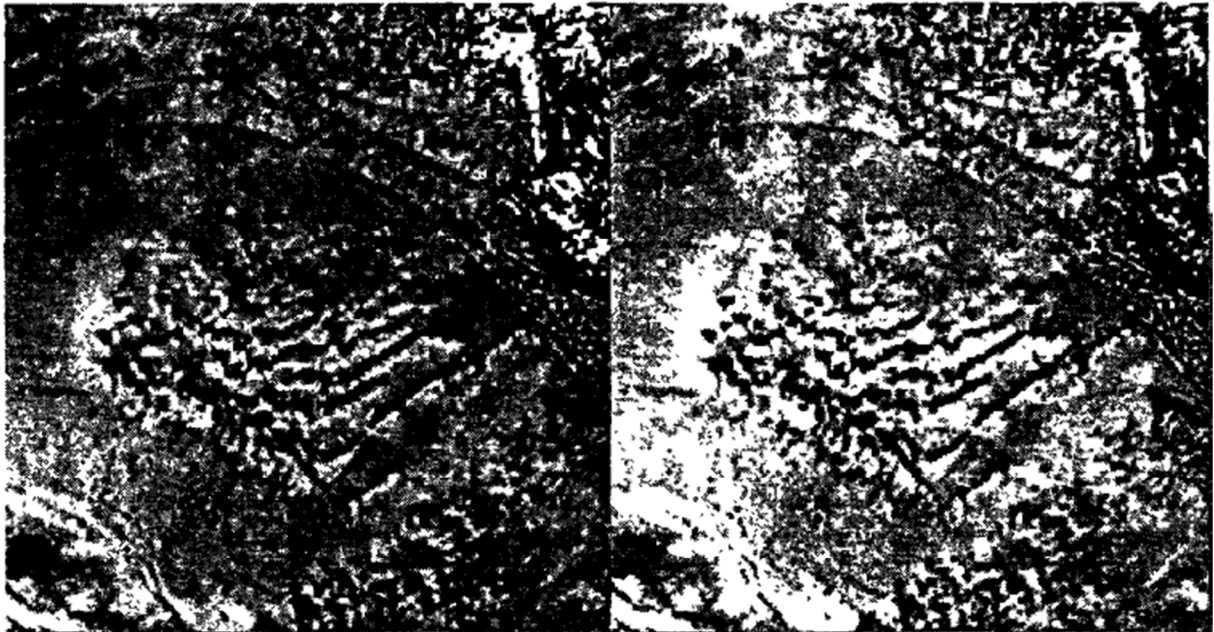


Figure III.2 Résultats visuels des approches par différence normalisée (à gauche) et par analyse en composantes principales (à droite).

Étapes générales de la méthode :

ÉTAPE	TITRE	SPÉCIFICITÉS
1	Présentation du problème	- Description du site étudié - Spécification de la fréquence du changement et - Identification des objets étudiés
2	Considérations significatives dans l'étude du changement	- Présentation des aspects de la résolution (spatiale, spectrale, temporelle et radiométrique) des données de télédétection
3	Processus de traitement des informations	- Acquisition des données appropriées : données de télédétection, données auxiliaires (rapports, cartes, données in situ) - Pré-traitement des données numériques (corrections géométriques et radiométriques) - Choix de l'algorithme de détection - Cartographie des résultats
4	Évaluation de la qualité des Résultats	- Critique sur la détection et discussion sur la précision
5	Production du résultat final	- Production numérique - Production sur papier

Contrairement à une simple différence ou à un rapport de bandes, cette formule permet de minimiser l'impact des différences d'illumination, les effets de pente et d'ombrage. L'expérimentation démontre de plus qu'on obtient une meilleure discrimination spectrale avec cette approche par rapport aux opérations mathématiques simples.

L'analyse en composantes principales est utile dans le suivi de l'ensablement entre deux moments d'observation, cette opération engendre de nouvelles bandes non corrélées entre elles et, selon la composante qui en résulte, permet de présenter sur une même image des informations provenant de deux images acquises à des moments différents.

De plus, elle offre une meilleure perception visuelle du fait qu'elle élimine des premières composantes les bruits radiométriques. Avec l'approche de composante principale, il est facile de pouvoir bien distinguer les changements entre deux années.

Cette approche est efficace lorsque les dunes sont suffisamment volumineuses et espacées pour le suivi de l'ensablement spatiaux à partir de plates formes satellitaires.[19]

III.2.3 La méthode de la Morphologie Mathématique

Cette discipline de l'analyse d'image, développée dans les années 1960 par Matheron et Serra (Serra, 1982), permet à l'opérateur de travailler, non pas sur la couleur ou la radiométrie des pixels de l'image (comme en traitement du signal), mais sur l'analyse mathématique des contrastes, afin d'en extraire des formes.

Par une succession d'opérations, une image est structurée selon les critères morphologiques jugés pertinents, pour l'étude (Mering, 1998) en dépassant les limites de la photo-interprétation visuelle, biaisée par la part de subjectivité qu'elle induit et difficile à faire sur de grandes superficies, La reproduction automatique des séquences de traitement est de surcroît possible (Mering et Oulehri, 1994).

La Morphologie Mathématique (MM) a été utilisée pour cartographier les barkhanes du Cap Juby et leurs évolutions spatio-temporelles (Mering et Oulehri, 1994), elle a été également utilisée pour cartographier les ensembles dunaires à partir d'images de 10 m de résolution spatiale, elle a permis d'y lever les contraintes liées à la difficulté de mener des missions sur le terrain ainsi que celles dues aux caractéristiques radiométriques du milieu qui rendent difficiles la photo-interprétation visuelle (Callot et al., 1994 ; Drouot, 1994).

Enfin, des études ont été conduites pour déterminer la répartition spatiale de catégories de végétaux et de certains types de dunes (Jacqueminet et Mering, 1989), en plus des opérateurs sur les contours.

Les opérateurs de MM utilisés sont donc (Venard et al., 2009) :

- La reconstruction géodésique
- L'ouverture par reconstruction
- Le Chapeau Haut de Forme
- Divers opérateurs d'analyse morphologique des objets extraits.

Les données obtenues par ces traitements sont rassemblées dans un système permettant de croiser ces informations, les cartes thématiques d'analyse du paysage et des dynamiques de l'ensablement en sont dérivées, cette base de données, destinée à être complétée, sert de support à des recherches futures.

III.2.3.1 Réalisation d'une mosaïque à référence spatiale

La question du géoréférencement se pose alors afin de le réaliser dans les meilleures conditions possibles, chaque extrait enregistré contient cinq points d'amer, les coordonnées X et Y de chacun de ces points amers sont fournies par satellite en Lat/Long WGS 84, chaque extrait a au moins deux points amers communs avec les extraits qui l'encadrent.

Deux procédures sont alors possibles : réaliser d'abord une mosaïque avec les extraits, puis la géoréférencer, ou bien géoréférencer chaque extrait un à un avant d'en faire une mosaïque automatiquement grâce à la référence spatiale qu'ils intègrent, la première option est écartée car la projection, dans le satellite, des images sur une sphère entraîne un décalage systématique d'une capture d'écran à une autre.

Pour pallier à ce problème, il faudrait donc recalculer chaque image par rapport à celles qui l'encadrent, ce qui revient à faire deux fois la même opération (recalage des extraits relativement les uns par rapport aux autres, puis géoréférencement de la mosaïque), Dès lors, autant géoréférencer d'abord chaque capture d'écran séparément puis les assembler en mosaïque en se basant sur les informations spatiales contenues dans chaque image.

C'est donc cette démarche qui a été suivie, elle commence lorsque l'on insère un repère, une fenêtre s'ouvre où l'on peut renseigner le nom du repère, sa forme (on a choisi une croix incluse dans un carré) et où s'affichent les coordonnées qui s'actualisent en fonction de l'endroit sur l'écran où l'on positionne le repère.

La base de coordonnées ainsi obtenue est en Lat/long WGS84. Il faut ensuite convertir le fichier au format texte et utiliser l'outil ASCII coordinat conversion de ENVI™ pour obtenir un fichier avec les coordonnées dans le système voulu (en l'occurrence UTM Carthage).

On effectue alors l'opération de géoréférencement à l'aide de l'outil `ap/registration/Image to map` en précisant que l'arrière-plan doit être affecté de la valeur 255 (pour être blanc), puis on assemble les images en une seule mosaïque en utilisant l'outil `Basic tools/mosaicking/georeferenced`, en précisant que la procédure doit ignorer la valeur 255 au moment de l'assemblage, afin d'éviter les effets de bord entre les extraits.

Une correction radiométrique est ensuite appliquée à l'ensemble de la mosaïque. Cette procédure permet d'obtenir une image « propre », homogène et exploitable pour une photo-interprétation ou des traitements morphologiques, voire une classification, même si les incertitudes concernant les paramètres radiométriques des images de satellite rendent cette opération plus délicate à envisager.

La qualité du géoréférencement est le second critère qui intéresse ici puisque on veut mettre en place un système combinant des données provenant d'autres sources. Le géoréférencement est validé par comparaison avec les points relevés sur le terrain le long des pistes et des routes. Cette comparaison révèle que l'erreur de positionnement est de l'ordre de 5 m en longitude et 15 m en latitude. Ces derniers chiffres sont à mettre en rapport avec ceux obtenus lors de la vérification de la précision du GPS qui pourraient nuancer la critique du géoréférencement, puisque le GPS qui sert de référence n'est lui-même pas parfaitement précis.

Ces résultats montrent que la méthode suivie permet d'obtenir une information spatiale de qualité, compte tenu des incertitudes difficilement solvables qui accompagnent chaque étape de la procédure.

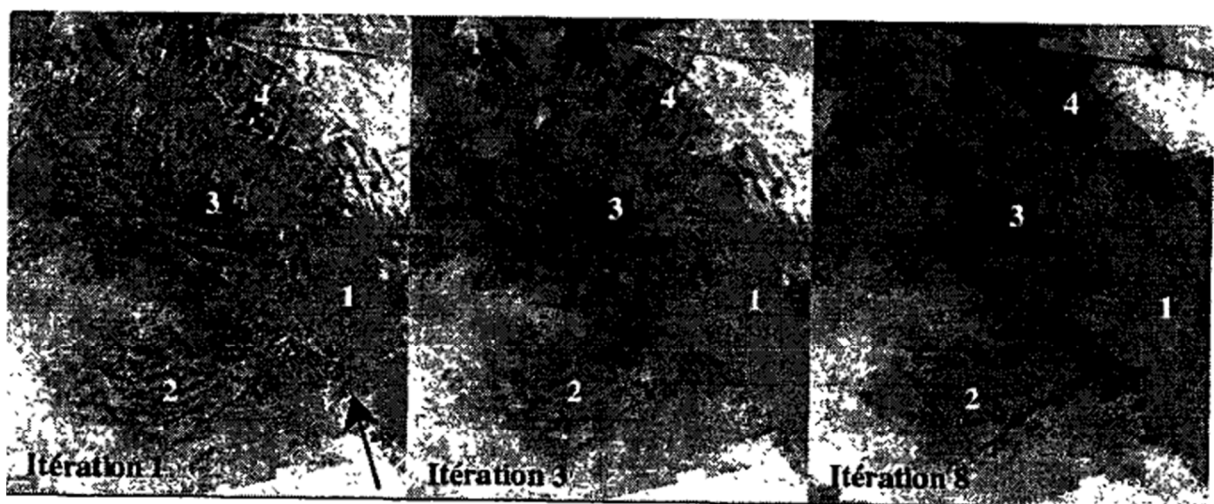


Figure III.3 Conséquences visuelles de l'utilisation de filtres morphologiques en fonction du nombre d'itérations. La flèche indique le nord géographique.

III.2.3.2 Traitements appliqués à la mosaïque

En mettant en forme les images du satellite, on obtient donc une mosaïque dont la résolution est de l'ordre de 1 m par pixel. Une telle résolution permet d'appréhender des objets, des formes et des contours indétectables dans des résolutions plus grossières, en conséquence, des traitements complémentaires à des traitements du signal sont possibles, ils vont permettre de poser les bases d'une interprétation quantitative des paramètres qui nous intéressent sur la zone.

A titre d'illustration on en présentent:

- une application des méthodes de la MM à l'extraction des formes d'ensablement des parcelles, les images ainsi obtenues sont ensuite intégrées au système afin de compiler les données qu'elles contiennent pour créer des cartes thématiques.[20]

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelque algorithme retenu pour l'étude de l'ensablement par la télédétection, l'une d'entre elles considère les petites formes éoliennes (PFE) comme des indicateurs des dynamiques du paysage dans un contexte de désertification. Surveiller l'évolution des paysages sur la base de tels indicateurs n'est pas simple, et enfin une méthode vise à extraire des images, à réaliser une mosaïque couvrant la zone de travail et à introduire des informations de géoréférencement ont été mises au point.

Chapitre IV

Résultats et Perspectives

IV.1 Introduction

L'étude géomorphologique des déserts est souvent limitée par l'absence de cartographie à une assez grande échelle et les difficultés, voire les impossibilités de travailler sur le terrain. Dans ce contexte, l'approche par les images aériennes (aéroportées ou spatiales) des secteurs les plus isolés des grands déserts comme le Sahara est la seule possible.

La photo-interprétation "classique", utilisée depuis longtemps pour l'étude des dunes (Clos Arceduc, 1969, Mainguet & Callot, 1978) présente le défaut de n'être pas quantifiable et de nécessiter un lever à la main des formes, le but recherché était donc, pour s'affranchir de la phase "manuelle" de la photo-interprétation, de réaliser par télédétection la cartographie d'une série d'objets géomorphologiques.

IV.2 Présentation de la zone

La région choisie pour notre étude est la partie Grand Erg Occidental, dans le Sahara Algérien, autour de 31°45' N et 2°40' E (Figure IV.1), à laquelle une image NOAA-AVHRR (2011) est utilisée.

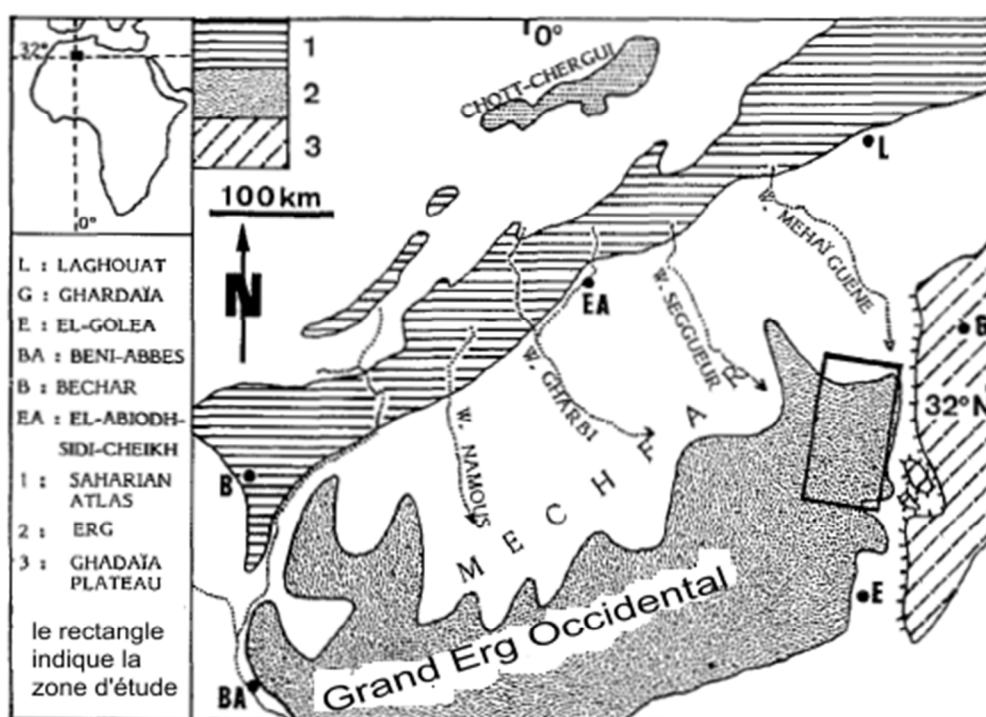


Figure IV.1 Cartes de localisation.

La région est caractérisée par une morphologie dunaire bien contrastée où quatre types de formes dunaires peuvent être distingués (Figures IV.2 et Figure IV.3):

1. De grandes formes dunaires, endômes souvent allongées et alignées, à sables grossiers, qui constituent la masse principale de l'Erg (A sur la Figure IV.3).
2. Des formes dunaires vives à sables fins (Seifs), de petites dimensions, très serrées et elles

forment un akle (groupement de dunes jointives d'aspect réticule (B sur la Figure IV.3), lorsque la fourniture de sable devient trop abondante au sommet des dômes, il se forme des ghourds. Dans la plupart des cas l'akle est superposé aux grandes formes dunaires.

3. Des feidjs, couloirs inter-dunaires où la couverture de sables grossiers est épaisse (plusieurs dizaines de mètres (C sur la Figure IV.3) et continue, correspondent à des aires de déflation.

4. Des chaudrons (D sur la Figure IV.3), dépressions fermées creusées dans les secteurs de déflation maximale dans la couverture sableuse des feidjs.

Les différentes échelles spatiales de ces phénomènes permettent de réduire la morphologie de l'Erg en deux types de formes: l'ensemble « dômes couverts de l'aklé » d'une part et l'ensemble « feidjs percés de chaudrons ». Cette dualité de formes est le résultat de la stabilité remarquable des domaines d'action éolienne dans la région, les dômes correspondent à des zones d'accumulation éolienne dont la situation est restée inchangée depuis au moins le pléistocène supérieur.

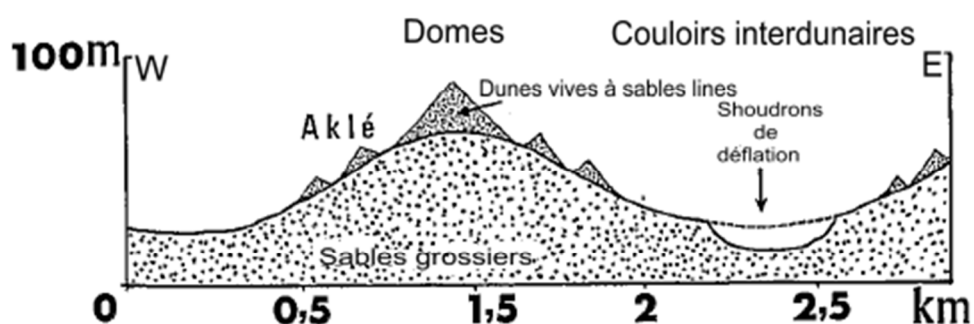


Figure IV.2 Coupe transversale des formes dunaires du Grand Erg Occidental.

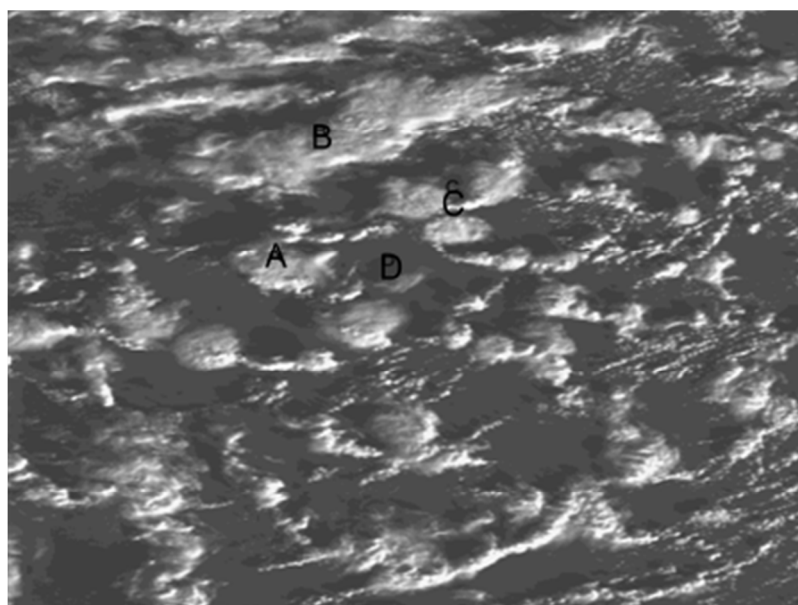


Figure IV.3 Extraite de l'image NOAA-AVHRR et des exemples des types existants de formes.

IV.3 Cartographie par l'analyse morphologique

IV.3.1 photo-interprétation et cartographie

L'homogénéité du substrat donne un rôle prépondérant à la géométrie des formes par rapport à la réponse radiométrique des objets, quel que soit le type de capteur utilisé.

L'étude passe donc nécessairement par une analyse des formes. Classiquement, dans ce cas, on utilise la photo-interprétation pour identifier et extraire les formes recherchées. La photo-interprétation fondée sur la perception visuelle d'objets sur un document analogique issu d'une prise de vue aériale, procède comme toute analyse visuelle d'un effort de structuration de l'image. Comme l'ont montré de nombreux travaux dans le domaine de la psychologie cognitive et plus précisément ceux qui se réfèrent à la théorie de la Gestalt (Köhler, 1964), cette structuration est dépendante à la fois de l'objet observé et du sujet observateur qui analyse l'image en fonction de ses connaissances et de ses buts.

En photo-interprétation, cette structuration est le résultat d'une opération visuelle et d'une interprétation transcrite manuellement sous une forme graphique qui est le plus souvent une carte. En analyse d'image numérique, cette structuration peut être assimilée à une transformation progressive des intensités de gris, pour que l'on puisse parler d'interprétation, le résultat de cette transformation doit se présenter sous forme d'une image binaire. Les entités d'une telle image devraient correspondre aux entités dont le photo-interprète a dessiné les contours.

Une telle transformation opère à la fois par simplification de la texture et par simplification des contours. Lors de la simplification de la texture, les détails jugés non significatifs sont gommés au profit d'une teinte de gris globale. L'image des pixels s'organise ainsi en régions au niveau de gris homogène, le seuillage permet d'extraire "une catégorie d'objets" sous forme d'une image binaire dont on peut à nouveau simplifier les contours.

Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes numériques permettant d'exécuter les fonctions de simplification et d'extraction à partir d'images à niveaux de gris, il s'agit entre autres de méthodes de segmentation, de lissage, de seuillage. Néanmoins les méthodes de la Morphologie Mathématique (Serra, 1982) nous paraissent plus particulièrement adaptées à notre étude, en effet, ces méthodes permettent à l'opérateur de structurer progressivement l'image selon les critères morphologiques qu'il juge pertinents.

Notre objectif est de délimiter à partir d'une image en teinte de gris, des entités de forme thématiquement significatives. Cette approche peut être assimilée à une "photo-interprétation assistée par ordinateur". [21]

IV.4 Principes des transformations morphologiques

IV.4.1 Transformations morphologiques sur des images binaires

Les transformations morphologiques sont généralement nécessaires à la deuxième étape de traitement d'image satellitaire: l'image numérique qui est analysé est une image binaire résultant, par exemple, du seuillage d'une image en niveaux de gris, en utilisant plusieurs images en niveaux de gris comme une classification multi-spectrale, l'ensemble ainsi définie sur l'image correspond soit à une valeur de seuil ou à une classe.

Les transformations sur un tel ensemble permettent de modifier la structure d'origine en vue de simplifier, en particulier, le lissage des contours. Le résultat de ces transformations dépend des propriétés géométriques (convexité, anisotropie) de la forme élémentaire dans laquelle l'ensemble original est comparé.

L'ensemble des points de l'image dont la valeur est 1 est notée X . In[MM], la définition d'un ensemble est basé sur la théorie des ensembles, l'analyse morphologique de l'ensemble X de l'espace euclidien R^2 est obtenu au moyen de la transformation notée Ψ .

Afin d'éviter la confusion possible entre des termes identiques dans la géomorphologie et la Morphologie Mathématique, nous avons choisi la terminologie suivante: La morphologie est toujours utilisée dans le cadre de la Morphologie Mathématique (MM abréviation dans le texte).

$$\begin{array}{ccc} & \xrightarrow{R^2 R^2} & \\ X & \longrightarrow & \Psi(X) \end{array} \quad \text{Eq. IV.1}$$

Ces transformations opèrent à l'aide d'un élément structurant de géométrie simple tels que: le cercle, le segment, l'hexagone, l'élément structurant B est déplacé de telle sorte que son centre x occupe toutes les positions dans l'espace euclidien, pour chaque position, on vérifie si B et X satisfont un certain type de relation d'ensemble, cette relation est exprimée en termes d'union, intersection ou l'inclusion, le résultat de cette vérification peut être soit positive ou négative : par exemple, pour effectuer une érosion, on vérifie, pour chaque point x de l'espace, si B centrées en x , est inclus dans X , l'ensemble de ces points x de l'espace dans la relation est satisfaite et forme une nouvelle ensemble $\Psi(X)$.

L'ensemble érodée X , notée $E^B X$, a une superficie inférieure à X , mais conserve la même structure (voir les Figures IV.4 (b) et (c)). Il est dit anti-extensif. (Une transformation Y est appelé anti-extensif lorsque $Y(X)$ est inclus dans X); de même, pour effectuer une

dilatation, on vérifie, lorsque B est centré en x, si l'intersection entre B et X est pas vide, alors l'ensemble dilaté de X (voir les Figures IV.4 (d) et (e)), notée $D^B X$, a une superficie plus grande que X, mais conserve la même structure, il est dit approfondie A (la transformation Y est appelé étendue lorsque X est inclus dans Y ($X \subset Y$)), dans les deux cas, les contours de l'ensemble résultant $\Psi(X)$ sont plus réguliers que ceux de l'ensemble X, l'érosion a éliminé les petites entités déconnectées alors que la dilatation a relié à la plus proche des grands, et rempli les plus petits trous ; les deux transformations peuvent être réitérées une infinité de fois ; à la dernière itération de l'érosion, aucun pixel sur l'image ne reste tandis que la dernière étape de la dilatation remplit toute l'image.

De l'érosion et la dilatation, d'autres transformations sont définis, le X_B ouverture, et l' X^B fermeture comme suit:

$$\begin{aligned} X_B &= D^B(E\check{B}X) \\ X^B &= E^B(D\check{B}X) \end{aligned} \quad \text{Eq IV.2}$$

$\bar{B}$ est l'élément de transposition de B par rapport à son origine. (L'élément identique à $\bar{B}$, si B possède un centre de symétrie qui est pris pour son origine), ces deux transformations sont plus aigus que les précédentes, comme l'érosion, l'ouverture est une transformation anti-extensive, (il peut être prouvé que X_B est inclus dans X) et comme la dilatation, la fermeture est une transformation considérable. (Il peut être prouvé que X est inclus dans X^B), mais à l'opposé des premières transformations, les derniers sont tout deux idempotente (la transformation Y est appelée idempotente lorsque $Y(Y(X)) = Y(X)$).

L'ensemble ouvert X_B est réglé, est plus régulier, moins riche en détails, et moins élargie que l'installation initiale X, l'ouverture a lissé les contours des composantes connexes, en coupant les canaux étroites, supprimant les petites îles et les caps étroites (voir les Figures IV.4 (f) et (g)).

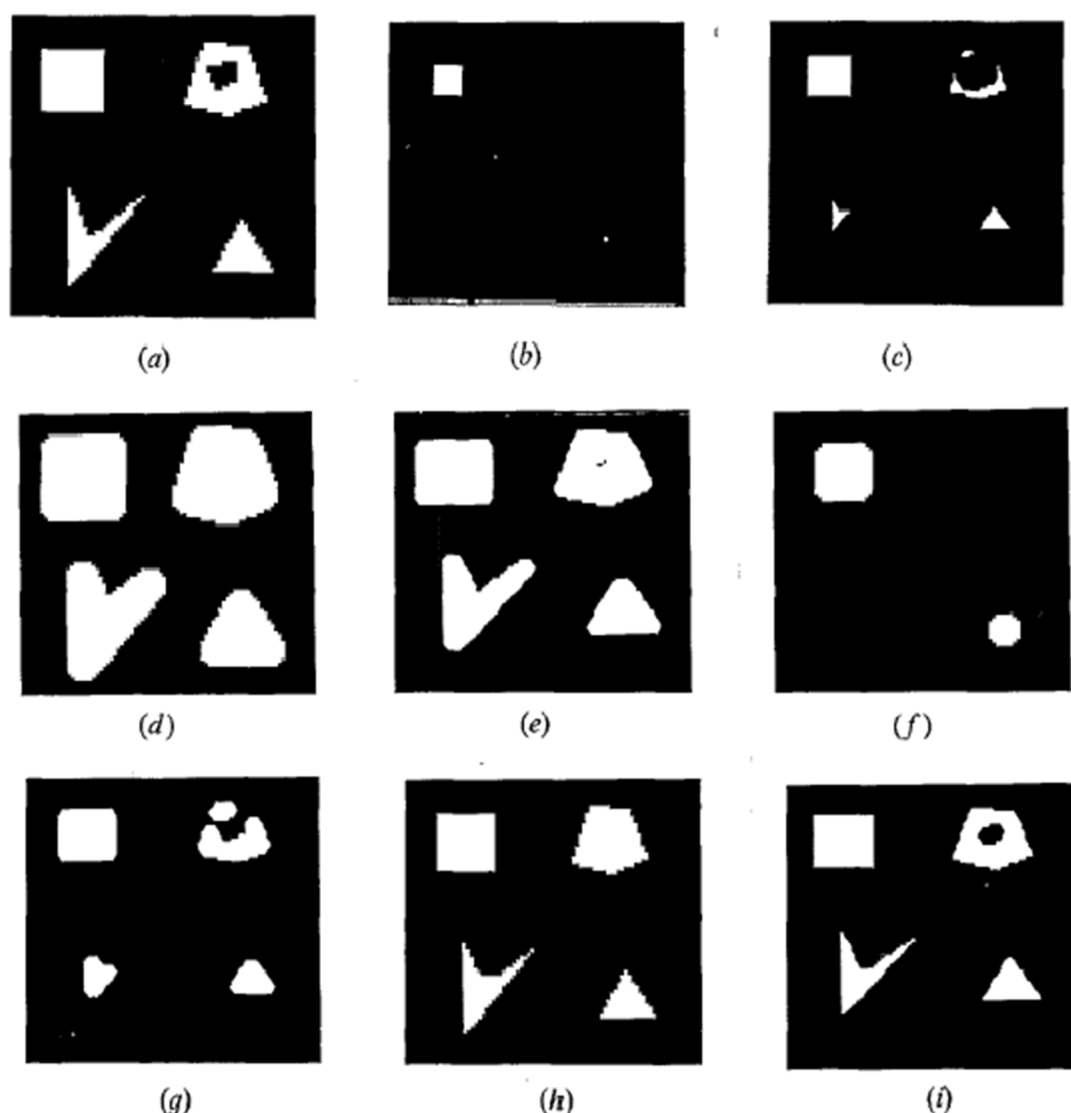


Figure IV.4 Des exemples de transformations morphologiques de base sur des carrées et des grilles hexagonales, (a) Des ensembles originaux, (b) Erosion de taille 2 par un octogone sur la grille carrée, (c) Erosion de taille 2 par un hexagone sur la grille hexagonale, (d) Dilatation de taille 2 par un octogone grille carrée, (e) Dilatation de taille 2 par un hexagone sur la grille hexagonale, (f) Ouverture de la taille 2 par un octogone sur la grille carrée, (g) Ouverture de taille 2 par un hexagone sur hexagonale la grille, (h) Clôture de la taille 2 par un octogone sur la grille carrée. (i) Clôture de taille 2 par une hexagone sur la grille hexagonale.

La fermeture est une transformation considérable, (il peut être prouvé que X est inclus dans X^B), l'ensemble fermé X^B est plus régulier et moins riche en détails que l'ensemble initial alors qu'il est plus élargi, la fermeture lisse aussi les contours en remplissant les canaux étroits, ce qui élimine les petits trous et les golfes étroits (voir les Figures IV.4 (h) et (i)).

Ces deux dernières transformations permettent de structurer l'image en simplifiant les contours des objets mais sans modifier de façon importante leur géométrie ni leur taille. Cependant dans certains cas, il s'agit simplement de nettoyer un ensemble, c'est à dire d'éliminer les petites composantes connexes tout en préservant intégralement les contours des plus grandes composantes connexes, ce que ne réalise pas l'ouverture. On utilise alors pour cela une procédure dite de reconstruction dont le principe est le suivant : après avoir éliminé les petites composantes de l'ensemble X de départ par une érosion à l'aide d'un élément structurant convexe $B(n)$ de taille n convenable, c'est-à-dire permettant d'éliminer la plus grande des petites composantes, on dilate l'ensemble Y restant (appelé ensemble marqueur) à l'aide de B puis on effectue l'intersection ensembliste entre $D^B Y$ et X et on recommence l'opération jusqu'à ce que l'image ne bouge plus : il s'agit en effet d'une transformation idempotente. L'organigramme de la reconstruction est le suivant la Figure IV.5 :

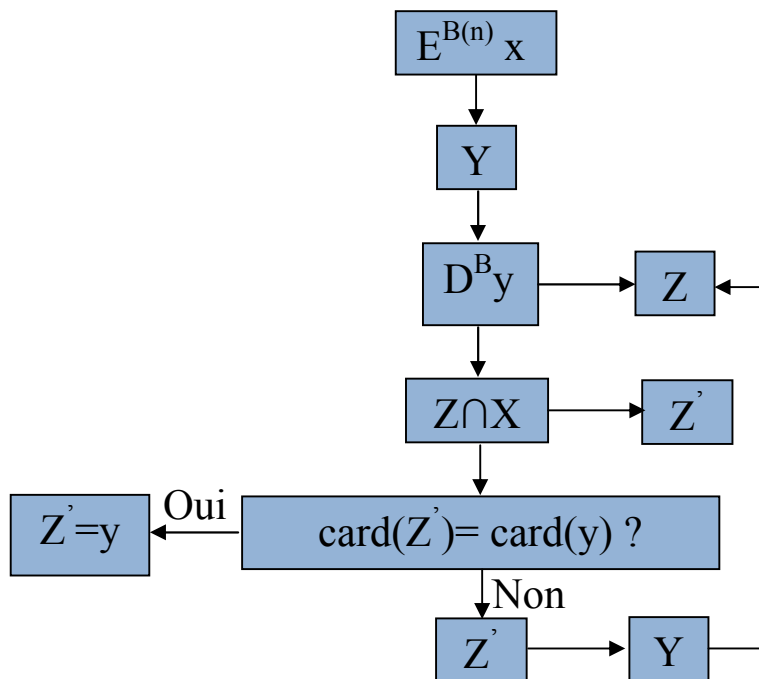


Figure IV.5 L'organigramme de reconstruction

Cette procédure est également utilisée, comme nous le verrons plus loin, pour boucher les trous d'une certaine taille qui peuvent exister à l'intérieur des entités connexes d'un ensemble X , il suffit pour cela de l'appliquer à l'ensemble complémentaire X^C . [20]

IV.4.2 Éléments structurants sur des grilles carrées et hexagonales

Pour la pratique des transformations morphologiques sur des images numériques, la définition des éléments structurants est reliée avec le mode de numérisation: de la grille hexagonale, l'hexagone est l'élément le plus simple de structuration convexe en mesure d'être construit (Figure IV.6 (a)), tandis que de la grille carrée, le carré ou l'octogone peut être choisi comme éléments structurants convexes (Figure IV.6 (b)).



Figure IV.6 Hexagonales (a) octogonale (b) éléments structurants de taille conçue une respectivement de la grille hexagonale et carrée.

Selon la grille numérique et l'élément convexe structuration, le résultat d'une transformation donnée peut-être sensiblement différent, comme on peut le voir sur la Figure IV.4. Comme les images de télédétection sont à l'origine organisées selon une grille carrée, nous avons utilisé cette grille pour le traitement des images NOAA-AVHRR, les images ont été recalculées selon une grille hexagonale seulement pour les études détaillées (Figure IV.8) et pour l'estimation des alignements de dôme.

IV.4.3 Transformations sur des images numériques

Les transformations présentées jusqu'ici sont définies dans R^2 et non dans Z^2 . En effet, la grille numérique des images n'est pas prise en compte dans la définition des transformations mentionnées ci-dessus, cependant, il est parfois nécessaire de recourir à un appareil photo numérique pour la représentation de l'image, par exemple quand nous voulons définir les transformations homotopies à partir d'images numériques, qui ont la propriété de préserver la connectivité des éléments ainsi que le nombre de trous dans chacun d'entre eux. Considérant que les transformations définies ci-dessus ne sont pas homotopies, il est légitime de s'attendre à partir du squelette d'un ensemble qu'il possède une telle propriété. Toutefois, la définition du squelette par une ouverture définie dans R^2 transposé à Z^2 n'est pas homotopies, il est alors

nécessaire de trouver des transformations appropriées pour la représentation d'une image dans Z^2 , qui est basée sur une trame de points, puis, à chaque point, les transformations sont définies selon une configuration donnée, noté V , des points sur la trame. Cette configuration de voisinage V peut être considérée comme un élément structurant qui permet de définir par des transformations en Z^2 . Le voisin- capot de configuration en V peut être défini par trois valeurs: 0, 1 et, par exemple, une valeur symbolique, comme x . Les deux premières valeurs définissent à la fois que la configuration soit testée sur l'image numérique, la troisième valeur indique que le pixel correspondant de voisinage de l'image n'a pas à être testé. Soit X un ensemble transformée par V , Son HMT est écrit:

$$X \otimes V = \begin{cases} 1 & \text{if } V_x \in V \\ 0 & \text{if } V_x \notin V \end{cases} \quad \text{EqIV.3}$$

Ces transformations fonctionnent comme suit: lorsque la configuration du voisinage des valeurs 0 et 1 sur l'image numérique binaire est la même que les touches correspondantes sur V , le pixel central est mis à la valeur 1, si ce n'est pas le cas, il est mis à la valeur 0.

L'étamage est défini à partir d'une transformation utilisant une configuration en V comme suit:

$$X \circ V = X / (X \otimes V) \quad \text{EqIV.4}$$

L'étamage fonctionne comme suit: lorsque la configuration de voisinage des valeurs sur l'image numérique binaire est la même que celle correspondante sur V , le pixel central est mis à la valeur 0, sinon la valeur d'origine demeure ; l'étamage, comme son nom l'indique, permet de réduire la surface d'un ensemble numérique.

Le choix d'un quartier commode V permet d'effectuer un étamage qui est homotopie, une configuration qui permet d'obtenir un squelette homotopie avec une trame hexagonale, cette configuration de voisinage, notée $L6$, est ce qui suit:

$$\begin{array}{ccccc} & & 0 & & x \\ & & & & \\ 0 & & & 1 & & 1 \\ & & x & & 1 \end{array}$$

où le symbole x signifie que la valeur de cet élément particulier du voisinage configuration n'est pas à prendre en considération pour l'opération de transformation. Si les étamages successives sont réalisés par 60^0 de rotation de ce quartier jusqu'à convergence de la procédure, une forme interne est obtenue avec une largeur d'un pixel qui préserve les connectivités et les trous de la structure initiale et qui est appelée un squelette homotopie. Comme nous le verrons dans la suite, ce squelette permet d'étudier les orientations de la résultante des ensembles.

IV.4.4 Les Filtres morphologiques sur les images en niveaux de gris

La Morphologie Mathématique peut être nécessaire pour atteindre la première étape du teint de gris de l'image de la structuration, qui est le lissage de la texture à teintes de gris ; une autre utilisation de MM sur les niveaux de gris des images est le filtrage morphologique qui est la mise en valeur de certaines structures sombres ou claires de la morphologie donnée.

Les définitions des transformations morphologiques sur les ensembles sont généralisées aux transformations sur des images à teint de gris en considérant qu'une image en niveaux de gris est définie par une fonction $f(x)$ dans R^2 , où $f(x)$ représente la valeur numérique, qui est le niveau de point x où chaque point est associé un élément structurant B , dans le domaine défini par B autour de x , $f(x)$ a une valeur supérieure et une valeur inférieure, pour obtenir la fonction érodée par l'élément structurant B , il suffit d'attribuer à chaque point du domaine de la valeur inférieure de $f(x)$ dans ce domaine, ce qui est écrit:

$$E^B f(x) = \inf \{f(u) : u \in B_x\} \quad \text{Eq IV.5}$$

De même, pour obtenir la fonction dilatée par l'élément structurant B , il suffit d'affecter à chaque point du domaine B , la valeur supérieure de $f(x)$ dans ce domaine:

$$D^B f(x) = \sup \{f(u) : u \in B_x\} \quad \text{Eq IV.6}$$

Pour simplifier l'illustration, considérons la fonction $f(x)$ teintes de gris (x) d'une image définie dans R^1 , où $f(x)$ est positif puisque $f(x)$ correspond à un niveau d'éclairage ; cette fonction peut être considérée comme appartenant à l'espace R^2 dans lequel chaque point serait défini par x et t . Ensuite, nous pouvons considérer le sous-graphe U , $f(x)$ définie par:

$$U_f = \{x, t : t \leq f(x)\} \quad \text{Eq IV.7}$$

Si le sous-graphe hors U_f est considéré comme un soulagement comme dans la Figure IV.7 (a), il peut être remarqué qu'une érosion réduit les pics et les vallées se creuse, alors que la dilatation épaisit les pics et remplit les vallées.

L'ouverture et la fermeture morphologique d'une fonction f sont définies de même, par analogie avec des transformations de consigne, nous pouvons définir l'ouverture d'une fonction f par une structuration élément B comme suit :

$$f_B(x) = D^B(E^B f(x)) \quad \text{EqIV.8}$$

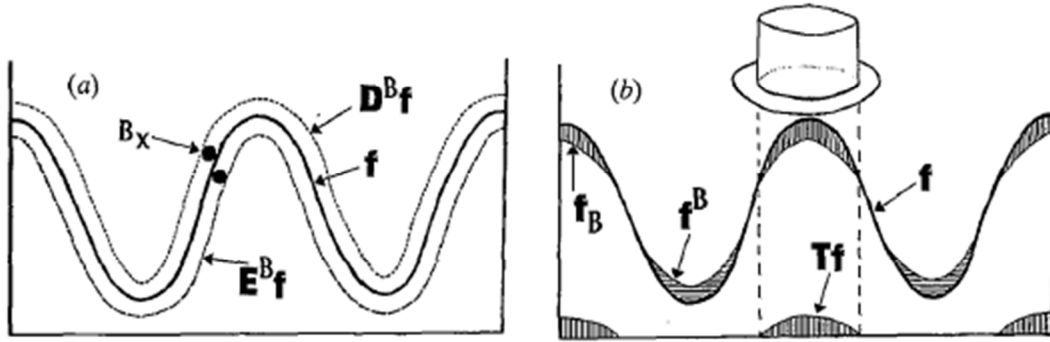


Figure IV.7 Transformations morphologiques d'une fonction. (a) de l'érosion et de dilatation, (b) Chapeau d'ouverture, de clôture et Haut.

De même, la fermeture de f^B d'une fonction f par un élément structurant B est définie comme suit:

$$f^B(x) = E^B(D^B f(x)) \quad \text{EqIV.9}$$

Ces transformations ne modifient que certains points d'une image en niveaux de gris: une ouverture érode les pics acérés et une fermeture remplit les vallées étroites du relief avec lequel sous-graphe U_f est identifié, comme on le voit sur la Figure IV.7 (b), les propriétés de ces transformations sont utilisées pour définir des filtres morphologiques tels que des chapeaux hauts ; ces filtres permettent d'extraire uniquement les pics à partir d'une image en niveau de gris (les petits éléments légers), ou seulement dans les vallées (les petits éléments sombres), ainsi en calculant la différence entre l'image initiale et son ouverture par un nB élément structurant, les pics dont l'épaisseur est inférieure à n sont extraites (voir la Figure IV.7 (b)). Cela peut être exprimé comme suit:

$$Tf(x) = f(x) - f_{nB}(x) \quad \text{EqIV.10}$$

De même, pour extraire les vallées dont l'épaisseur est inférieure à n , il suffit de calculer l'expression suivante :

$$Tf(x) = f^{nB}(x) - f(x) \quad \text{EqIV.11}$$

IV.5 Cartographie des formes éolienne

IV.5.1 Méthodologie

Les images NOAA-AVHRR de l'Erg sont constituées d'ensembles, souvent allongés, à texture différente: les dômes recouverts d'akles sont contrastés et clairs, leur aspect très hétérogène est dû à la présence d'oppositions ombre-lumière dans les petites dunes vives. Ils sont séparés par les aires de déflation, ensembles de forme similaire, à texture homogène et de teinte plus sombre (Figure IV.3). Notre démarche visant à individualiser chacun de ces deux ensembles, nous avons utilisé la grande différence texturale existant entre les aires d'akles correspondant aux dômes et les aires de déflation correspondant aux couloirs inter-dunaires.

La définition des dômes passant par celle des akles les recouvrant, nous a conduit à privilégier les images NOAA-AVHRR car leur résolution spatiale ($10 \times 10\text{m}$) est la seule à permettre de détecter les seifs pris individuellement.

Ces traitements passent par deux phases: la première est une homogénéisation des teintes de gris des aires que l'on cherche à distinguer; un seuillage des niveaux de gris permet une première segmentation grossière de l'image correspondant aux deux ensembles "dômes" et "aires de déflation"; la seconde consiste à préciser les contours des ensembles sur l'image binaire obtenue par seuillage.

Ces traitements s'effectuent par des séquences de transformations morphologiques en teinte de gris pour réaliser la première phase et binaires pour réaliser la seconde. Une séquence est une suite d'au moins deux transformations morphologiques visant à déterminer un ensemble ou une mesure sur un ensemble, Une séquence simple, comme une reconstruction, peut être intégrée à une séquence plus complexe. Une séquence peut parfois être entièrement

automatisée. Dans le cas présent, elle ne l'est pas totalement: une seule des opérations, le seuillage des images en teintes de gris a été effectuée par l'opérateur.

Avec l'utilisation du logiciel PCSATWIN développé au laboratoire LAAR pour réaliser les séquences de la cartographie automatique, le résultat final est une carte des aires de dunes vives et des aires de déflation. La déflation correspondant aux couloirs inter-dunaires, on obtient une cartographie des édifices dunaires de l'Erg, avec d'une part les grands dômes, souvent alignés et leurs akles, et d'autre part les couloirs inter-dunaires et les chaudrons qui les occupent.

IV.5.2 Transformations morphologiques pour l'extraction des aires de déflation

Les zones de déflation sont déduites de la délimitation des zones claires qui correspondent aux dunes vives, parce que les zones de déflation forment un ensemble complémentaire à l'égard des dunes vives fixées. Ce résultat est obtenu en lissant les textures des régions Aklé dans les zones claires, sans modifier l'homogénéité des aires sombres de déflation, de telle sorte que le même niveau de gris est associé à l'ensemble pertinent.

Toutes les transformations utilisent un élément structurant octogonale qui, autant que possible, ne favorise aucune orientation particulière, et qui ne requiert pas de modifier la grille carrée d'origine des images satellitaires.

Le niveau de gris des bords des seifs face au soleil est très élevé, leur détection est alors possible au moyen d'un chapeau haut (Figure IV.8 (b)) à partir d'une ouverture de taille 1, de ce traitement, on obtient seulement les bords Aklé sous la forme de zones rayées, où les zones restantes sombres correspondent à la part d'ombre des dunes et des petites zones de sable entre les seifs, comme les zones inter-dunaires sombres sont tout à fait étroites, ils peuvent être éliminés en les recouvrant avec un marqueur qui envahit la zone de dunes après une dilatation de la taille 2 (figure IV.8 (c)).

Les teintes de gris sont alors suffisamment homogènes et différenciées pour permettre la délimitation des deux ensembles souhaités, puisque nous avons maintenant une image binaire. Un seuillage avec une limite supérieure est choisi dans le but d'obtenir une image binaire qui correspond approximativement à l'ensemble de zones de dégonflage (qui apparaissent en blanc) qui est le complément de l'ensemble des zones de dune définies par le traitement précédent.

Résultats et Perspectives

Le seuillage a été réglé à une valeur de gris de 9 qui donne des surfaces (Figure IV.8 (d)) dont la surface est comparable à celle des zones de déflation définie par l'observation directe sur l'image NOAA-AVHRR originale.

L'ensemble résultant est plus grand que les zones observées sur le sol, une séquence de morphologie binaire a été conçue pour éliminer la dispersion de petites entités isolées, car ils ne doivent pas être identifiés avec des zones de déflation, mais avec des petites zones interdunaires dans les zones Aklé.

Nous devons d'abord éliminer les ensembles isolés dont le rayon est inférieur à 3 pixels par la reconstruction (Figure IV8 (e)) à partir d'un marqueur obtenue par l'érosion de la taille de 2 ensemble précédent, le résultat de la reconstruction préserve uniquement les grandes zones connectées.

Une reconstruction est une transformation beaucoup moins sévère qu'une ouverture, car elle préserve les contours initiaux des ensembles, tandis que les suppresssing des petites entités qui sont déconnectées des ensembles principaux, les petits trous qui restent à l'intérieur des grandes zones sont éliminés par une reconstruction de l'ensemble complémentaire qui a été appliquée une érosion de taille 2.

L'image finale (Figure IV.8(f)) correspond à l'ensemble souhaité des zones de dégonflage, la (Figure IV.3) présente la scène originale et la cartographie qui correspond, en fonction de la séquence représentée dans le Tableau IV.2.[22]

La séquence	Rôle
Ouverture de taille 1 Haut chapeau Dilatation de taille 2	Détection des : - Seifs -Aklés
Binarisation par seuil à 9 Erosions de taille 2 Reconstruction	Détermination des zones de déflations
Complémentation Erosions de taille 2 Reconstruction Complémentation	Remplissage des couloirs

Tableau IV.2 Séquence de la cartographie des zones de déflation.

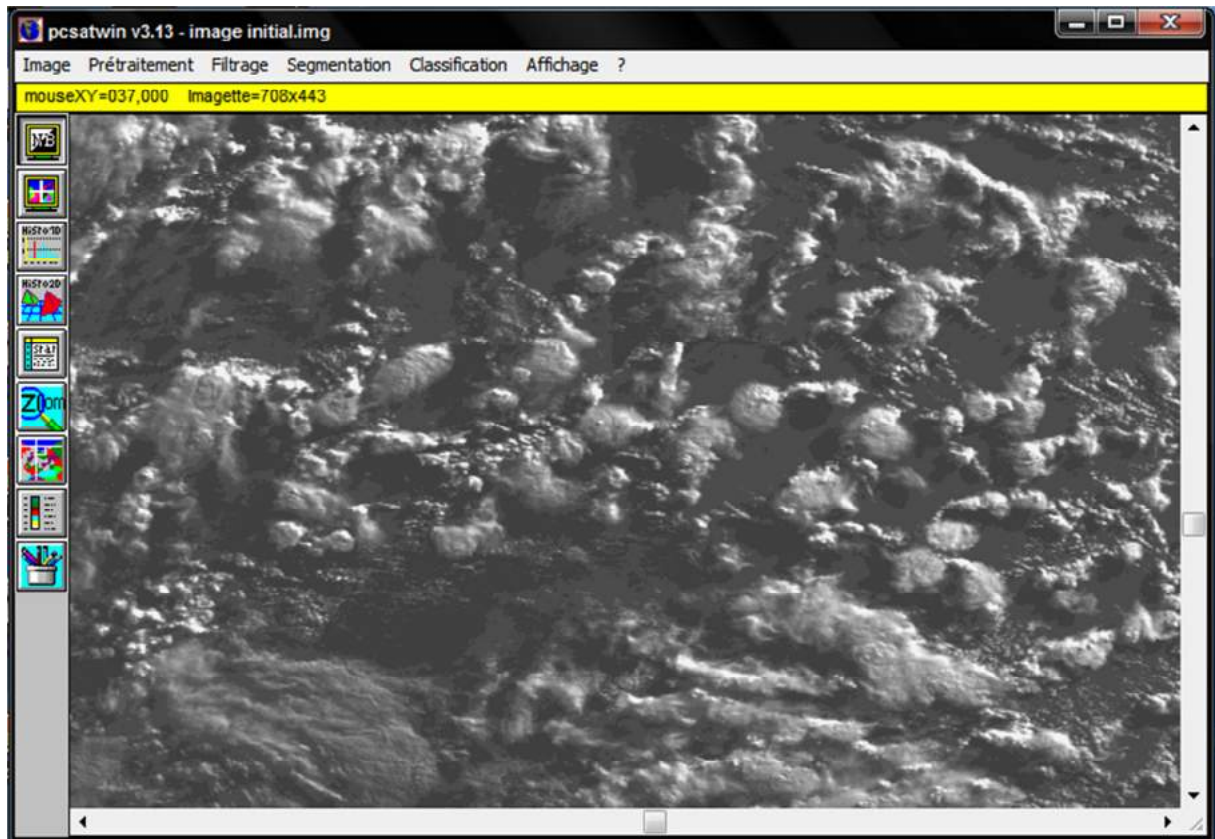


Figure IV.8 (a) : Image Initial de (10*10m).

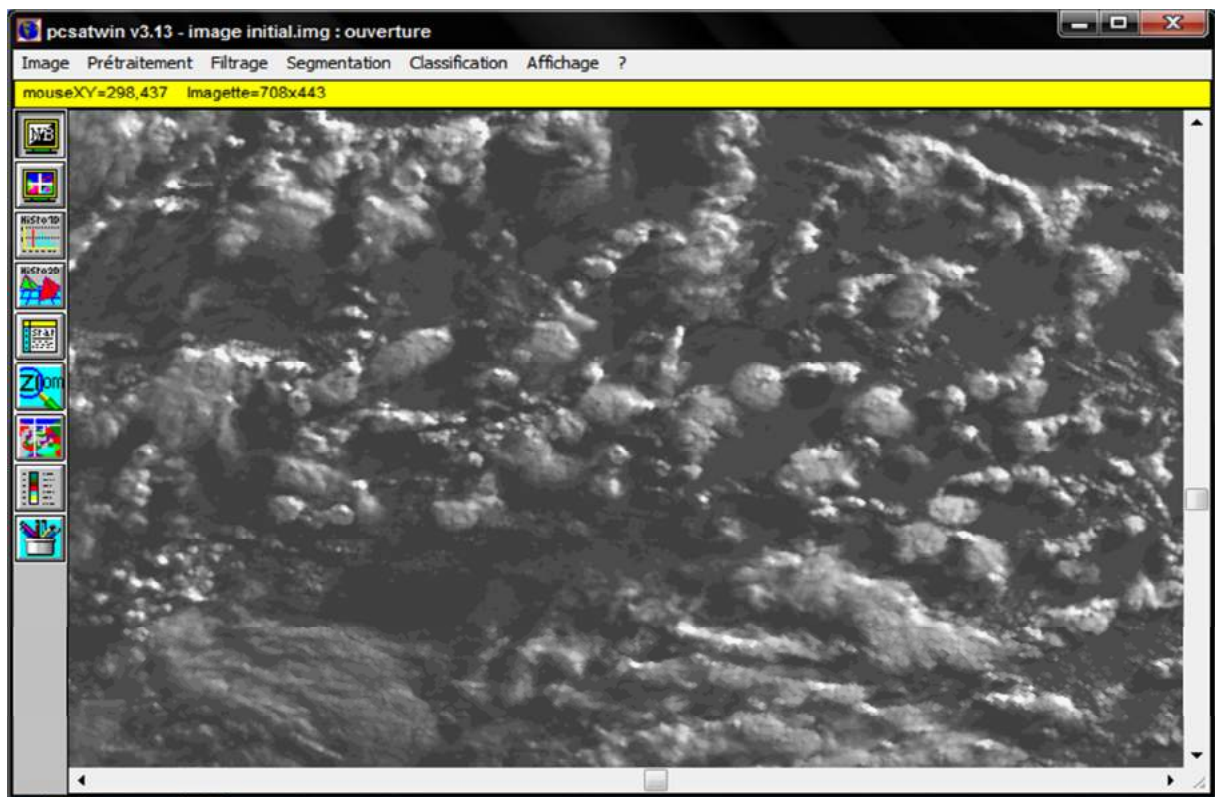


Figure IV.8 (b) : Chapeau Haut de forme.

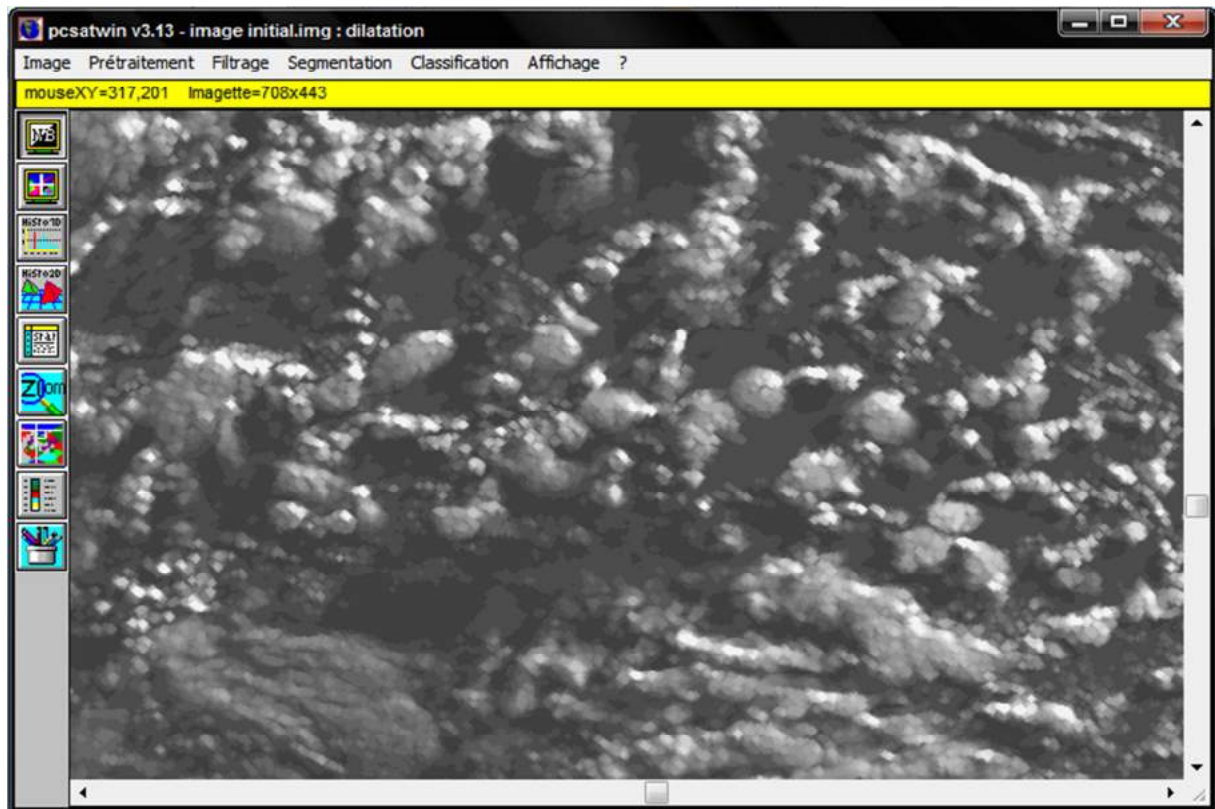


Figure IV.8 (c) : Délitiation de taille 2.

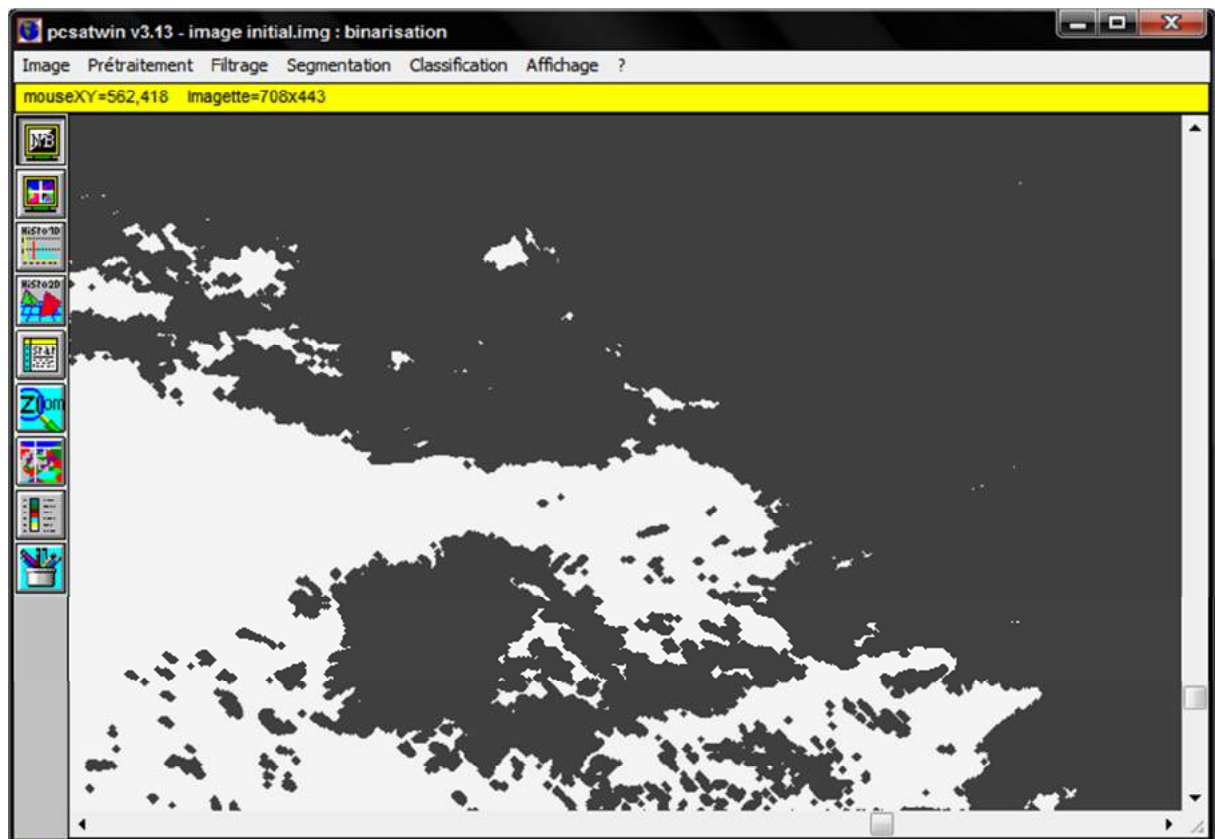


Figure IV.8 : (d) Seuillage fixé à 9.

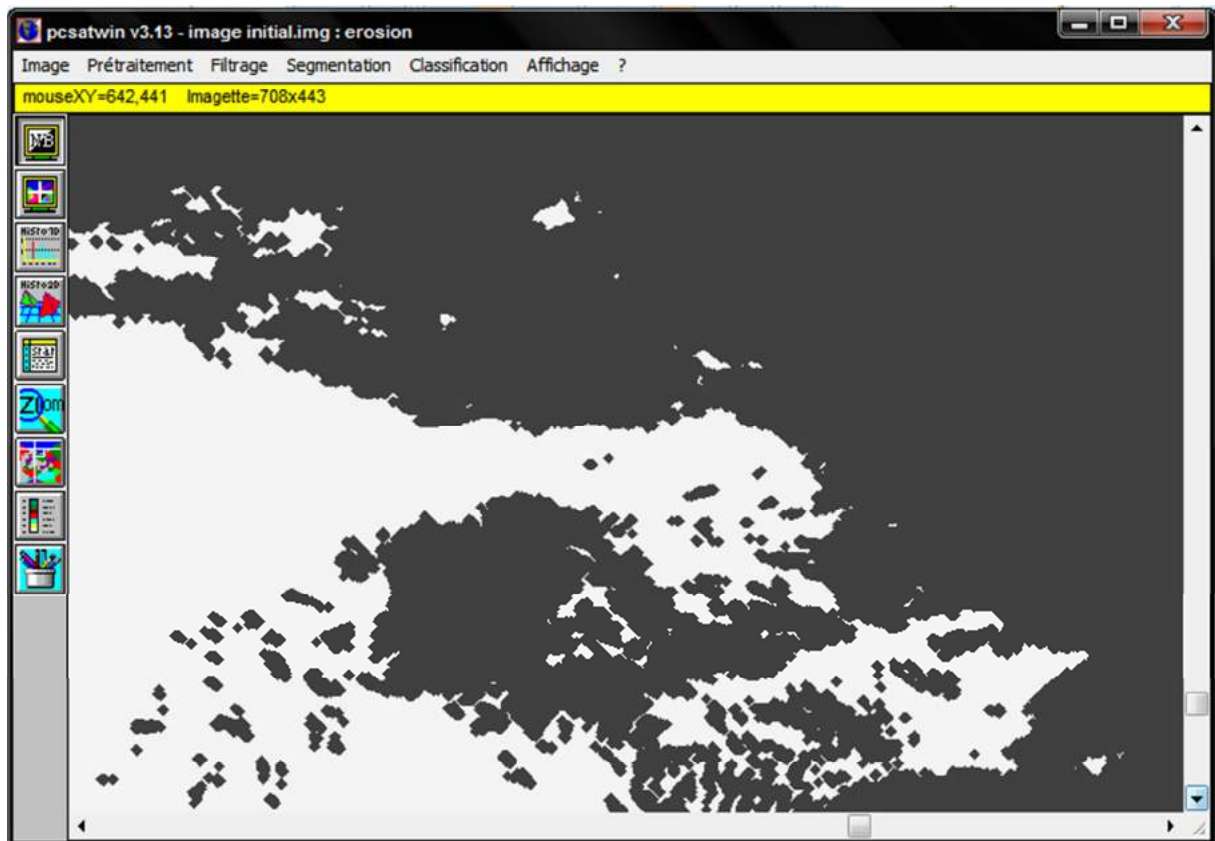


Figure IV.8 : (e) Reconstruction



Figure IV.8(f) :Image final après la détermination des petites couloirs.

IV.6 Validation de la cartographie automatisée

Dans la cartographie des formes basées sur l'analyse morphologique, il n'existe pas une méthode de validation standard qui peut être utilisée pour le procédé de classification multi-spectrale, dans ce dernier cas, les matrices de confusion sont produites, ce qui indique un nombre de pixels à tort ou à raison classées dans des zones de petites éprouvettes.

La petite dimension des zones est légitime pour la classification des états de surface, dans le cas de la cartographie des formes, la validation concerne toutes les formes, et doit donc considérer une partie de l'image qui contient suffisamment de formulaires d'être représentant, c'est la raison pour laquelle nous utilisons une méthode de validation qui compare la carte produite par le calcul à celle produite par la photo-interprétation faite par une seule personne. Chaque type de cartographie est associé à un ensemble de l'espace euclidien et la validation est en appui sur la mesure de la symétrie Y, différence entre les deux ensembles X et X' où:

$$Y = (X \cup X') / (X \cap X') \quad \text{Eq IV.12}$$

Ici, la mesure de l'ensemble Y doit être minimisée.

La cartographie des zones de déflation a été effectuée manuellement par le zonage d'une image NOAA-AVHRR et s'appuie sur deux zones tests de 900x750 pixels (9 x 7,5 km), le premier correspond à une zone de la structure complexe où les aklésprédominent ERG 1, le second correspond à une structure plus simple où les zones de déflation sont plus élargi ERG 2.

La différencesymétrique entre photo-interprétation et cartographie automatique correspond à une représentation spatiale de l'erreur de la cartographie automatique des aires de déflation par rapport à la cartographie par photo-interprétation des mêmes objets:

5% de la surface totale a été pris en photo-interprétation et non par cartographie automatique, 3% de la surface totale a été pris en compte comme aire de déflation par cartographie automatique et non par photo-interprétation sur cette zone, l'erreur relative est donc de 8%. [22]

ERG	Y ₁ (%)	Y ₂ (%)	Total erreur (%)
ERG 1	9	2	11
ERG 2	5	3	8

Tableau IV.3 la validation quantifié.

IV.7 Orientation des formes éoliennes

Une seconde séquence a été conçue afin d'étudier les orientations des dômes de sable qui sont organisées dans des directions plus ou moins triangulaires, la séquence a été ajustée dans le quart nord de l'image NOAA-AVHRR acquise en 2011. Parce que l'étude des directions ne nécessite pas de connaître les détails de la structure à l'intérieur des dômes, l'image est incrémentée 8 fois par échantillonnage direct, un lissage par la valeur moyenne ne peut pas être utilisé parce qu'il réduit le contraste entre les valeurs extrêmes à teintes de gris, l'échantillonnage direct élimine les structures allongées des Aklés, qui sont remplacées par une texture en pointillées correspondant à la juxtaposition des pixels avec une réflectance élevée et un échantillonnage faible sur les côtés lumineux et ombragé des seifs.

Ensuite, l'image est calculée selon une grille hexagonale (Figure IV.9 (a)) et est traitée avec un élément structurant hexagonale, cette transformation est due à la nécessité d'utiliser un élément de structuration symétrique par rapport à son centre de manière à obtenir une configuration parfaitement isotrope pour étudier les directions.[22]

IV.8 Détection des zones de lumière

Les points les plus brillants sont sélectionnés par une transformation morphologique de teinte de gris qui utilise un chapeau supérieur (Figure IV. 9 (b)) à partir d'une ouverture de taille 1 ; le résultat est trop parsemée en raison de l'alternance rapide des pixels de faible réflectance des zones d'ombre des aklés et les pixels de réflectance élevés de leurs côtés éclairés.

Pour lisser l'effet du filtrage, une fermeture de taille 2 est appliquée (Figure IV.9 (c)). Les zones claires de l'image correspondent à peu près à l'ensemble de dômes, une binarisation avec un seuil égal à 11 produits des surfaces dont les zones correspondent à celles des dômes. Nous utilisons cette image comme une référence (Figure IV.9 (d)).

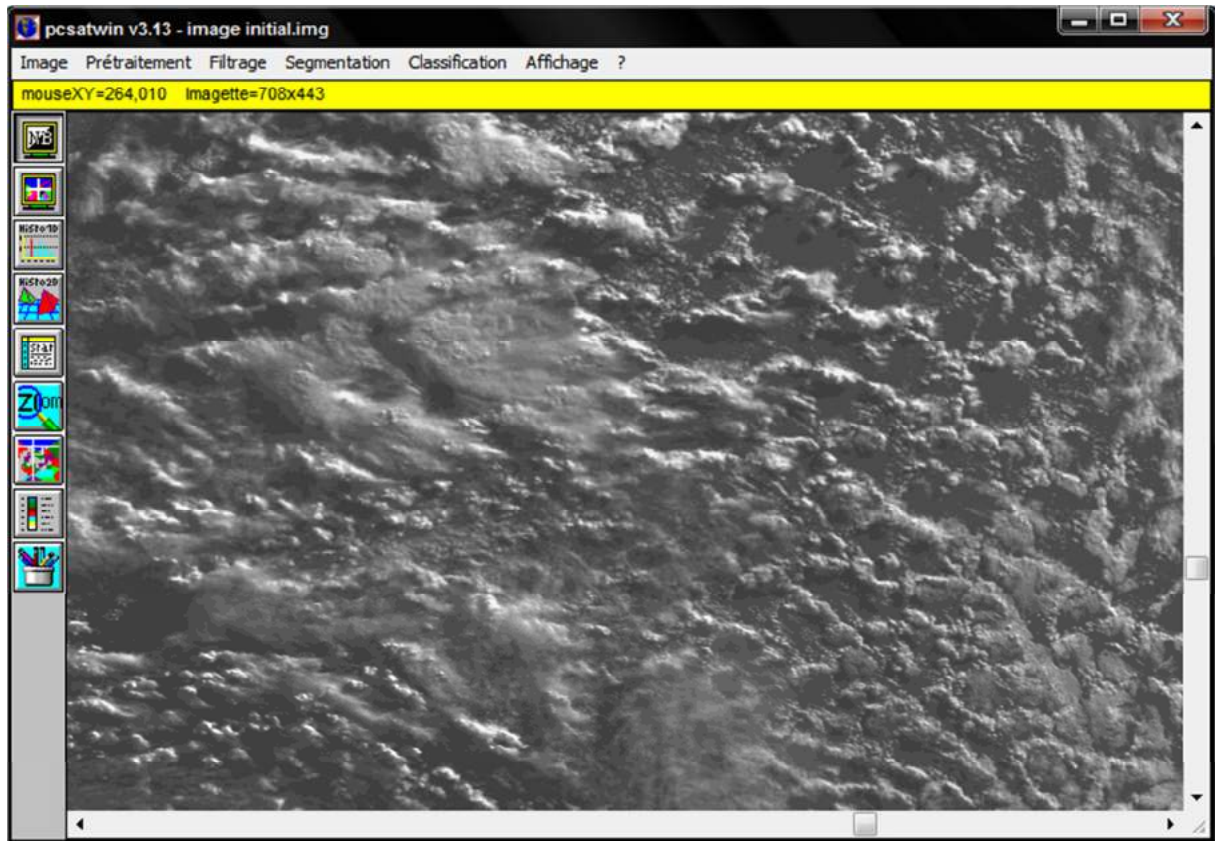


Figure IV.9 (a) : Image Initial (100*100m).

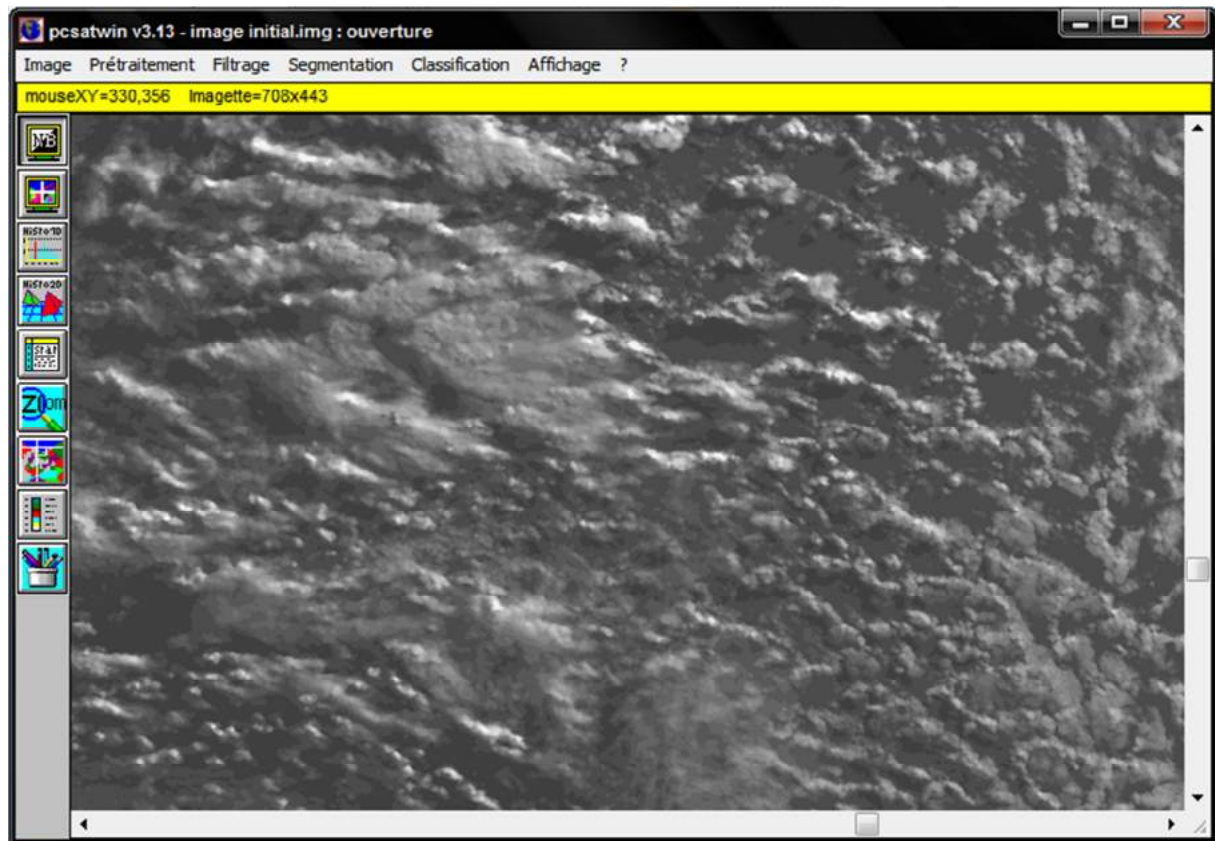


Figure IV.9 (b) : Chapeau haut de forme.

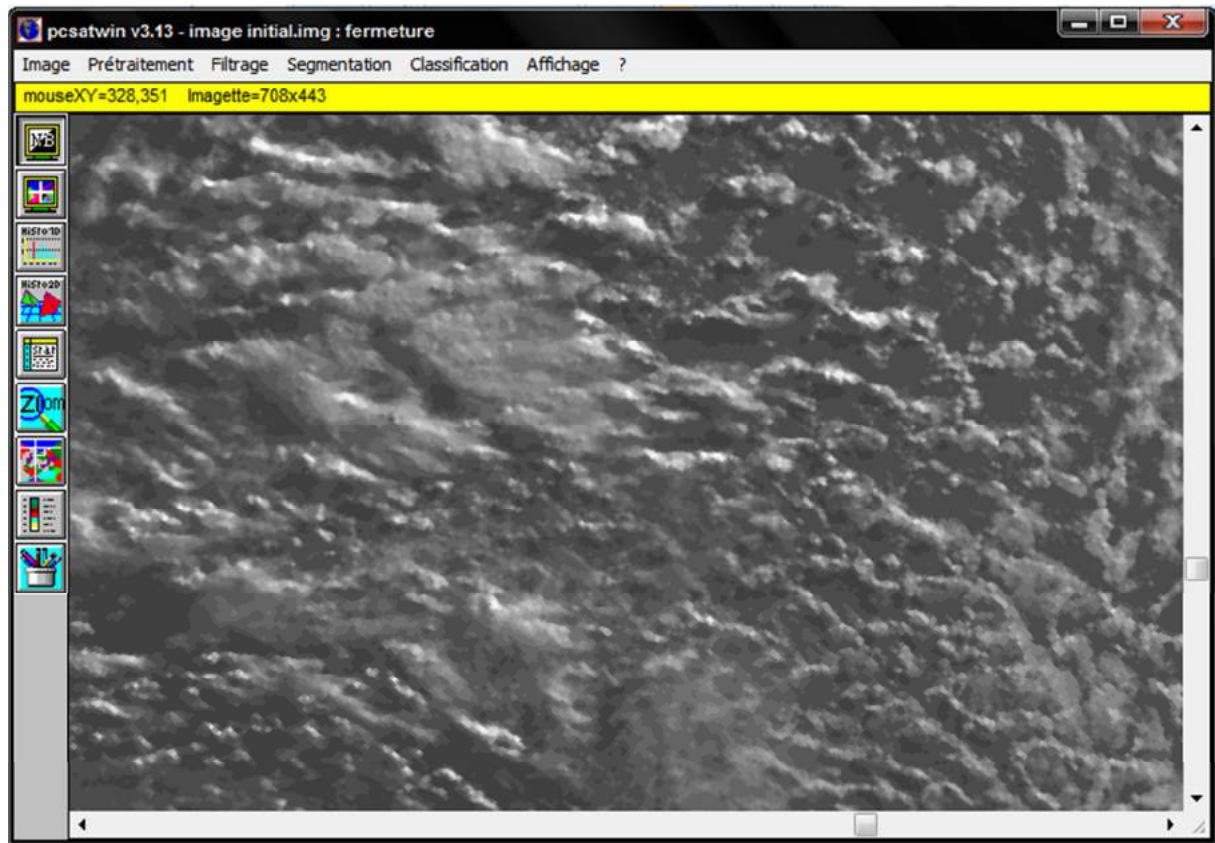


Figure IV.9 (c) : Fermeture de taille 2.

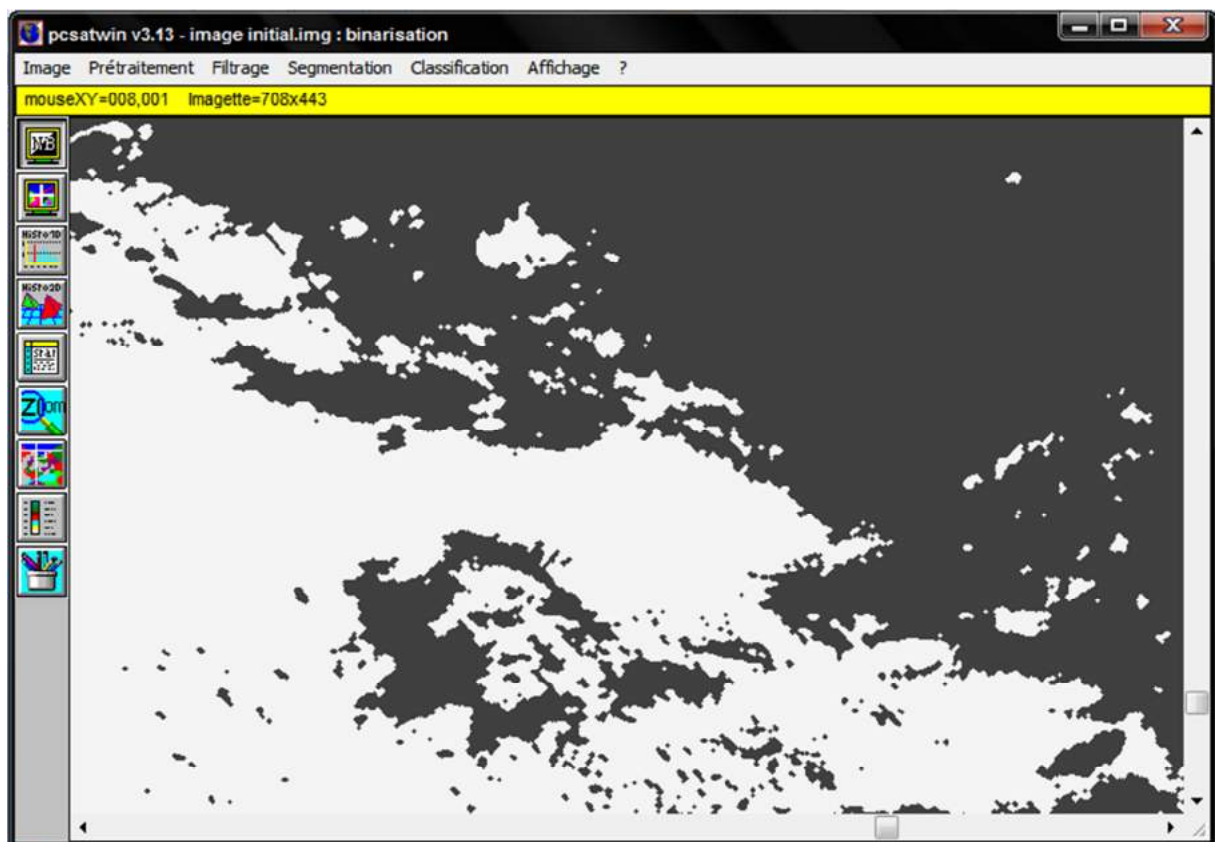


Figure IV.9 : (d) Seuillage fixé à 11.

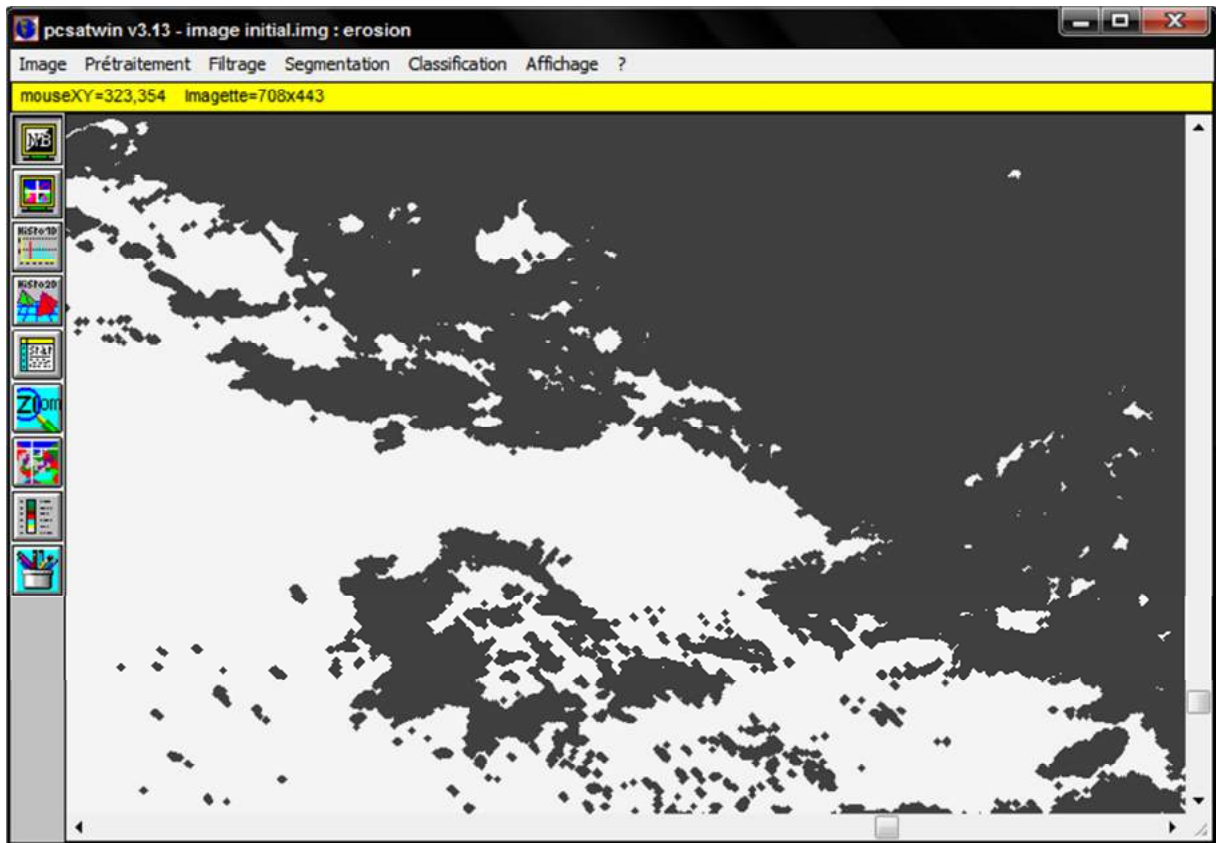


Figure IV.9 (e) : Eclaircies.



Figure IV.9 (f) : L'image finale après la reconstruction de l'ensemble complémentaire.

IV.9 Délimitation des ensembles de dômes

Une particularité de l'image numérisée est de contenir d'autres ensembles que les dômes:

- 1 - Les Seifs bordant les pentes septentrionales des chaudrons de déflation grandes forment de grands ensembles non connectés.
- 2 - Les limites des dômes sont reliées à Seifs qui pénètrent dans les zones de déflation, bien qu'ils ne soient pas très importants en termes de superficie, ils introduisent des directions secondaires divergentes qui peuvent fausser l'estimation des grandes orientations préférentielles.
- 3 - Dans le centre des zones de dôme, quelques zones sombres restent (trous) de petite taille qui correspondent à l'ombre des plus grands ghourds.

Trois types de procédures successives permettent l'élimination de chacun de ces ensembles, les ensembles isolés de petite taille sont éliminés par une reconstruction à l'aide de l'image binaire originale en tant que masque, et son érosion de taille 2 en tant que marqueur, une ouverture modifie trop les limites des ensembles de dômes pour être utilisés pour éliminer les ensembles connectés, une seuillage par l'intermédiaire d'un voisinage linéaire (Figure IV.10) est donc préféré, car il préserve la connectivité des ensembles et permet de contrôler l'orientation des éléments susceptibles d'être supprimés.

Les zones d'éclaircies sont parcourues dans toutes les directions de la grille hexagonale (0, 60, 120, 180, 240, 300) pour éliminer les configurations suivantes dans toutes les directions: les lignes de 3 pixels, angle lignes, les lignes de 2 pixels, des triangles et des pixels isolés. Le résultat des coupes d'éclaircie est reconstruit après une érosion de taille 2, qui supprime les petits ensembles isolés déconnectés des grandes entités de ce processus (Figure IV.9(e)).

L'élimination des zones d'ombre dans le centre des dômes ne pouvant être obtenu sont en fait des zones de déflation inclus dans des ensembles de dômes ; par conséquent, comme dans le cas des zones large , une reconstruction est appliquée à l'ensemble complémentaire au moyen de marqueur obtenu par une érosion de taille 2, une seconde implémentation donne l'image finale (Figure IV.9(f)). [23]

La séquence	Rôle
Ouverture de taille 1 Haut chapeau	Détection des : - Seifs - Zones
Fermeture de taille 2 Binarisation par seuil à 11	Détection des : dômes
Erosion de taille 2 Reconstruction	Elimination des petites entités isolées
Erosion de taille 2 Reconstruction	Régularisation des contours
Complémentation Erosions de taille 2 Reconstruction	Remplissage des couloirs

Tableau IV.4 Séquence de la cartographie des zones des dômes

IV.10 Estimation des orientations des alignements dômes

IV.10.1 Les méthodes d'estimation

Les grandes orientations sont estimées à partir des orientations locales dans un pays donné voisin-capot de pixels, le système de référence est anti-horaire: 0^0 correspond à l'Est, 90^0 à l'Est vers le nord, 180^0 à l'Ouest, et 270^0 au Sud. La procédure consiste à identifier chacune des douze directions données par le réseau hexagonal avec une série de configurations de voisinage. Par exemple, la direction 0^0 est identifiée par une série de cinq configurations (Figure IV.11).

Chaque direction est incrémentée selon la configuration trouvée sur l'image, nous obtenons finalement une rose des directions qui caractérise l'ensemble à l'étude, deux approches sont adoptées :

1 - Par analogie avec l'approche de photo-interprétation, on essaie de spécifier les directions des contours dans le cas des objets ayant une géométrie complexe qui ne présentent pas de direction préférentielle (objets sous-isotropes) - les directions visibles appartiennent à des alignements de contours-voisin articulé, les contours sont délimités par l'intermédiaire d'un gradient-morphologique qui consiste à calculer la différence entre la dilatation et l'ensemble érodés. À ce résultat est appliqué un squelette, afin de réduire l'épaisseur du contour à un

pixel, ce résultat est obtenu dans la (Figure IV.12 (a)) par un squelette homotope par amincissement.

2 - La seconde approche utilise les concepts et les outils de l'analyse de l'image automatisé, l'orientation d'un objet ne dépend plus de son contour, mais de l'orientation de son axe médian. Dans ce cas, le squelette homotope par amincissement est appliqué sur l'ensemble lui-même (Figure IV.12 (b)) et sa rose des directions calculées.[24]

IV.10.2 Orientations des dômes

La comparaison entre la rose des directions des contours (Figure IV.13 (a)) et des axes médians (Figure IV.13 (b)) montre que celle-ci met l'accent sur les directions dominantes, l'orientation principale des dômes, NNW-SSE, est évidente avec une valeur deux fois plus élevée que les directions les moins représentatives, tels que WNW-ESE.

Les autres orientations principales, EW et NNE-SSW, sont également nettement perceptible dans la rose des directions des contours, de l'ordre de la direction principale qui est préservée, mais les valeurs sont plus proches, car toutes les directions intermédiaires des contours sont prises en compte, même si il est possible de compenser l'inconvénient d'une modification de l'origine (en soustrayant 1000 des mesures de chaque direction, par exemple), il est préférable d'utiliser la rose des directions de la médiane des axes.[25]

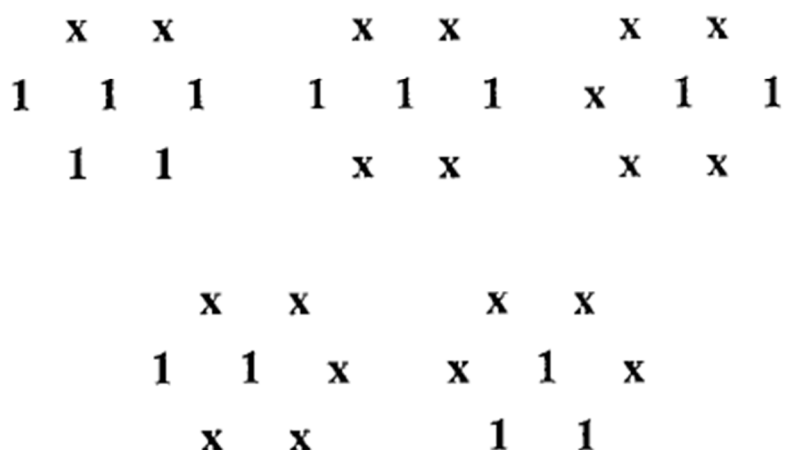


Figure IV.10 La configuration de voisinage utilisée par éclaircies.

	x	x		x	x		x	x
1	1	1	1	1	x	x	1	1
	x	x		x	x		x	1

	x	x		x	x
1	1	x	x	1	x
	x	x		x	x

Figure IV.11 La configuration de voisinage correspondant à la direction 0°.

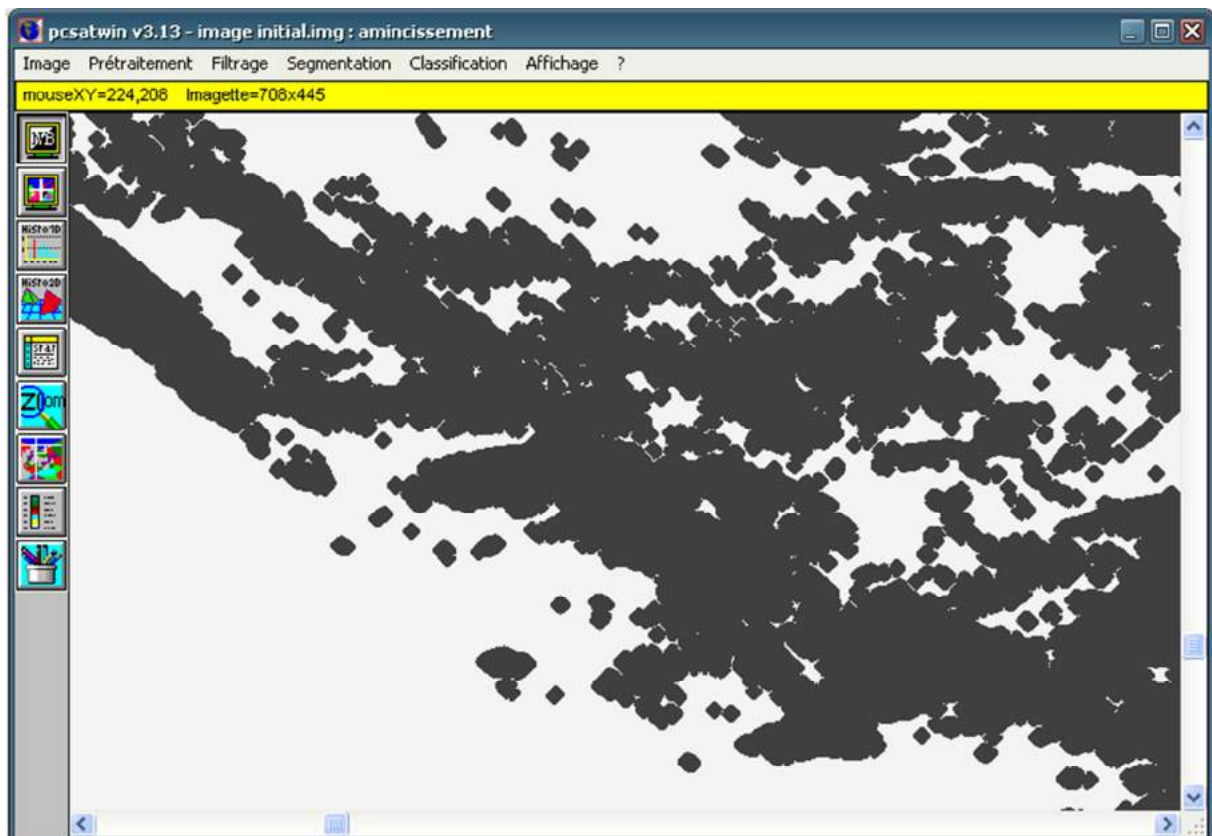


Figure IV.12 (a) Squelette des contours.

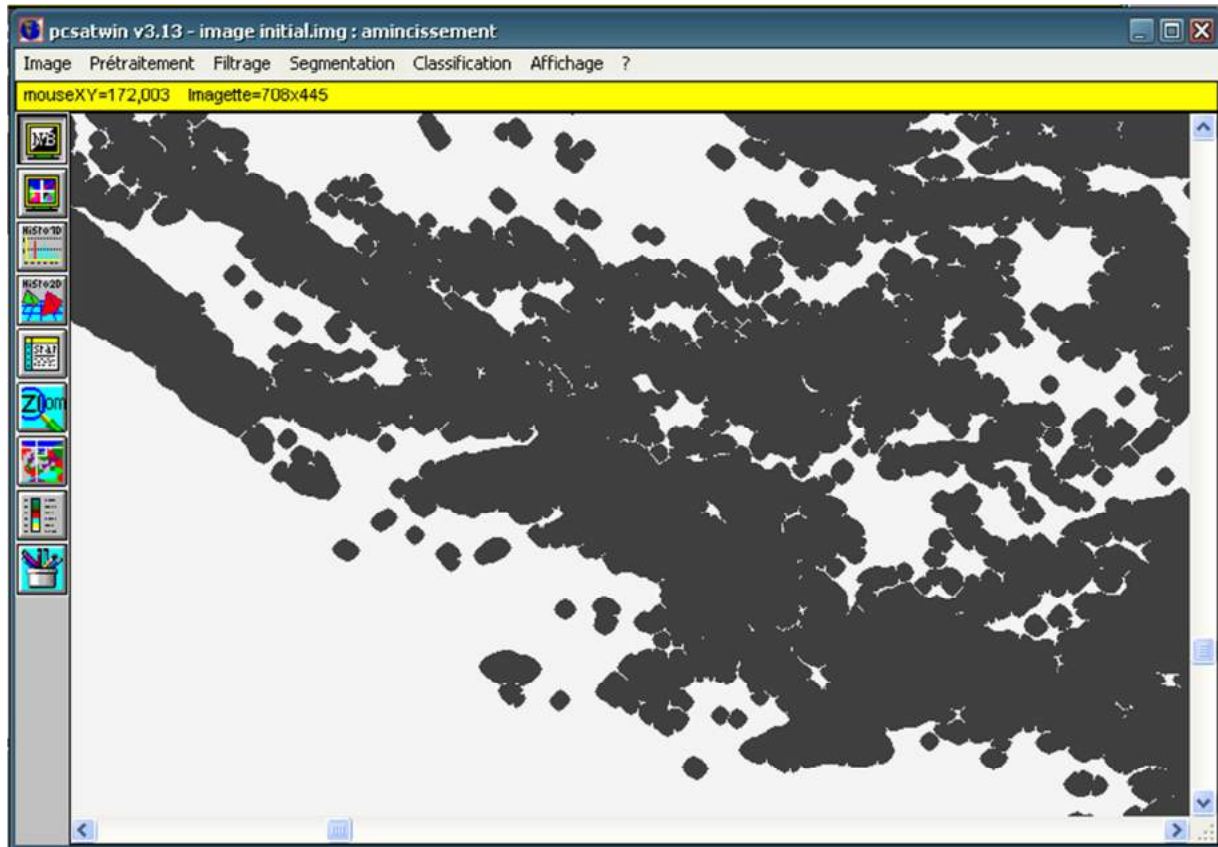


Figure IV.12 (b) Squelette de l'axe médian.

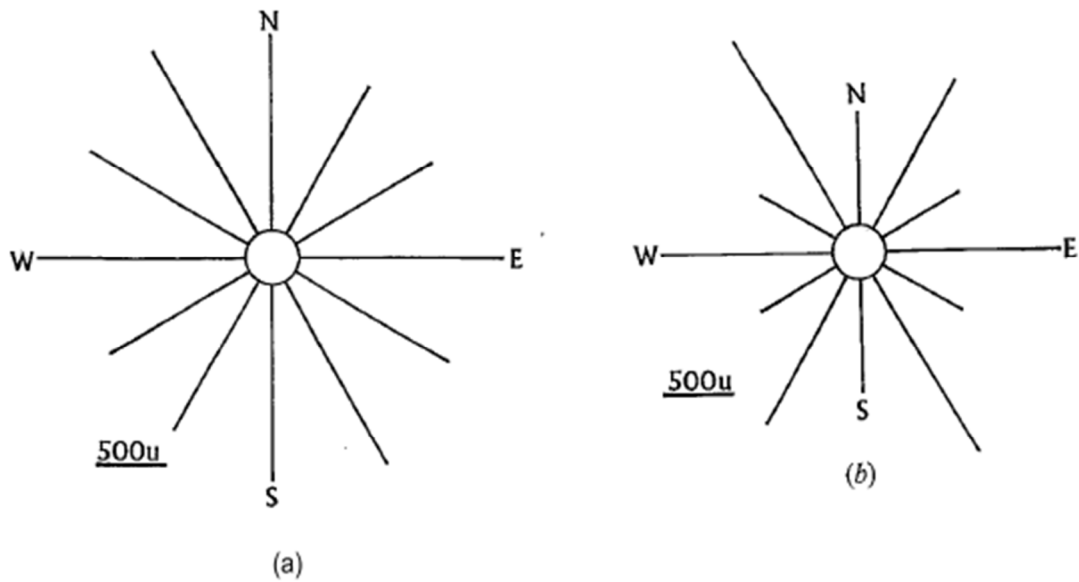


Figure IV.13 Roses de directions des dômes de sable. (a) des contours; (b) des axes médians.

IV.11 Conclusion

La Morphologie Mathématique appliquée à des images NOAA-AVHRR panchromatiques du Grand Erg Occidental se révèle être un outil approprié pour l'étude de ce genre d'environnement, avec un faible taux d'erreur, la méthode utilisée peut être généralisée aux autres ergs, les formes à arrêtes vives présentant une opposition nette entre versants éclairés et versants à l'ombre se trouvent dans la totalité des massifs dunaires où elles s'opposent aux formes arrondies spécifiques des sables grossiers ou fixes par la végétation, la séquence de transformations morphologiques présentée ici permet donc de distinguer les aires d'Aklés à sables fins très mobiles et immédiatement dangereux pour l'environnement, des aires plus stables moins dangereuses dans l'immédiat, mais susceptibles de se dégrader, dans des régions plus peuplées comme la frange sahélienne du Sahara, des études similaires à celle décrite ici auraient donc des applications pratiques pour l'aménagement de ces régions.

Conclusion générale

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 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.

La Morphologie Mathématique est une voie prometteuse dans la détection des aires où il y a eu des changements ou déplacement de matériaux 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 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'œuvres à construire et l'évaluation de leur efficacité à contrer l'avancée des sables sur des territoires fertiles.

Références Bibliographie

[1] : G.Rochon&F.Bonn.

« Précis de la télédétection », Québec

Presses de l'université du Québec,1992

[2] : Yves Baudot(Nadar)

« Le petit guide de la télédétection »

EODesk,belgian Science Policy,2004

[3] :TeilletP.M,Gauthier,RP,Chichagov,A.,etFedosejevs,G

« Toward Integrated Earth Sensing : Advanced Technologies for In Situ Sensing in the Context of Earth Observation»,JournalCanadien de la télédétection ,Décembre 2002

[4] : Tom Feehan

Chef de section, Opération des système au sol« La télédétection une vision intégrée de la planète le 24^e Symposium Canadien sur la télédétection,InternationalGeosciences and RemoteSensing Symposion ,2002

[5] Teillet ,P.ME.LeDrew,MStrome and F.Hegy(Eds)

« The Role of surface Observation s in Support of Remote Sensing » ;In Canadian Remote Sensing Contributions to Understanding Global Change,Department of Geography Publication Series ,No 38 University of Waterloo, Ontario,pp.333-351, Chapter 17, et pp 408-415 References,1995

[6] : Marc D'Iorio

Président , Société canadienne de la télédétection

« Journal Canadien de la télédétection »

(J C T),2000

[7] U.S. Geological Survey

Earth Ressources Observation and Science (EROS)

NOAA Satellite,2004

[8] NOAA Senor

Télédétection – INRIA, Mars 2001

[9] Les satellites NOAA/MSG

Météo France 1998

<http://www.satmos.fr>

[10] **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.

[11] **AUBERT G.; et MAIGNIEN R. 1948 :** « L'érosion éolienne dans le nord du Sénégal et du Soudan français ». In : Bulletin agricole du Congo Belge (Communication présentée à la conférence Africaine des sols, Goma, 1948), Congo belge, vol. XL, Fasc. 2, 1948, pp. 1309-1316.

[12] **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.

[13] **BENSAID A. 2001 :** Érosion éolienne en milieu aride en Algérie par télédétection. Liège, Belgique, Mémoire de DESS, p42 .

[14] **ABDELLAOUI, A. (2009)** Potentialité de l'imagerie satellitale moyenne résolution pour le suivi du transport de sable en milieu urbain pré-saharien", Séminaire International :

[15] **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.

[16] **BENALLA M. ; ALEM E. ; ROGNON P. ; DESJARDINS R. ; HILALI A. et KHARDI A. 2003 :** Les dunes du Tafilalet (Maroc) : dynamique éolienne et ensablement des palmeraies, sécheresse (Paris), vol. 14, no 2, pp.73-83.

[17] **BERGAMETTI G. 1997 :** "Zones arides et érosion éolienne". in : Les climats subtropicaux et leur évolution : de l'observation spatiale à la modélisation, Centre National d'Etudes Spatiales (CNRS), Toulouse, Éditions CÉPADUÈS, pp. 547-557.

[18] **BARDINET C. 1994 :** "Télédétection de l'aridité et de l'environnement en Afrique du Sahara au Sahel". Revue de géomorphologie dynamique, Paris, t. XLIII, no 1, pp. 09-22.

[19] **DESJARDINS, R., ROGNON, P., BENALLA, M., ALEM, E. (2005), JENSEN (1996)** Progrès importants des études sur l'évolution des dunes grâce à l'utilisation combinée des satellites civils et militaires : l'exemple du Tafilalet (Maroc), Sécheresse, Paris, vol. 16, no 3, pp. 153-164.

[20] **MAUPIN, P., LE QUÉRE, P., DESJARDINS, R., MOUCHOT, M.C., SAINT-ONGE, B. and SOLAIMAN, B. 1997.** Contribution of Mathematical Morphology and Fuzzy Logic to the Detection of Spatial Change in Urbanized Area: Towards a Greater Integration of Image and Geographical Information Systems, IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS '97), p. 207- 209 "Dynamiques des paysages et Télédétection", Tunis, 9-13 juin 2009.

[21] **DESJARDINS, R., ROGNON, P., BENALLA, M., ALEM, E. (2005),** Progrès importants des études sur l'évolution des dunes grâce à l'utilisation combinée des satellites civils et militaires : l'exemple du Tafilalet (Maroc), Sécheresse, Paris, vol. 16, no 3, pp. 153-164.

[22] CLOS-ARCEDUC A. 1969 Essai d'explication des formes dunaires sahariennes. Institut Geographique National, Paris, Etudes de photointerpretation,n04, 66p.

[23]DIDAY E. 1971 La Methode des NueeSDynamiques,Rev.Stat.Apll. 19(2): 19-34.

[24] ESCADAFAL R. 1981. Une methode nouvelle de description de la surface des sols dans les regions arides. Actes du 3eme Colloque de L' AIS,Traitement informatises des donnees de sol, (sols n05), pp 21-27.

[25]KHOLER W. 1964 Psychologie de la forme. Idees,Paris, pp 174-175.