

Année Universitaire : 2017-2018



Master Sciences et Techniques : Géoresources et Environnement

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

### Apport de l'imagerie spatiale à la quantification des mouvements des dunes de sable de Marzouga

Présenté par :

**EL-GUENNOUNI Nabil**

Encadré par :

Pr. TABYAOUI Hassan (FP- Taza) et Pr. Lahcen BENAABIDATE (FST-Fès)

Soutenu le 13 Juin 2018 devant le jury composé de :

- Pr. Fatima EL HAMMACHI
- Pr. Abderrahim LAHRACH
- Pr. Abdel-Ali CHAOUNI
- Pr. Lahcen BENAABIDATE
- Pr. Hassan TABYAOUI

Stage effectué à : Faculté Polydisciplinaire de Taza

## Remerciement

J'adresse mes vifs remerciements à **Mr. le Doyen de la FST**, ainsi que tout le personnel d'administration de la manière de mener leurs travaux administratifs de cet établissement d'enseignement.

J'exprime ma gratitude et mes remerciements particuliers à mon professeur encadrant **Mr TABYAOUI Hassan**, pour son encadrement pédagogique, pour ses orientations et ses conseils qu'il m'a apporté à la réalisation de ce travail.

Je profite de cette occasion pour remercier également mes professeurs composants le jury **Pr. Fatima EL HAMMACHI, Pr. Abderrahim LAHRACH, Pr. Abdel-Ali CHAOUNI, Pr. Lahcen BENAABIDATE**, d'avoir examiné ce travail.

Mes remerciements à tous mes professeurs de la FST qui n'ont ménagé aucun effort pour la réussite de cette formation.

Finalement je tiens à remercier du fond du cœur toutes les personnes qui, directement ou indirectement ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment.

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.....  | 9  |
| Figure 2 : Vue satellitaire, la localisation de Marzouga « l'erg Chebbi ».....                         | 10 |
| Figure 3 : Variations des Températures moyennes mensuelles et annuelles.....                           | 12 |
| Figure 4 : Variations des précipitations moyennes mensuelles et annuelles.....                         | 13 |
| Figure 5 : Diagramme Ombrothermique de la région d'Errachidia.....                                     | 13 |
| Figure 6 : Moyennes mensuelles des vitesses de vents enregistrées à Marzouga (2003-2016).....          | 14 |
| Figure 7 : La carte géologique de Tafilalt 1/200000, et localisation de Marzouga.....                  | 16 |
| Figure 8 : Carte géologique simplifiée de la région de Marzouga.....                                   | 17 |
| Figure 9 : Coupe géologique de la région de Marzouga.....  | 18 |
| Figure 10 : Localisation des différentes formes dunaires dans la région de Tafilalt.....               | 20 |
| Figure 11 : Les barkhanes.....   | 21 |
| Figure 12 : Les Aklés.....   | 22 |
| Figure 13 : Vue superficielle d'une Nebka.....   | 23 |
| Figure 14 : Dunes pyramidales.....   | 24 |
| Figure 15 : Les Sifs.....  | 25 |
| Figure 16 : Image QuickBird géo référenciée (date d'acquisition 2016).....                             | 29 |
| Figure 17 : (a, b, c, d, e, f, et g). Echantillon de chaque image traitée montrant quelques dunes..... | 30 |
| Figure 18 : Couche de dunes digitalisée à partir de l'image raster 2007.....                           | 31 |
| Figure 19 : (a, b, c, d, e, f, et g). structures dunaires digitalisées.....                            | 33 |
| Figure 20 : Variation des surfaces occupées par les dunes (2003-2016).....                             | 35 |
| Figure 21 : Pourcentage de surface occupée par le sable.....   | 35 |
| Figure 22 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 13-07-2003 et 30-03-2007.....   | 36 |
| Figure 23 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 16-08-2009 et 30-03-2007.....   | 37 |
| Figure 24 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 14-07-2011 et 16-08-2009.....   | 37 |
| Figure 25 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 23-09-2012 et 14-07-2011.....   | 38 |
| Figure 26 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 07-11-2013 et 23-09-2012.....   | 38 |
| Figure 27 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 12-02-2016 et 07-11-2013.....   | 39 |
| Figure 28 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 13-07-2003 et 30-03-2007.....           | 40 |
| Figure 29 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 13-07-2003 et 30-03-2007.....             | 41 |
| Figure 30 : Distance de déplacement des dunes de sables entre 30-03-2007 et 16-08-2009.....            | 41 |
| Figure 31 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 30-03-2007 et 16-08-2009.....             | 41 |
| Figure 32 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 16-08-2009 et 14-07-2011.....           | 42 |
| Figure 33 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 16-08-2009 et 14-07-2011.....             | 42 |
| Figure 34 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 14-07-2011 et 23-09-2012.....           | 42 |
| Figure 35 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 14-07-2011 et 23-09-2012.....             | 42 |
| Figure 36 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 23-09-2012 et 07-11-2013.....           | 43 |
| Figure 37 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 23-09-2012 et 07-11-2013.....           | 43 |
| Figure 38 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 07-11-2013 et 12-02-2016.....           | 43 |
| Figure 39 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 07-11-2013 et 12-02-2016.....             | 43 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Température moyenne mensuelles et annuelle .....  | 11 |
| Tableau 2 : Précipitation moyenne mensuelle et annuelle .....   | 12 |
| Tableau 3 : Caractéristiques et date d'acquisition des images Landsat.....                              | 28 |
| Tableau 4 : Résultats des calculs de surface pour chaque image .....                                    | 34 |
| Tableau 5 : Résultats de calcul des vitesses annuelles entre chaque deux images.....                    | 44 |
| Tableau 6 : Résultats des calculs de surface pour l'image 13-07-2003.....                               | 46 |
| Tableau 7 : Résultats des calculs de surface pour l'image 30-03-2007.....                               | 46 |
| Tableau 8 : Résultats des calculs de surface pour l'image 16-08-2009.....                               | 46 |
| Tableau 9 : Résultats des calculs de surface pour l'image 14-07-2011.....                               | 46 |
| Tableau 10 : Résultats des calculs de surface pour l'image 23-09-2012.....                              | 47 |
| Tableau 11 : Résultats des calculs de surface pour l'image 07-11-2013.....                              | 47 |
| Tableau 12 : Résultats des calculs de surface pour l'image 12-02-2016.....                              | 47 |
| Tableau 13 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 13-07-2003 et 30-03-2007 .... | 48 |
| Tableau 14 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 30-03-2007 et 16-08-2009 .... | 48 |
| Tableau 15 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 16-08-2009 et 14-07-2011 .... | 48 |
| Tableau 16 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 14-07-2011 et 23-09-2012 .... | 48 |
| Tableau 17 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 23-09-2012 et 07-11-2013 .... | 49 |
| Tableau 18 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 07-11-2013 et 12-02-2016 .... | 49 |

# Table des matières

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Remerciement.....       | 0 |
| Liste des figures.....  | 2 |
| Liste des tableaux..... | 3 |
| Introduction.....       | 6 |

## PARTIE I

### Présentation de la zone d'étude et du risque naturel et sa vulnérabilité dans la région

|  |    |
|--|----|
| Chapitre I : Présentation du site Marzouga.....  | 9  |
| 1. Situation géographique.....   | 9  |
| 2. Climat.....   | 11 |
| 2.1 Données météorologiques : température et précipitation.....                                      | 11 |
| 2.2 Les Vents.....   | 14 |
| 3. Contexte géologique de Marzouga.....  | 15 |
| Chapitre II : Le risque naturel et sa vulnérabilité dans la zone d'étude.....                        | 19 |
| Introduction.....  | 19 |
| 1. Le phénomène d'ensablement à Marzouga.....  | 19 |
| 2. Localisation du processus d'ensablement dans les grandes unités morphologiques de la région. .... | 20 |
| 2.1 Les différentes formes dunaires.....   | 20 |
| A. Barkhanes.....  | 21 |
| B. Cordons barkhanoïdes.....   | 21 |
| C. Akles.....  | 22 |
| D. Nebkas.....   | 22 |
| E. Dunes en étoile ou pyramidales.....   | 23 |
| F. Dunes lineaires ou sifs.....  | 24 |

## PARTIE II

### Evolution spatio-temporelle de l'ensablement à Marzouga

|  |    |
|--|----|
| Chapitre I : Apport de l'outil satellitaire..... | 27 |
| Introduction.....                                | 27 |
| 1. Matériel.....                                 | 27 |
| 1.1 Images satellitaires utilisées :.....        | 27 |
| 1.2 Les images QuickBird.....                    | 27 |
| 1.3 Autres données.....                          | 27 |
| 1.4 Les logiciels.....                           | 28 |
| 2. Méthodes.....                                 | 28 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 2.1  | Acquisition des images satellites.....                           | 28 |
| 2.2  | Traitements effectués .....                                      | 29 |
| A.   | Calibration et géo-référencement.....                            | 29 |
| B.   | Repérage et délimitation des dunes de sable .....                | 31 |
| Chapitre II : Résultats et discussions ..... |  | 34 |
| 1.   | Evolution des surfaces occupées par le sable dans le temps ..... | 34 |
| .2   | Le taux de déplacement des dunes.....                            | 36 |
| Conclusion générale.....                     |  | 45 |
| Annexes 1 .....                              |  | 46 |
| Annexes 2 .....                              |  | 48 |
| Références bibliographiques.....             |  | 50 |

# Introduction

Le Maghreb est connu par le phénomène de désertification qui a des conséquences directes sur le climat. Les mécanismes climatiques et l'importance des reliefs sont au Maghreb moins favorables à l'absence prolongée et généralisée des pluies.

Les problèmes d'ensablement ont pris une grande acuité dans les pays semi-arides et arides et particulièrement au Maroc. Le phénomène se développe sur tout dans le sud et le sud-Est du pays : à l'Est du Haut Atlas, dans le bassin du Ziz moyen et du Bas Ziz, autour d'Errachidia, Gueramma, Erfoud et vers le sud dans le Tafilalet et le bassin de Draa (Coude-Gaussen et Rognon, 1993).

Nous nous intéressons dans cette étude à la plaine de Tafilalt et plus exactement à la région de Marzouga qui souffrent d'une suralimentation de sable et de l'apparition récente et actuelle des manifestations suivantes :

- Dégradation des sols
- Accumulations sableuses
- Salinisation des terres

La mise en mouvements du sable est devenue très inquiétante et menaçante ces derniers temps, se manifestant par la migration des champs des dunes.

Les techniques de lutte contre ce grand fléau n'ont pas donné de résultats satisfaisants. Les études et les travaux menés ces dernières décennies dans la plaine de Tafilalet ont montré que les causes de la dégradation du milieu naturel sont liées extrêmement aux conditions climatiques et une mauvaise gestion de l'espace et aux mauvaises préservations des ressources naturelles.

Le recours à l'imagerie satellitaire multi-source est actuellement le moyen le plus efficace afin d'appréhender le phénomène de l'ensablement.

Le présent travail a pour objet l'étude de l'ensablement à Marzouga et quantifier les mouvements des dunes de sable appelées Erg Chebbi via la télédétection spatiale et les systèmes d'information géographique (SIG). A cet effet, nous avons utilisé une série d'imagerie satellitaires QuickBird et des données climatiques sur une durée de 14 ans, allant de 2003 à 2016.

Ces images nous donnent une vue d'ensemble, et permettent d'expliquer le fonctionnement du phénomène à une échelle locale, afin de pouvoir quantifier les mouvements des dunes de sable.

La méthodologie adoptée dans ce travail tient compte des objectifs et de la problématique énoncée précédemment. Elle comprend les étapes suivantes :

- Une recherche bibliographique concernant les actions érosives de la région à travers les études réalisées (les thèses, les mémoires, ouvrages et articles).
- Une exploitation de différentes cartes : topographiques, géologiques, climatiques, traitement et interprétation des images satellitaires multi-dates. (2003, 2007, 2009, 2011, 2012, 2013 et 2016))
- Une analyse des données climatiques recueillies auprès de la station météorologique d'Errachidia, particulièrement l'analyse de la température, des précipitations et enfin des vents afin d'avoir une meilleure compréhension du comportement du processus éolien avec le milieu physique et urbain.

Le travail est devisé en 2 parties :

La première partie est basée sur la revue bibliographique et vise à présenter la région d'étude dans son contexte environnemental. Nous aborderons la notion du risque naturel en générale et d'ensablement.

La deuxième partie est expérimentale où l'outil télédétection est utilisé pour suivre l'évolution du risque d'ensablement et l'orientation des constructions, par une évolution spatio-temporelle :

- Dans le premier chapitre nous avons présenté les différentes images satellitaires et leurs caractéristiques. Sept dates ont été choisies selon la disponibilité des images qui couvrent toute la zone « à travers le capteur QuickBird ».
- Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les résultats obtenus, les interprétations possibles.

## PARTIE I

### Présentation de la zone d'étude et du risque naturel et sa vulnérabilité dans la région

# Chapitre I : Présentation du site Marzouga

## 1. Situation géographique

La plaine du Tafilalet est située au SE du Maroc, dans la zone présaharienne. Large de 15 à 20 km et longue de 50km, elle se développe surtout longitudinalement entre les latitudes 31°30' et 31°.

Le site que nous avons étudié, fait partie de la Plaine de Tafilalet, où se trouvent les dunes de sable de **Marzouga-Chebbi**.

L'**erg Chebbi**, est un petit erg, ensemble de dunes de sable, situé à la terminaison orientale de la chaîne de montagnes de l'Anti-Atlas, au sud du Haut-Atlas (voir la Figure 2). Ces dunes se développent généralement dans la région au pied du bassin d'Errachidia -Boudenib, Guir Hammada.

L'erg Chebbi, d'une longueur de 20 km (nord-sud) pour une largeur d'environ 7 km (est-ouest), abrite les plus hautes dunes du Maroc.

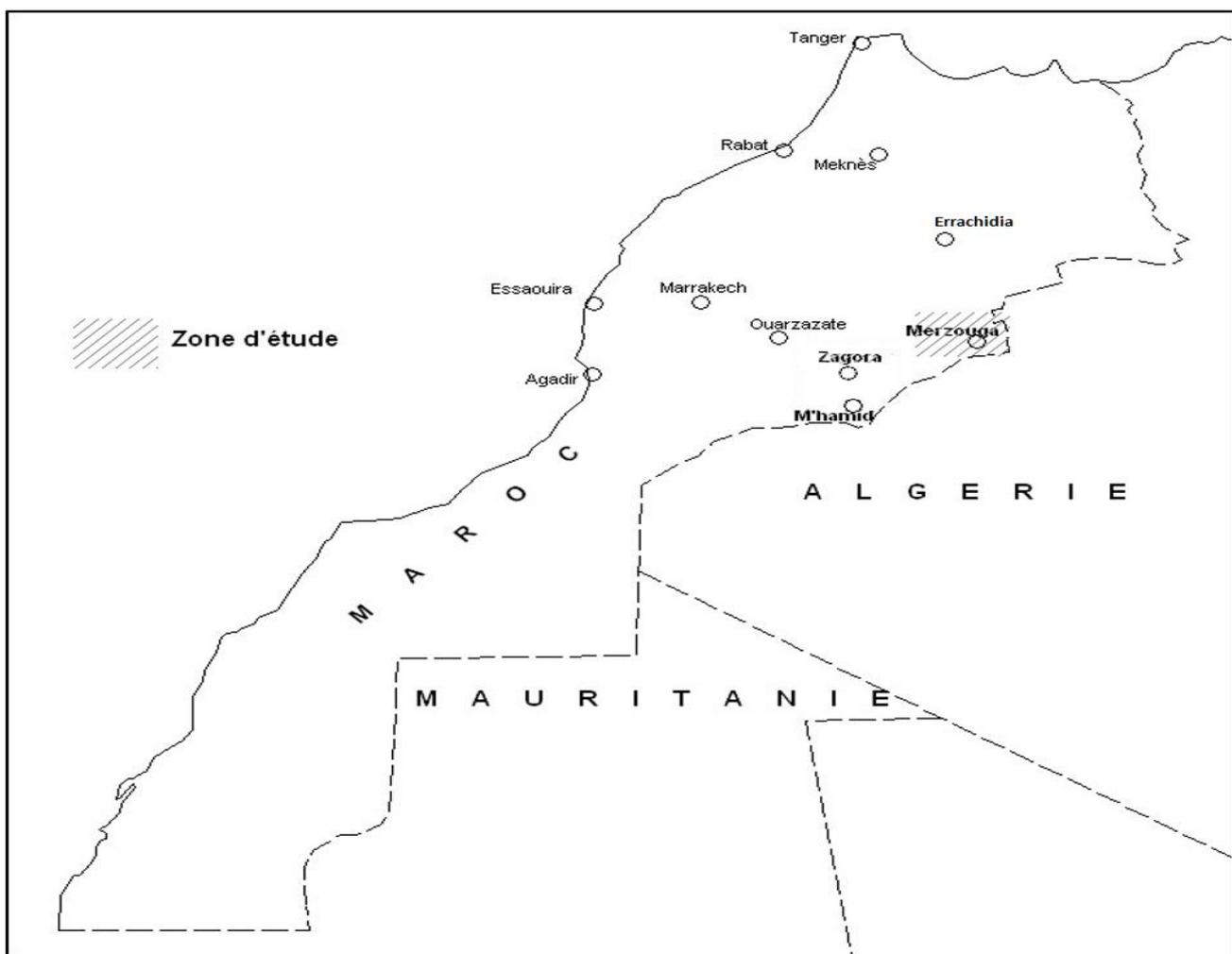


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude



**Figure 2 : Vue satellitaire, obtenue sur le site internet « [visibleearth.nasa.gov](http://visibleearth.nasa.gov) ».  
La localisation de Marzouga « l'erg Chebbi ».  
Barre d'échelle : 100 km.**

## 2. Climat

La zone d'étude est dotée d'un climat désertique. A Marzouga, la pluie est pratiquement inexistante. La température moyenne annuelle est de 21.7 °C. La moyenne des précipitations annuelles atteint 59 mm.

### 2.1 Données météorologiques : température et précipitation

Nous avons obtenu l'enregistrement météorologique trihoraire pour la station d'Errachidia, la plus proche de Marzouga, pour une durée de 14 ans, (Années 2003, 2007, 2009, 2011, 2012, 2013 et 2016).

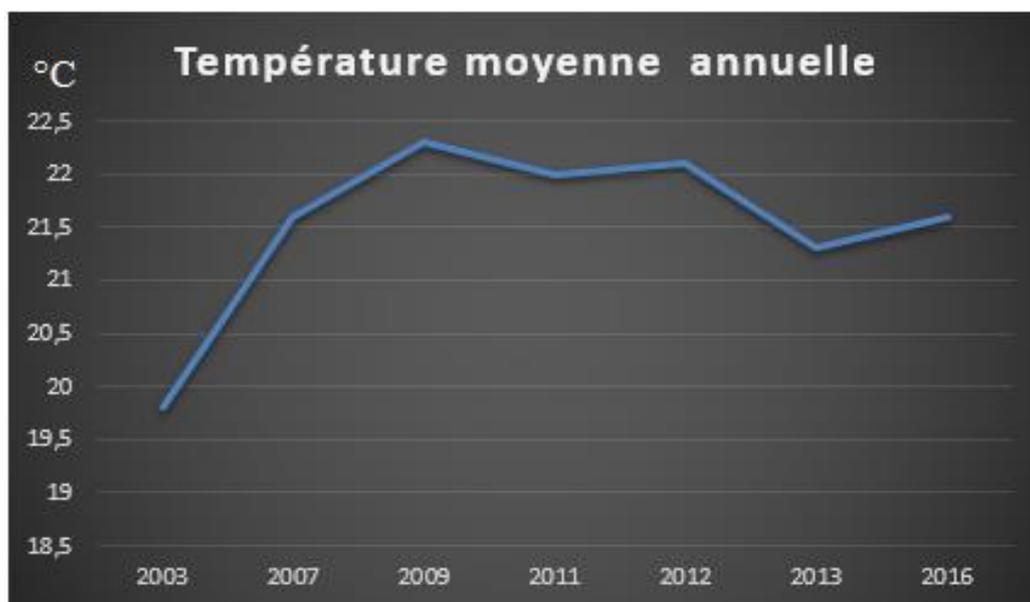
Les données ont été obtenues sur le site <https://fr.tutiemo.net/climat/ws-602100.html> et elles sont résumées dans les tableaux 1 et 2.

| Année | J    | F    | M    | A    | M     | J     | J    | A    | S    | O    | N    | D    | Tmoy annuelle<br>en °C |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------------------------|
| 2003  | 9,9  | 11,7 | 15,3 | 18,6 | 19,8  | 28,6  | 32,6 | 31,4 | 26,7 | 22   | 12   | 10,4 | 19,8                   |
| 2007  | 10,7 | 12,3 | 16,7 | 20,9 | 22,5  | 29,08 | 33,9 | 32,7 | 26,5 | 24,9 | 13,2 | 10,8 | 21,6                   |
| 2009  | 11,8 | 10   | 17,9 | 22,1 | 23,03 | 28,7  | 32,6 | 33,1 | 27,8 | 25,6 | 12,8 | 11,2 | 22,3                   |
| 2011  | 12,3 | 12,9 | 18,3 | 22,3 | 24,5  | 30,5  | 33,6 | 33,2 | 26,1 | 28,5 | 15,9 | 10,2 | 22                     |
| 2012  | 11,6 | 14,1 | 16,8 | 23,7 | 27,3  | 28,9  | 33,8 | 33,2 | 27,4 | 22,7 | 14,6 | 10   | 22,1                   |
| 2013  | 9,2  | 11   | 15,5 | 22,6 | 26,4  | 28,8  | 33,9 | 31,9 | 26,6 | 21,9 | 15   | 11   | 21,3                   |
| 2016  | 12   | 12,9 | 15,3 | 22,1 | 24,6  | 30,9  | 34,8 | 32,2 | 27,7 | 22,2 | 14,1 | 9,7  | 21,6                   |

**Tableau 1 : Température moyenne mensuelles et annuelle (durant la période d'étude)  
- Station d'Errachidia**

Les températures extrêmes relevées sont enregistrées en janvier (le mois le plus humide) et en juillet (le mois le plus sec). Les températures moyennes mensuelles varient entre 9,2°C en janvier 2013 et 12,3°C en janvier 2011 à 32,6°C en juillet 2003 et 34,8°C en juillet 2016.

D'après le diagramme (Figure 3), la température moyenne annuelle dans la région a connu une augmentation très remarquable durant les années 2003 à 2016.

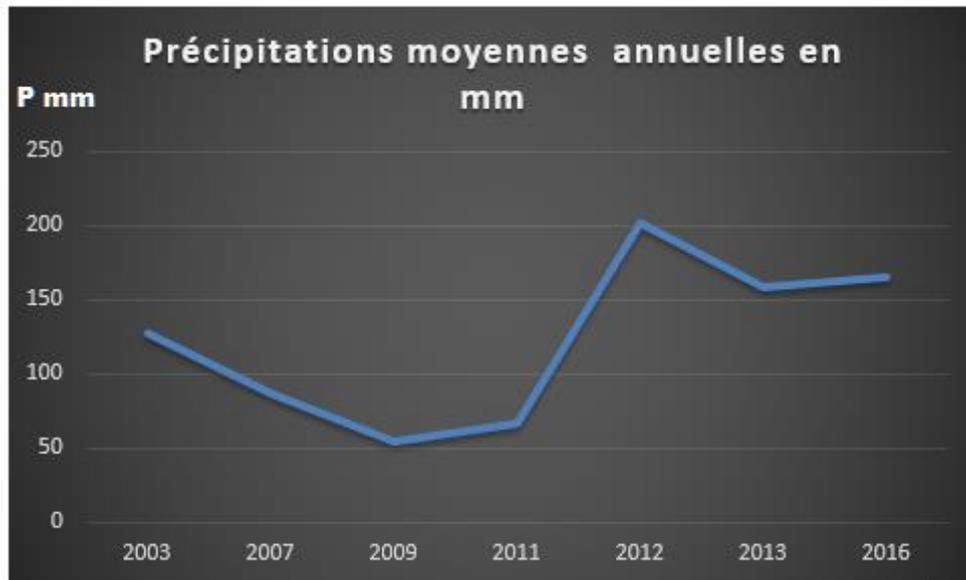


**Figure 3 : Variations des Températures moyennes mensuelles et annuelles (durant la période 2003-2016)**

Les précipitations moyennes annuelles la plus élevées sont de 201,15 mm enregistrées en 2012, dont 79 mm reçu en mois de novembre, mois le plus pluvieux et les précipitations moyennes annuelles les plus basses sont de 51mm enregistrées en 2009.

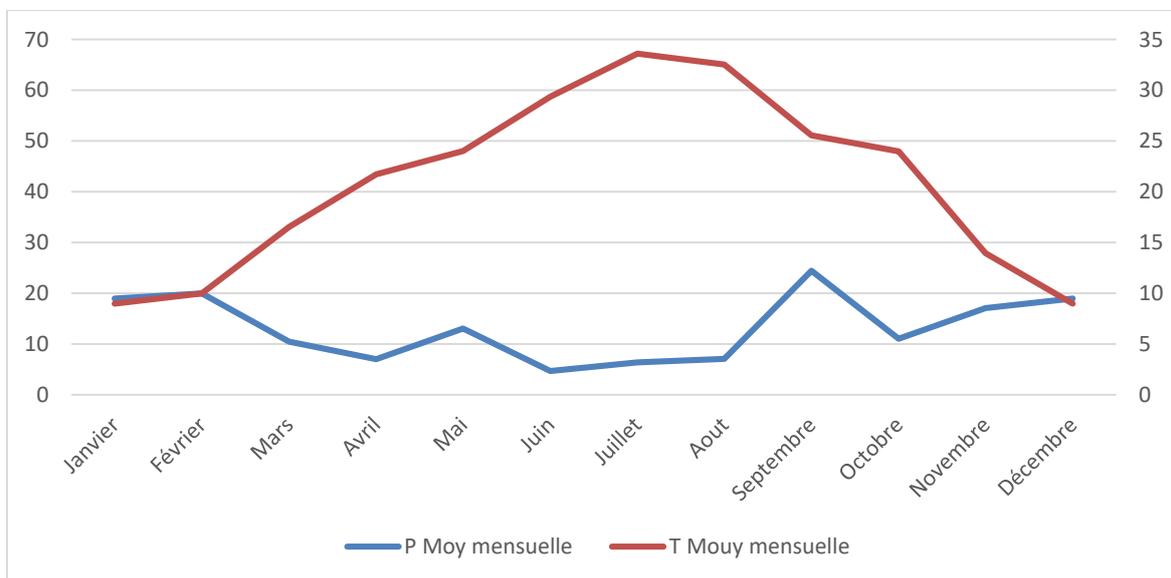
| Année | J     | F     | M     | A     | M     | J     | J     | A     | S     | O     | N     | D     | Pmoy annuelle en mm |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| 2003  | 0     | 26,16 | 1,04  | 14,23 | 26,42 | 7,87  | 6,1   | 3,55  | 11,42 | 7,63  | 10,17 | 12,96 | 127,53              |
| 2007  | 13,4  | 3,9   | 5,7   | 2,5   | 0     | 0,87  | 12,32 | 9,09  | 0     | 10,1  | 3,5   | 2,4   | 86,63               |
| 2009  | 10,6  | 19    | 10,5  | 8,09  | 13    | 0     | 2,98  | 12,01 | 6,9   | 2,7   | 8,9   | 0     | 53,9                |
| 2011  | 0     | 0     | 33,02 | 2,03  | 0     | 0,51  | 10,68 | 0,76  | 9,16  | 0     | 8,89  | 0,76  | 65,81               |
| 2012  | 15,74 | 0     | 9,14  | 5,33  | 17,78 | 5,33  | 0     | 12,19 | 47    | 8,13  | 79    | 1,51  | 201,15              |
| 2013  | 7,37  | 39,88 | 3,81  | 11,94 | 2,04  | 10,17 | 0     | 6,09  | 56,14 | 21,33 | 0     | 0     | 158,77              |
| 2016  | 36,3  | 3,3   | 10,17 | 0     | 18,29 | 0     | 3,57  | 6,09  | 40,37 | 27,42 | 9,14  | 46,75 | 165,1               |

**Tableau 2 : Précipitation moyenne mensuelle et annuelle (durant la période d'étude)  
- Station d'Errachidia**



**Figure 4 : Variations des précipitations moyennes mensuelles et annuelles (durant la période 2003-2016)**

Contrairement à l'évolution de la température, les précipitations ont connu une diminution intense qui arrive jusqu' au 50 mm par an en 2009. Après 2011 une augmentation a eu lieu, les précipitation moyennes annuelles ont arrivé à 200 mm en 2012.



**Figure 5 : Diagramme Ombrothermique de la région d'Errachidia**

Le diagramme montre que la région est caractérisée par une longue période sèche qui débute en moi de mars et se termine en novembre, ce qui implique qu'on est dans une zone saharienne.

## 2.2 Les Vents

L'action du vent dépend essentiellement de son intensité qui dépend de deux paramètres : la durée du vent et sa force ; le vent est lié aussi à la vitesse. Selon la vitesse on peut classer les vents en plusieurs classes :

- Vents faibles ou calmes ;
- Vents moyens ;
- Vents forts ;
- Vents très forts.

Dans la pratique, on parle suivant une autre classification qui est basée sur le rôle morphologique du vent et/ou son pouvoir érosif ; on parle ainsi de vents inactifs et de vents actifs. Le niveau de séparation de ces deux vents définit la vitesse critique ou efficace qui correspond au seuil de vélocité. On qualifie d'efficace tout vent capable en un lieu donné de provoquer l'arrachage des particules du sol (Benalla, 2003).

Les vitesses moyennes mensuelles des vents enregistrées dans notre zone d'études sont résumé dans le diagramme (figure 6).

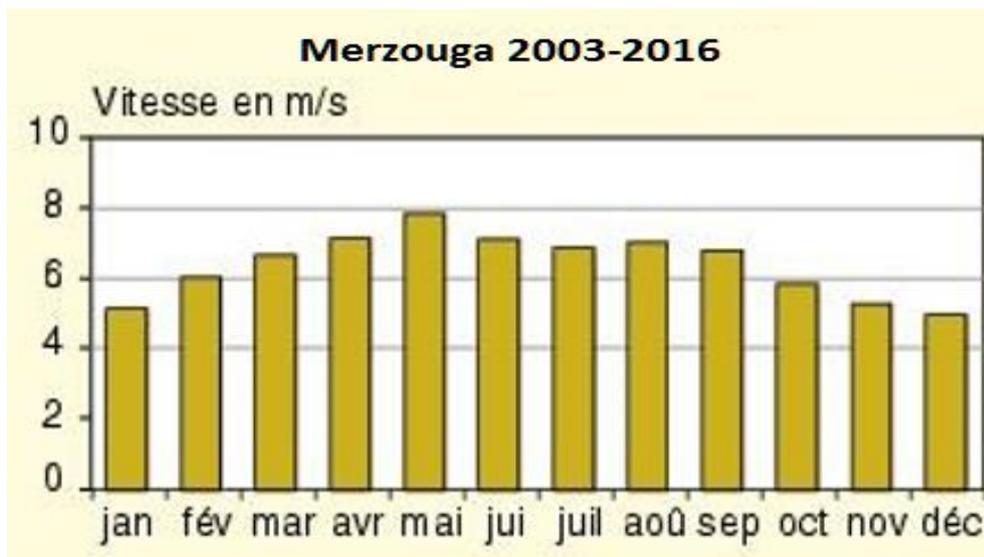


Figure 6 : Moyennes mensuelles des vitesses de vents enregistrées à Marzouga (2003-2016)

L'analyse des moyennes mensuelles des vitesses des vents montre que le Marzouga est soumis à l'influence de vents de forte vitesse au printemps et en été, tandis que l'automne et l'hiver sont les saisons où l'on relève les plus faibles vitesses.

La moyenne des vitesses peut atteindre une moyenne de 8 m/s, Marzouga et considéré comme la région là moins ventée du Tafilalet.

Au terme de cette analyse du régime éolien, a Marzouga (erg Chebbi), domine un vent à deux directions opposées, SE-NW et E-W, qui soufflent toujours pendant les deux saisons (printemps et été) et qui sont à l'origine des dunes pyramidales existantes (Mansour Benalla, 2003).

### 3. Contexte géologique de Marzouga

D'après la carte géologique de Tafilalet, la zone est constituée essentiellement de roches sédimentaires, dont les âges s'étendent de l'ère primaire pour le « socle » au quaternaire récent pour les termes les plus superficiels de la couverture, dont les dunes. Le sous-sol de la vallée du Ziz est constitué pour l'essentiel de sédiments de l'ère Primaire, du Cambrien au Carbonifère.

La série primaire, plissée, comprend en majorité des dépôts terrigènes, sédimentés en domaine marin peu profond. Absents du Cambrien (Km) gréseux. Des niveaux carbonatés apparaissent épisodiquement vers le sommet de l'Ordovicien (Os). Le Dévonien, inférieur et moyen, voit une influence carbonatée plus marquée.

L'ordovicien supérieur et le silurien sont des schistes, avec des niveaux carbonatés épisodiques. Le Carbonifère constitue le substratum du village de Marzouga et de l'erg Chebbi. Le carbonifère inférieur est constitué de schistes argileux et d'argilites et le carbonifère supérieur d'une succession de poudingues, de grès et de pelites, et de roches biogéniques comme les calcaires récifaux. Le Permien n'affleure pratiquement pas dans cette zone.

# Apport de l'imagerie spatiale à la quantification des mouvements des dunes de Marzouga

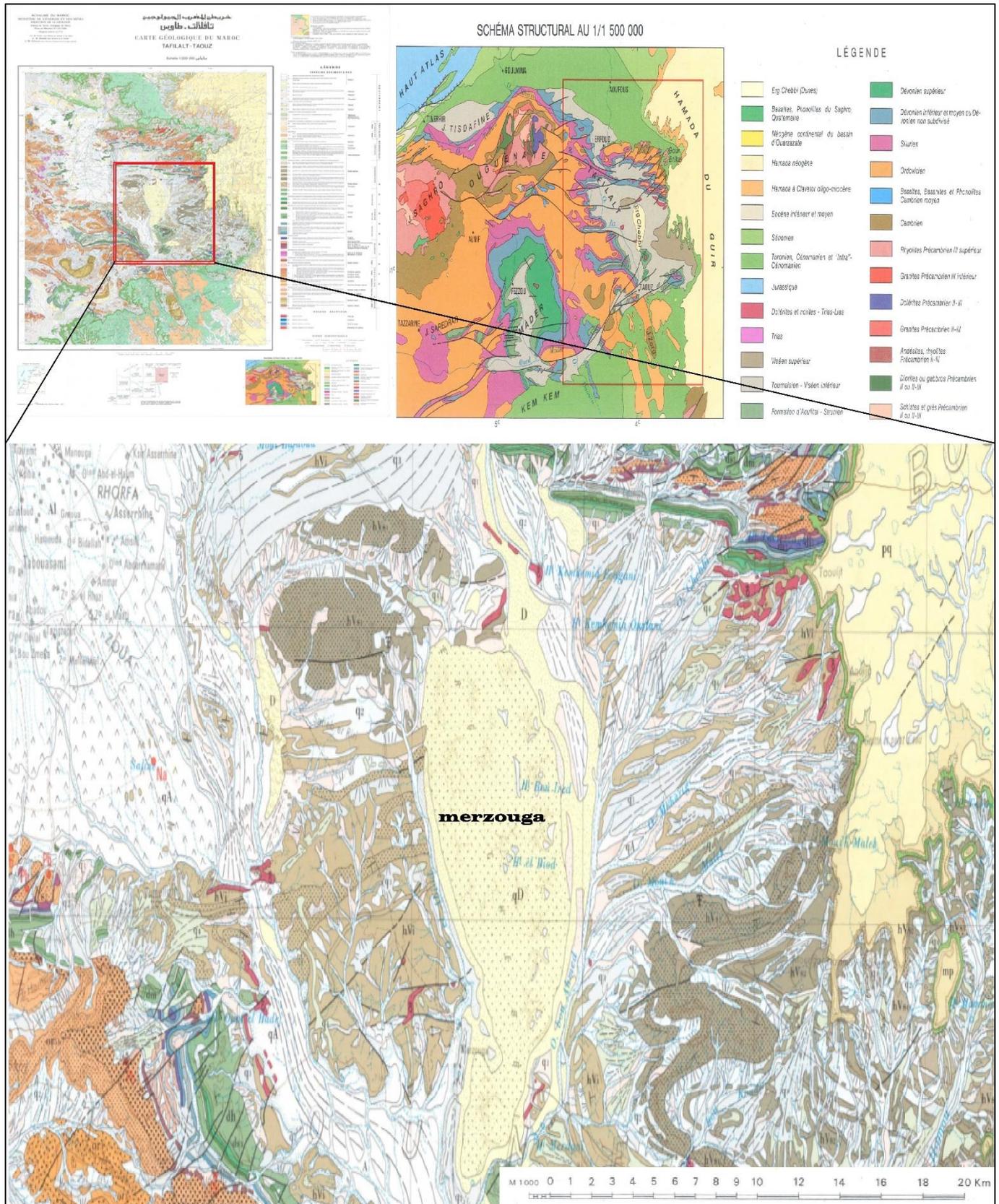


Figure 7 : La carte géologique de Tafilalt, et localisation de Marzouga.

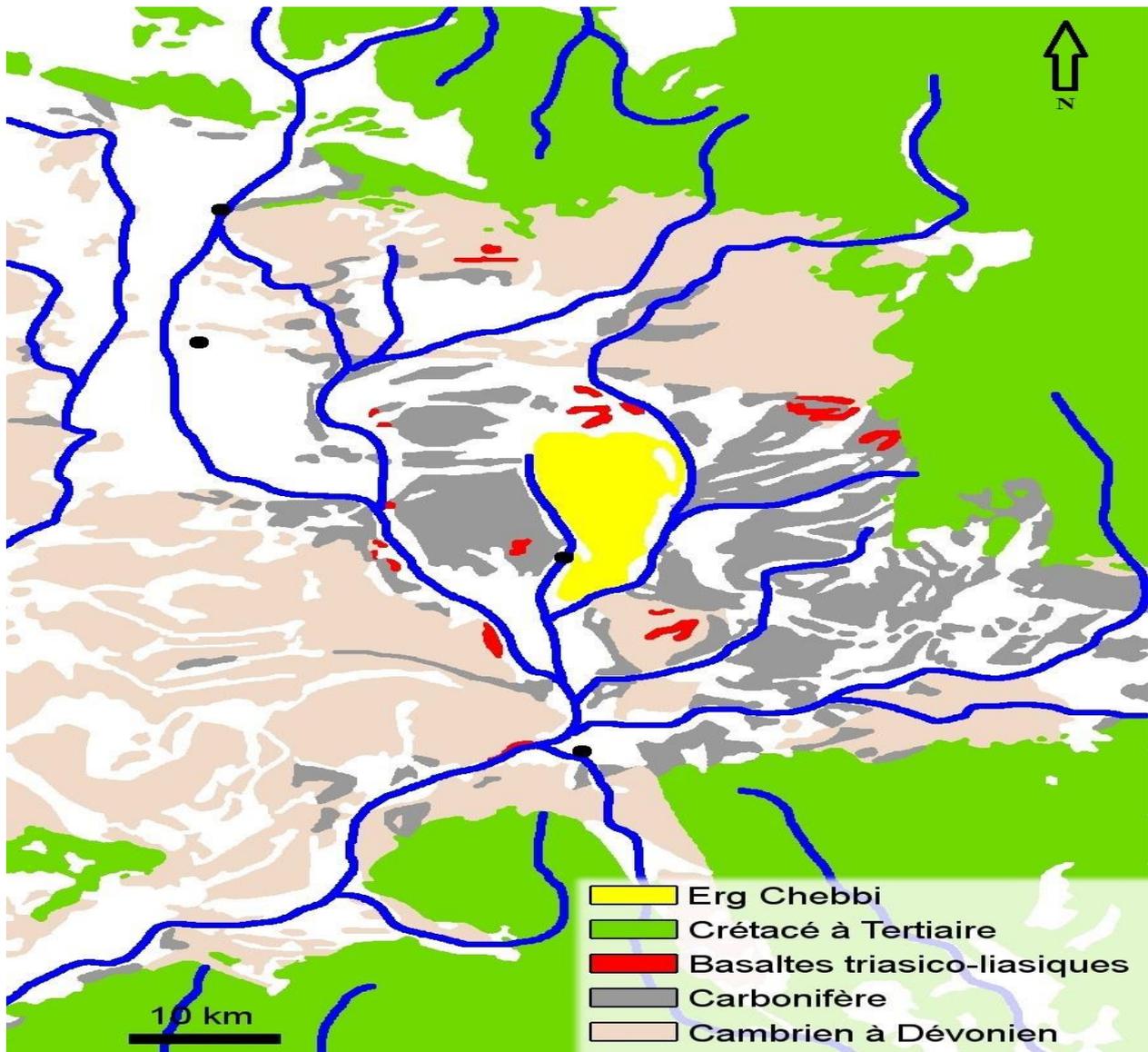


Figure 8 : Carte géologique simplifiée de la région de Marzouga. Le village de Marzouga est situé au bord ouest de l'erg Chebbi, entouré d'affleurements de carbonates du Carbonifère.

La série primaire repose en discordance sur un substratum précambrien constituée de séries volcano-sédimentaires et volcaniques. Affectée par de faibles déformations, elle a enregistré une tectonique synsédimentaire cassante (Montenat et al 1996). Des accidents actifs pendant la sédimentation ont été repris ultérieurement, lors des déformations hercyniennes, la structuration hercynienne de la zone reste faible. On remarque des plis de grande longueur d'onde, ainsi que le résultat du rejeu des failles synsédimentaire.

Toute la série primaire est recoupée par des intrusions de dykes et de sills de dolérite et de diorite. Les événements volcaniques sont triasico-liasiques, dates à 181-187 Ma et liés à l'ouverture de l'océan Atlantique.

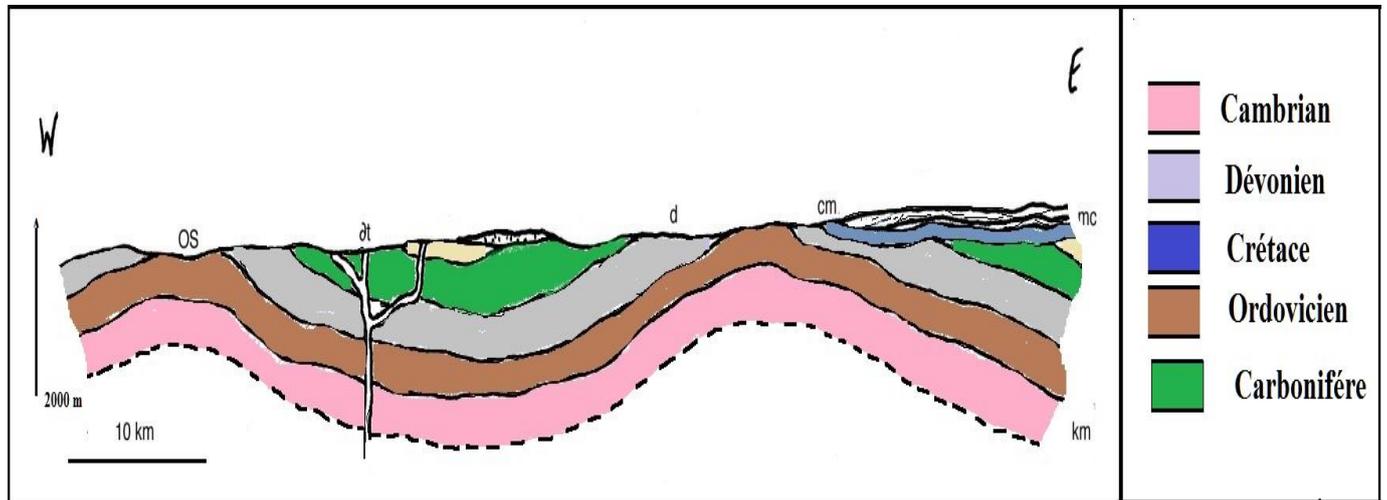


Figure 9 : Coupe géologique schématique de la région de Marzouga

Discordant sur cette série primaire, on trouve les roches principalement calcaires du crétacé (Cm) et du tertiaire. Leurs termes en sont continentaux, lacustres. Les affleurements sont très tabulaires, donnant notamment naissance au paysage des Hamadas. En prolongement de cette série, ou en discordance directement sur les terrains primaires, on trouve les sédiments quaternaires, notamment un pléistocène reposant discordant sur le viséen à proximité immédiate de Marzouga.

La Figure 9 synthétise ces observations sous la forme d'une coupe à main levée.

# Chapitre II : Le risque naturel et sa vulnérabilité dans la zone d'étude

## Introduction

En géographie les espaces à risque se présentent comme étant le produit d'un aléa et de vulnérabilités et se définissent par l'existence d'enjeux de développements qui peuvent être menacés en fonction de leur vulnérabilité et de leur exposition à des phénomènes de rupture, naturels ou anthropiques.

La vulnérabilité d'un espace à risque est donc la proportion à perdre des éléments considérés comme essentiels au développement environnemental « urbain ou agricole ».

### 1. Le phénomène d'ensablement à Marzouga

L'ensablement est le résultat des dépôts éoliens favorisés par la nature du sol où le vent arrache les particules fines de la surface de la terre dans les zones arides et semi arides ; donc un double danger menace les sols de ces régions :

- Celui d'être réduit à l'état squelette après le départ des éléments fins enlevés par le vent.
- Celui d'être recouvert par le sable.

L'ensablement présente un risque lorsqu'il touche aux enjeux économiques (agriculture et zones urbanisées) d'une région et il est basé sur les critères suivants :

- Lorsque le sol est couvert d'une couche de sable et devient de ce fait stérile.
- Lorsque les cultures disparaissent sous une couche de sable sur laquelle pousse des espèces végétales naturelles.
- Ou lorsque les labours n'atteignent plus le sol.
- Quand il y a un voile sablonneux sur les routes, et présente un danger pour l'homme (les conducteurs et passagers des véhicules)
- Quand les systèmes de lutte contre l'ensablement des terres productives ne sont plus efficaces (baisse de la production).

- Quand il y a des accumulations sableuses dans les zones urbaines et les axes routiers.
- Quand les secteurs touristiques sont menacés par la destruction du système dunaire, donc perte de la faune et ensablement issus des processus érosifs.

C'est à travers ces critères que nous pouvons dire que la zone Marzouga connaît un phénomène d'ensablement en proie à des risques importants.

## 2. Localisation du processus d'ensablement dans les grandes unités morphologiques de la région.

### 2.1 Les différentes formes dunaires.

Dans le Tafilalet, on observe plusieurs types de dunes : certaines entrent dans la classification habituelle (nebkas, boucliers, barkhanes, dunes pyramidales...) tandis que d'autres sont plus difficiles à identifier, en particulier les aklés à structure cloisonnée où interfèrent plusieurs directions de dunes.



Figure 10 : Localisation des différentes formes dunaires dans la région de Tafilalet

### A. BARKHANES

Il s'agit d'une forme d'accumulation sableuse liée à un régime de vent suffisamment stable et par conséquent très mobile. Elle est la plus menaçante pour l'ensablement vu sa capacité de déplacement rapide. Sa taille est très variable : on observe de véritables champs de barkhanes au sud de Jorf, de Hannabou et de Reg Moulay el Hassan.

Les barkhanes se déplacent rapidement sur des surfaces dures et cohérentes où les chocs entre les grains favorisent la saltation, mais lorsqu'elles arrivent sur une surface de sables meubles, elles s'estompent. C'est le cas observé au sud-ouest de Jorf, où on remarque la disparition des barkhanes à proximité des palmeraies ensablées. Il ne reste plus alors que des formes de grandes masses sableuses ondulées (Benalla 2003).

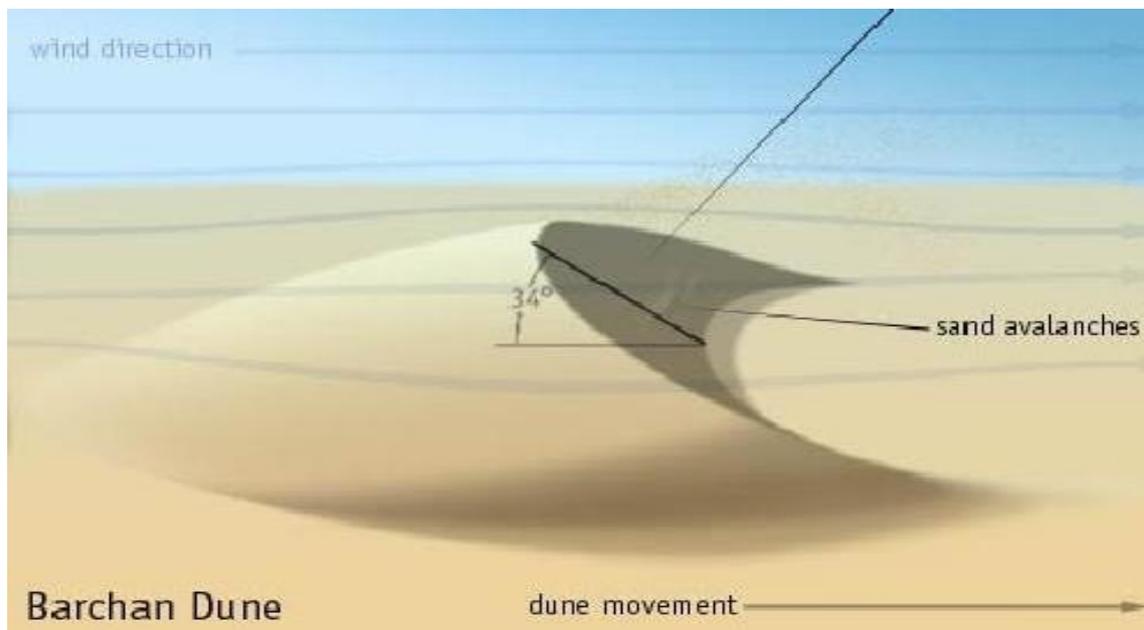


Figure 11 : Les barkhanes

### B. CORDONS BARKHANOÏDES

Localisés surtout dans la zone de Lahmida, ils peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres de long avec une tendance à évoluer en dunes transverses. On peut les rencontrer parfois au sud de Jorf et Hannabou. Ce type de dune est lié à un apport sableux plus important que pour les barkhanes, puisqu'il est localisé dans une zone inondée par les crues de l'oued Rhéris qui fournit un apport de matériel sableux facilement remaniable par l'action du vent, ce qui contribue à expliquer leur

développement ici. Ces formes dunaires se disposeraient presque perpendiculairement à la direction des vents efficaces mais avec une variabilité directionnelle plus complexe, favorisant l'accolement des dunes par leurs ailes au cours des changements de direction du vent (Benalla 2003).

### C. AKLÉS

Cette structure d'erg à plusieurs directions de dunes de types différents (tendance barkhanique, tendance pyramidale, etc.) est très difficilement pénétrable car on assiste, en outre, à un resserrement des dunes, les unes contre les autres. Ce type de structure dunaire est observé au Tafilalet, dans la zone de Magha (Benalla 2003),

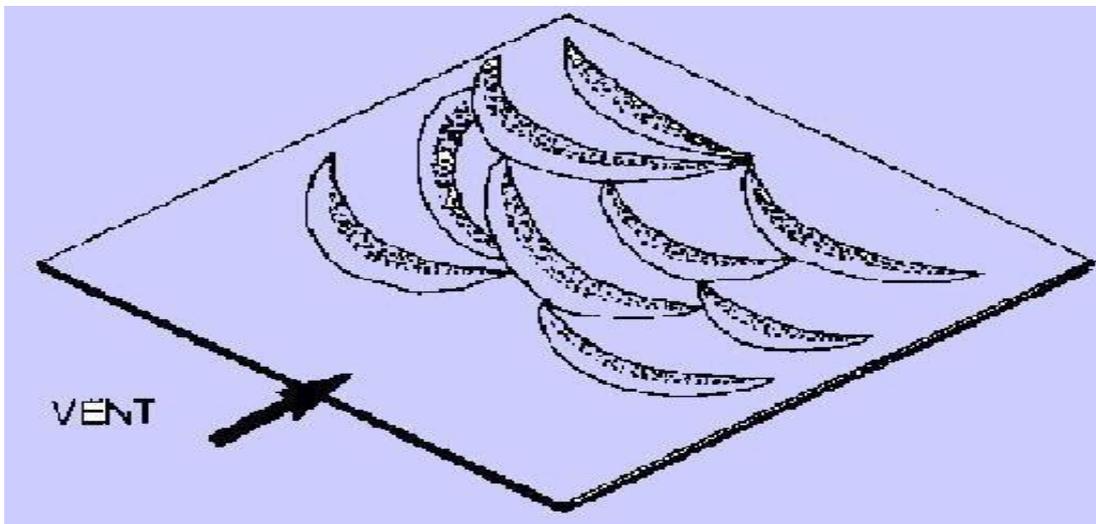
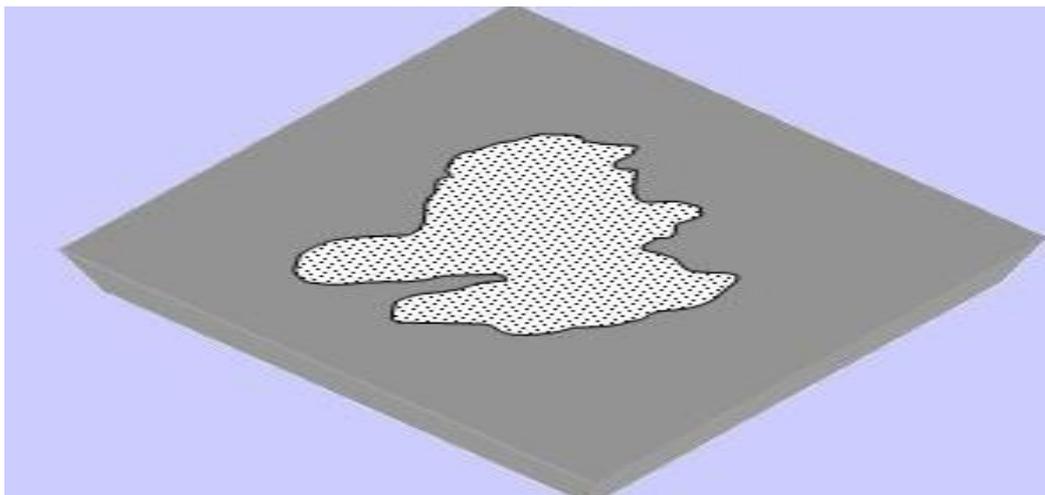


Figure 12 : Les Aklés

### D. NEBKAS

Elles traduisent la direction du dernier vent efficace et existent uniquement derrière des obstacles, et plus particulièrement sur les aires à couverture végétale faible et clairsemée, rencontrée dans le Tafilalet (*Zilla spinosa*, *Salsolasp.* Et *Aristida plumosa*). Leur taille, liée à celle de l'obstacle, est faible et ne dépasse pas 50 cm de long et 20 cm de haut.

La variabilité directionnelle des vents contrarie l'évolution de ces formes en déplaçant à chaque fois la charge sableuse déposée lors de la tempête précédente, ce qui ne leur permet pas d'augmenter de taille (Benalla 2003).



**Figure13 : Vue superficielle d'une Nebka**

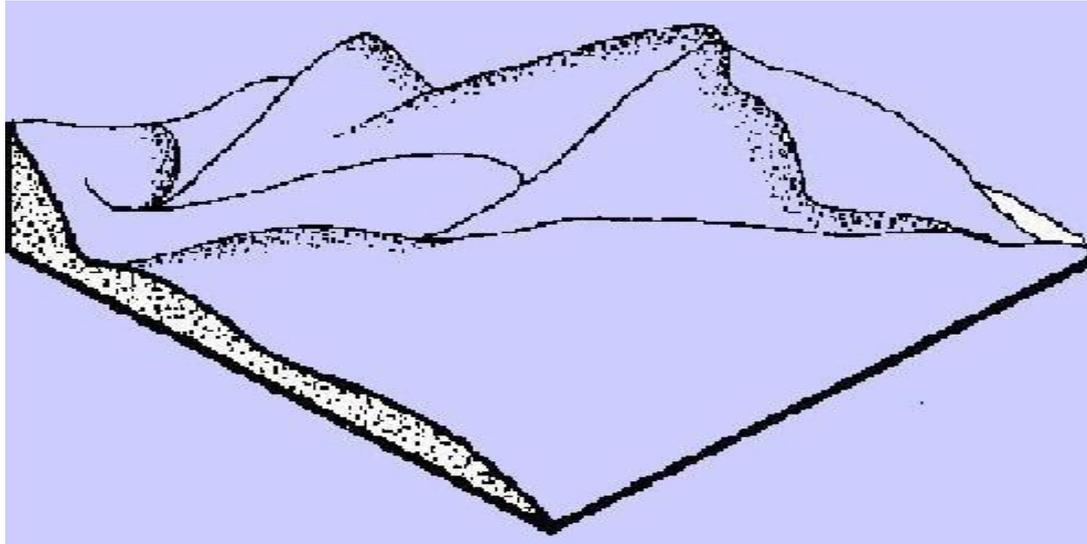
La plus grande concentration de nebkas formant un véritable champ dunaire, à l'est de Jorf, est favorisée principalement par la présence de l'espèce *Salsolasp*. Ce type de micro-dunes, peu évolué dans le Tafilalet, est essentiellement dû à la faible taille des plantes rencontrées dans la région.

Dans les zones de déflation, une végétation perchée, sans nebkas, indique soit une forte intensité d'érosion soit, plus simplement, un faible apport de matériel sableux (Benalla 2003).

#### ***E. DUNES EN ÉTOILE OU PYRAMIDALES***

L'erg Chebbi à Marzouga atteint 10 km de large et 20 km de long et se caractérise par un sable à granulométrie particulièrement fine. Il est formé essentiellement de dunes pyramidales qui peuvent atteindre 100 m de haut, avec des lignes de crêtes irrégulières et multidirectionnelles qui résultent d'un vent tri- ou multidirectionnel.

L'analyse des enregistrements anémométriques sur 14 ans révèle en effet une grande variabilité dans la direction des vents dominants, d'une année à l'autre et même à l'intérieur d'une même année, et il ne semble pas exister de direction dominante dans cette zone à régime éolien multidirectionnel (Benalla 2003).



**Figure 14 : Dunes pyramidales**

Les vents de direction NW, E, SW, S et EW sont représentés dans la région avec des fréquences assez proches mais néanmoins une prédominance des vents NW et E provenant de la transgression vers le NW du Maghreb de la masse d'air continentale saharienne.

Ces vents façonnent les dunes dans différentes directions mais sans provoquer leur déplacement. Ce régime éolien concorde avec le type de dunes de forme pyramidale observées sur le terrain.

#### ***F. DUNES LINEAIRES OU SIFS***

Qui est un édifice allongé, étroit et de forme étirée sur toute sa longueur comme une épée (appelée sif en arabe). Il possède deux côtés à pentes fortes qui se rejoignent en une crête active. La longueur est toujours de huit à dix fois plus importante que la largeur.

En générale, les sifs ont de 2 à 3 km de long et 30 à 150 m de large. Quelquefois, ils peuvent être discontinus et assemblés en rides pouvant atteindre 30 à 40 km de longueur.

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 (Benalla 2003).

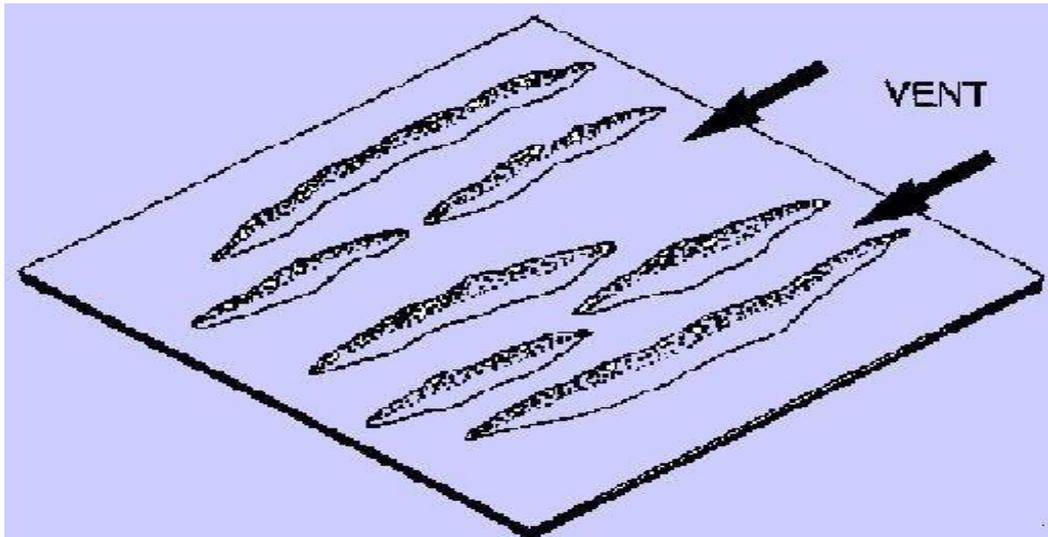


Figure 15 : Les Sifs

Cette démonstration des différents types de dunes est un indicateur de lecture généralisée des formations sableuses qui existent dans un climat semi-aride et aride et qui présentent un risque d'ensablement.

**PARTIE II :**

**Evolution spatio-temporelle de  
l'ensablement à Marzouga**

# Chapitre I : Apport de l'outil satellitaire

## Introduction

L'un des grands avantages de la télédétection spatiale 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. L'imagerie spatiale est devenue actuellement l'outil principal de surveillance et de suivi des différents phénomènes terrestres. La comparaison d'images multi temporelles permet de détecter ces changements.

## 1. MATERIEL

### 1.1 Images satellitaires utilisées :

Les images QuickBird orthorectifiées ont été utilisées dans le cadre de cette étude parce qu'elles sont disponibles, gratuites et de grandes résolutions spatiales et spectrales. Avec un niveau de prétraitement : elles sont facilement téléchargeables à partir de Google-Earth sur une système géodésique mondial WGS84.

Dans la présente étude sept images satellitaires sont utilisées dont les dates : 2003, 2007, 2009, 2011, 2012, 2013 et 2016.

### 1.2 Les images QuickBird

QuickBird est un satellite à haute résolution de Digital Globe mis en orbite à la fin de 2001. Depuis 2004, l'imagerie produite par ce satellite offre la plus haute résolution (une résolution spatiale de 61 cm.) et une très forte précision.

Ce satellite est un bon outil pour acquérir des données environnementales, tout particulièrement pour déterminer les changements d'utilisation des sols ainsi que les changements dans les zones agricoles et forestières. L'imagerie QuickBird peut être utilisée pour de nombreuses applications, notamment l'exploration et la production de pétrole et de gaz, les travaux de génie et de construction et les études environnementales.

### 1.3 Autres données

L'étude a nécessité l'acquisition de données climatiques provenant de la base de données de la station météorologique d'Errachidia, et des données géologiques, topographiques...

## 1.4 Les logiciels

Le logiciel utilisé dans le cadre de cette étude est : Arc GIS Desktop 10.4 pour les applications SIG.

## 2. METHODES

### 2.1 Acquisition des images satellites

La base de données utilisée dans ce travail comprend des extraits d'images QuickBird prises à différentes dates (voir tableau) d'après les informations fournies par Google Earth© (Identifiant Catalogue Digital Globe). Les coordonnées du centre de l'image sont : 31° 5'0.93"N et 4° 0'29.26"O. Ces extraits d'image ont été acquis gratuitement depuis Google Earth© directement à partir de l'écran de visualisation. La résolution spatiale est de 1 m.

La date d'acquisition de l'image est très importante dans l'étude des changements du paysage à partir de données satellitaires. Pour cela, nos données ont été sélectionnées pendant la grande saison sèche, période pendant laquelle le taux de nébulosité et de couverture nuageuse est les plus faibles.

La temporalité du capteur entraîne des manques de données et la présence de défauts (couverture nuageuse, ombrage dense, etc.) rend inutilisables certaines images. Ces déficits peuvent être résolus par la combinaison des années d'acquisition en « période », variant de un à quatre ans maximum (Jobin et al., 2007). La période choisie est la médiane des dates.

| Nom donnée à l'image | Date d'acquisition |
|----------------------|--------------------|
| Géoref 13-07-2003    | 13-7-2003          |
| Géoref 30-03-2007    | 30-3-2007          |
| Géoref 16-08-2009    | 16-08-2009         |
| Géoref 14-07-2011    | 14-07-2011         |
| Géoref 23-09-2012    | 23-9-2012          |
| Géoref 07-11-2013    | 07-11-2013         |
| Géoref 12-02-2016    | 12-2-2016          |

Tableau 3 : Caractéristiques et date d'acquisition des images Landsat

## 2.2 Traitements effectués

### A. Calibration et géo-référencement

Nous avons pu extraire et géo-référencier 7 images (Figure 16).

Le calibrage radiométrique consiste à mettre l'image produite (intensité) à sa représentation réelle (terrain).

Le géo-référencement permet d'avoir les images produites dans un même système de projection cartographique (WGS84). Cette étape a été déroulée automatiquement en attribuant les caractéristiques géographiques de chaque image.

Les dunes sont parfaitement identifiables (Figure 16). Elles apparaissent comme des secteurs arrondies et allongées de couleurs rougeâtre contenant des dépressions, alors que les espaces vides sont plates de couleur sombre (grise).

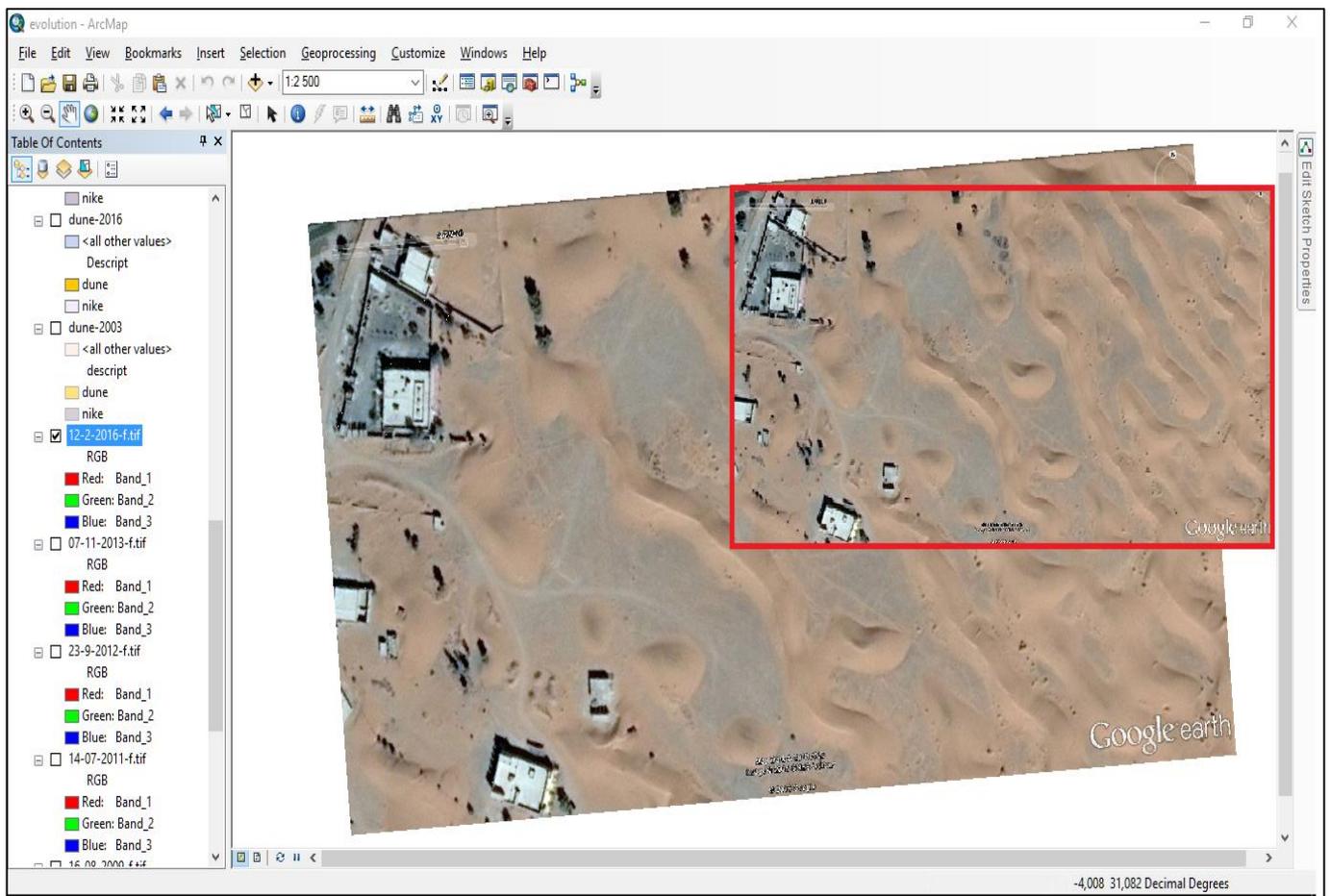


Figure 16 : Image QuickBird géo référencée (date d'acquisition 2016).



a) Géoref 13-07-2003



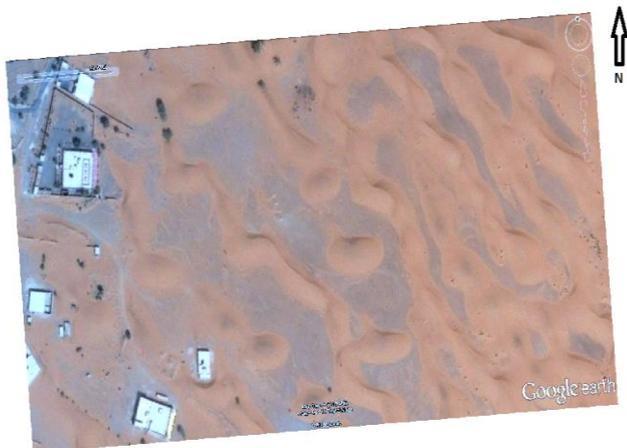
b) Géoref 30-03-2007



c) Géoref 16-08-2009



d) Géoref 14-07-2011



e) Géoref 23-09-2012



f) Géoref 07-11-2013



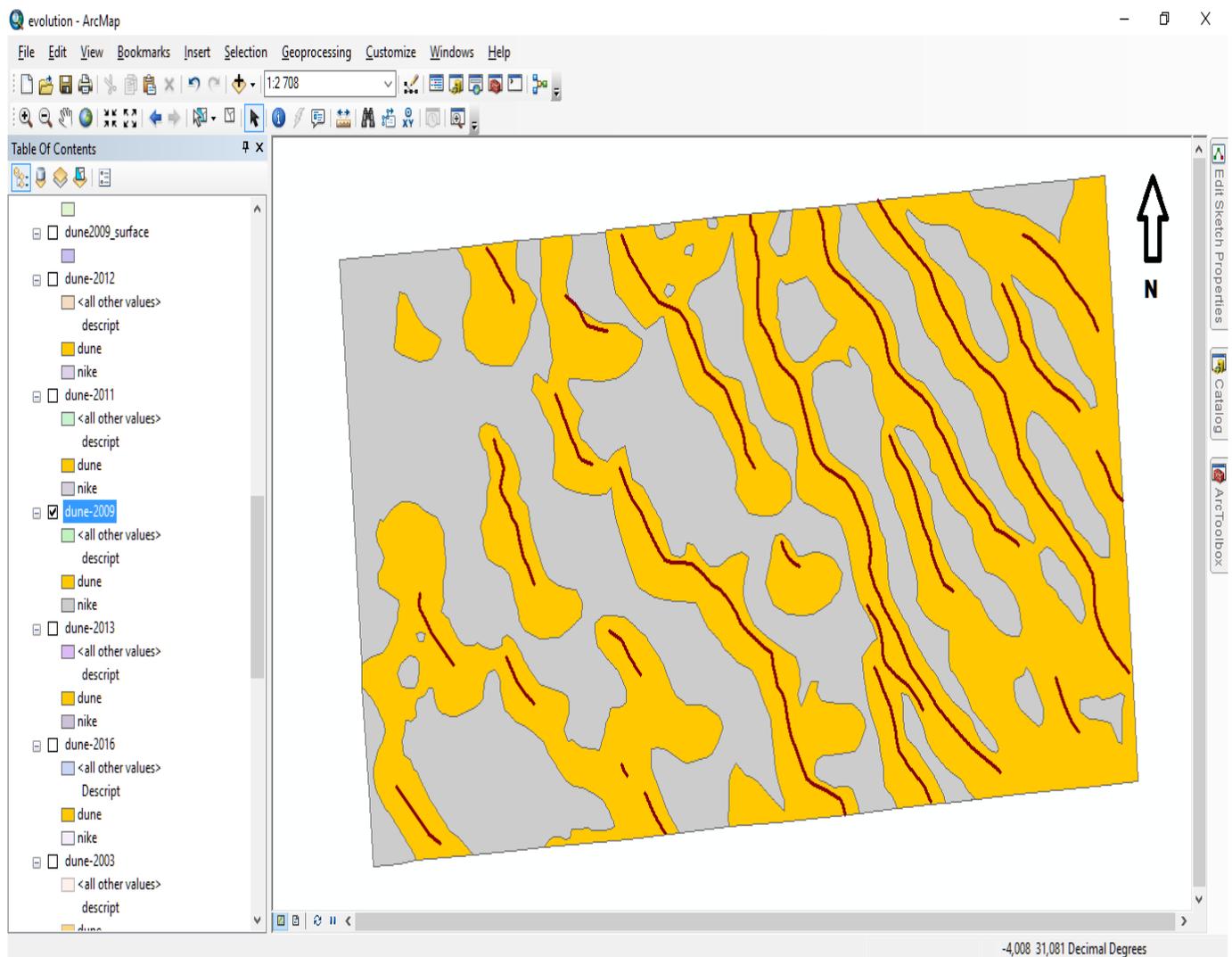
g) Géoref 12-02-2016

Figure 17 : (a, b, c, d, e, f, et g). Echantillon de chaque image traitée (différentes dates) montrant quelques dunes.

### B. Repérage et délimitation des dunes de sable

Le repérage des dunes est obtenu par filtrage puis segmentation d'image et le contour de leur morphologie –en 2D– est acquis par contourage.

Cette dernière étape a été soigneusement et manuellement effectuée, par digitalisation des dunes une après l'autre sur l'extension ArcMap du logiciel ArcGIS



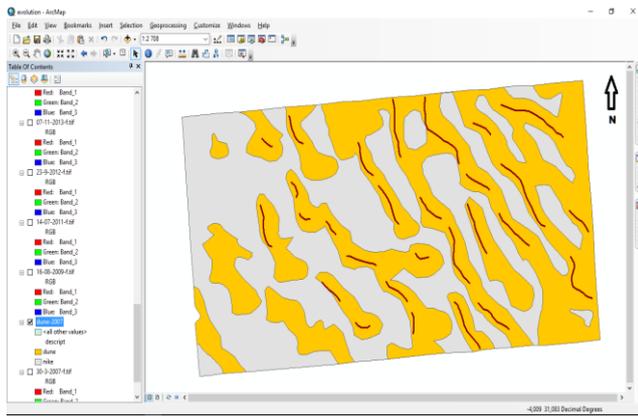
**Figure 18 : Couche de dunes digitalisée à partir de l'image raster 2007, la couleur jaune indique les dunes de sable, les traits marrons indiquent les têtes des dunes et .la couleur grise indique les espaces vides.**

Après avoir délimité les contours des dunes sableux, on a pu avoir une vision claire sur les espaces occupés par les sables, et leur évolution spatiotemporelle durant les différentes dates.

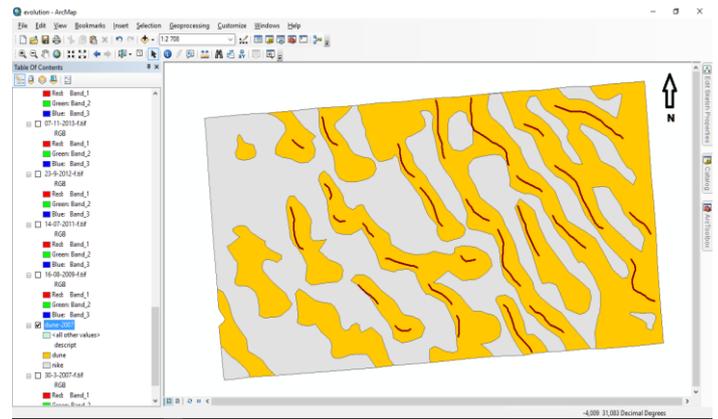
Ensuite on a pu calculer le pourcentage des espaces occupés par les sables afin d'arriver à quantifier cette variation durant son évolution temporelle, les résultats sont présentés dans la figure 18 et seront discuter dans le chapitre 2.

La figure19 montre les autres couches des dunes digitalisées à partir de chaque image raster

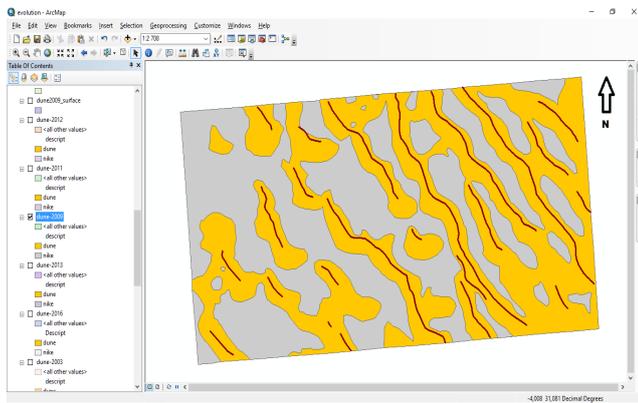
# Apport de l'imagerie spatiale à la quantification des mouvements des dunes de sable de Marzouga



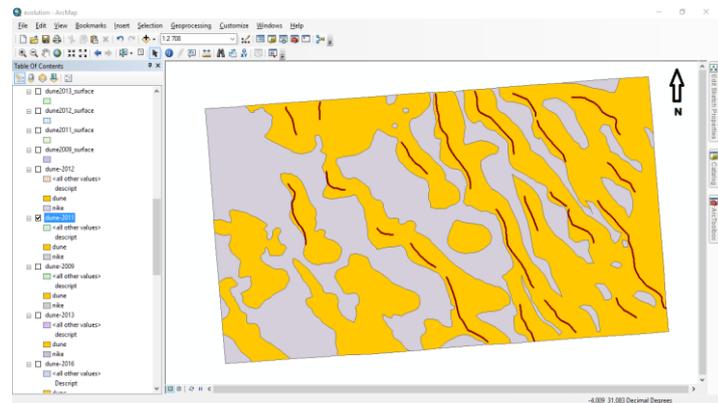
a) 13-07-2003



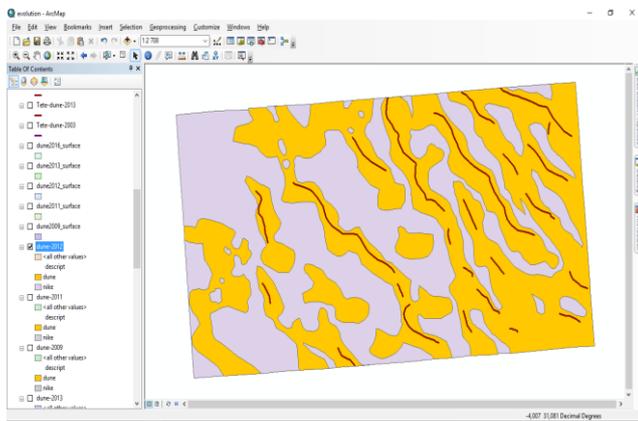
b) 30-03-2007



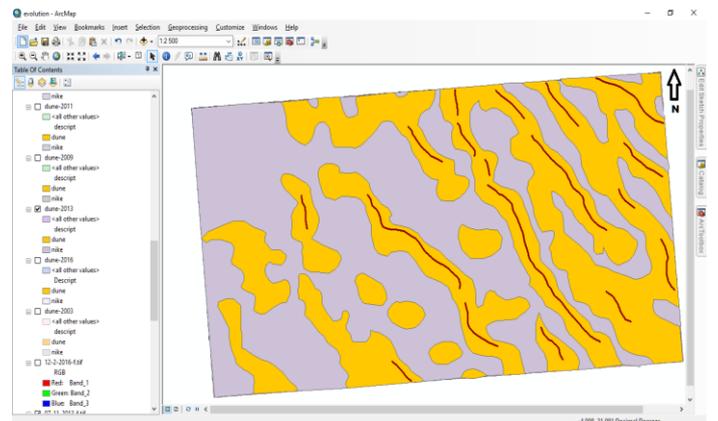
c) 16-08-2009



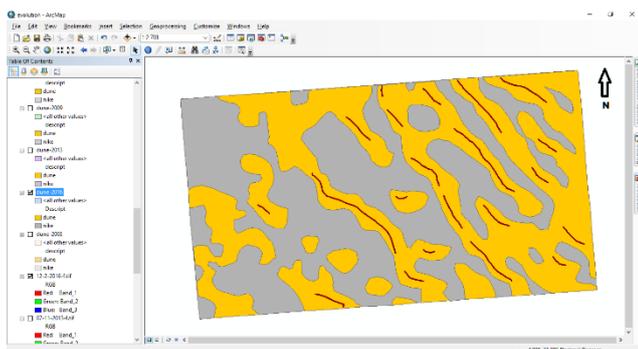
d) 14-07-2011



e) 23-09-2012



f) 07-11-2013



g) 12-02-2016

Figure 19 : (a, b, c, d, e, f, et g). structures dunaires digitalisées

## Chapitre II : Résultats et discussions

Ce travail, nous a permis de répertorier plus de 400 dunes dans la région. Nous avons aussi suivi leur évolution sur une période de 14 ans (13-07-2003/12-02-2016). Nous avons mis en évidence le déplacement des dunes sous l'effet des vents du SE-NW. Les premiers résultats obtenus se résument ci-dessous.

### 1. Evolution des surfaces occupées par le sable dans le temps

Les résultats du calcul des surfaces totales, surfaces occupées par le sable ainsi que leur pourcentage pour chaque image sont représentés comme suite (voir annexes 1 pour plus de détail) :

| Image | Surface totale en m <sup>2</sup> | Surface occupée par le sable en m <sup>2</sup> | pourcentage de surface occupée par le sable % |
|-------|----------------------------------|--|---|
| 2003  | 334717,23                        | 126710,64                                      | 37,85   |
| 2007  | 318485,63                        | 156533,44                                      | 49,14   |
| 2009  | 270654,39                        | 151000,38                                      | 55,79   |
| 2011  | 255426,73                        | 151578,64                                      | 59,34   |
| 2012  | 260279,49                        | 139367,10                                      | 53,54   |
| 2013  | 256640,25                        | 115458,87                                      | 44,98   |
| 2016  | 253967,03                        | 128011,63                                      | 50,40   |

**Tableau 4 : Résultats des calculs de surface pour chaque image**

Les résultats montrent que les surfaces occupées par les dunes de sables diffèrent d'une image à autre. En 2003 les dunes de sable représentent à peu près un tiers de la surface totale étudiée, alors qu'en 2016 la moitié de la zone est devenue occupée par le sable.

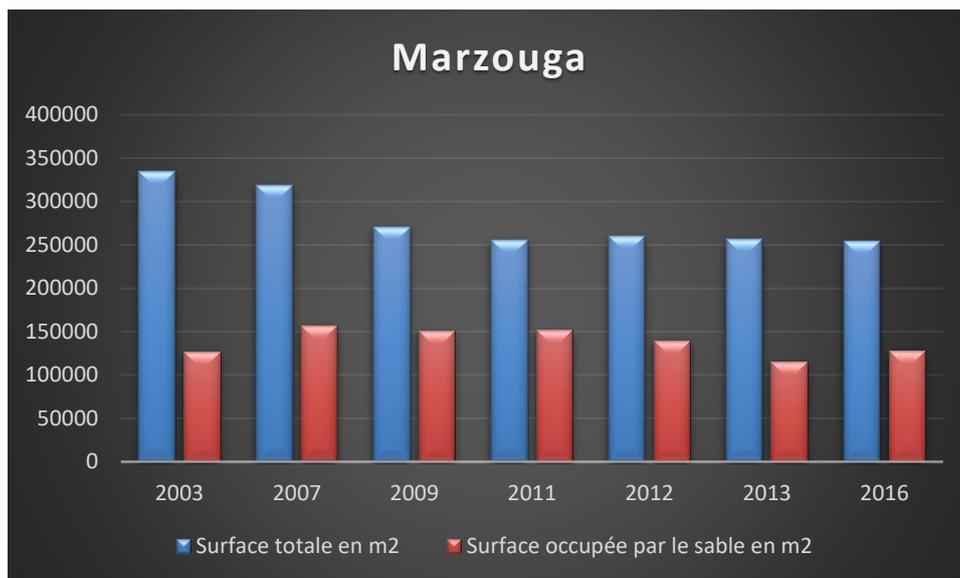


Figure 20 : Variation des surfaces occupées par les dunes (2003-2016)

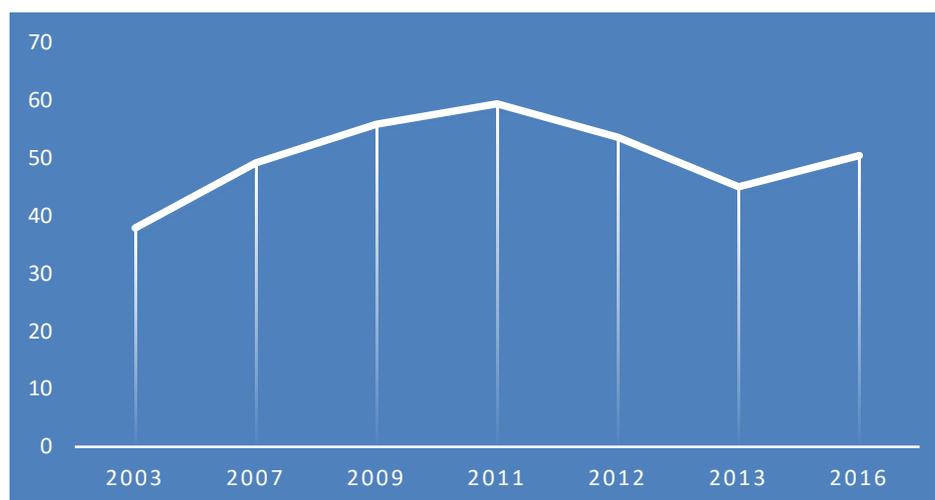


Figure 21 : Pourcentage de surface occupée par le sable

D'après le diagramme (figure 19), on constate que la zone d'étude a connu une évolution importante au niveau des espaces occupés par les dunes sableuses pour la période d'études.

La courbe (figure 20) illustre la variation du pourcentage des dunes sableuses par rapport à la surface totale. On remarque qu'en 2003, les dunes ne représentent que 33% de la surface totale. Ce pourcentage a évolué au cours des années, pour atteindre presque 60% en 2011, puis une diminution jusqu'à 45% en 2013, et après cet date le niveau des surfaces occupées par les dunes augmente d'une manière continue et atteint 50% en 2016.

## 2. Le taux de déplacement des dunes

Afin d'avoir une idée sur le sens des mouvements et de calculer les vitesses de déplacement des dunes de sables annuellement, on a objet à déterminer les distances de déplacement des dunes entre deux temps ( $t_1$  et  $t_2$ ), c'est à dire entre deux images successives.

Les résultats sont les suivants :

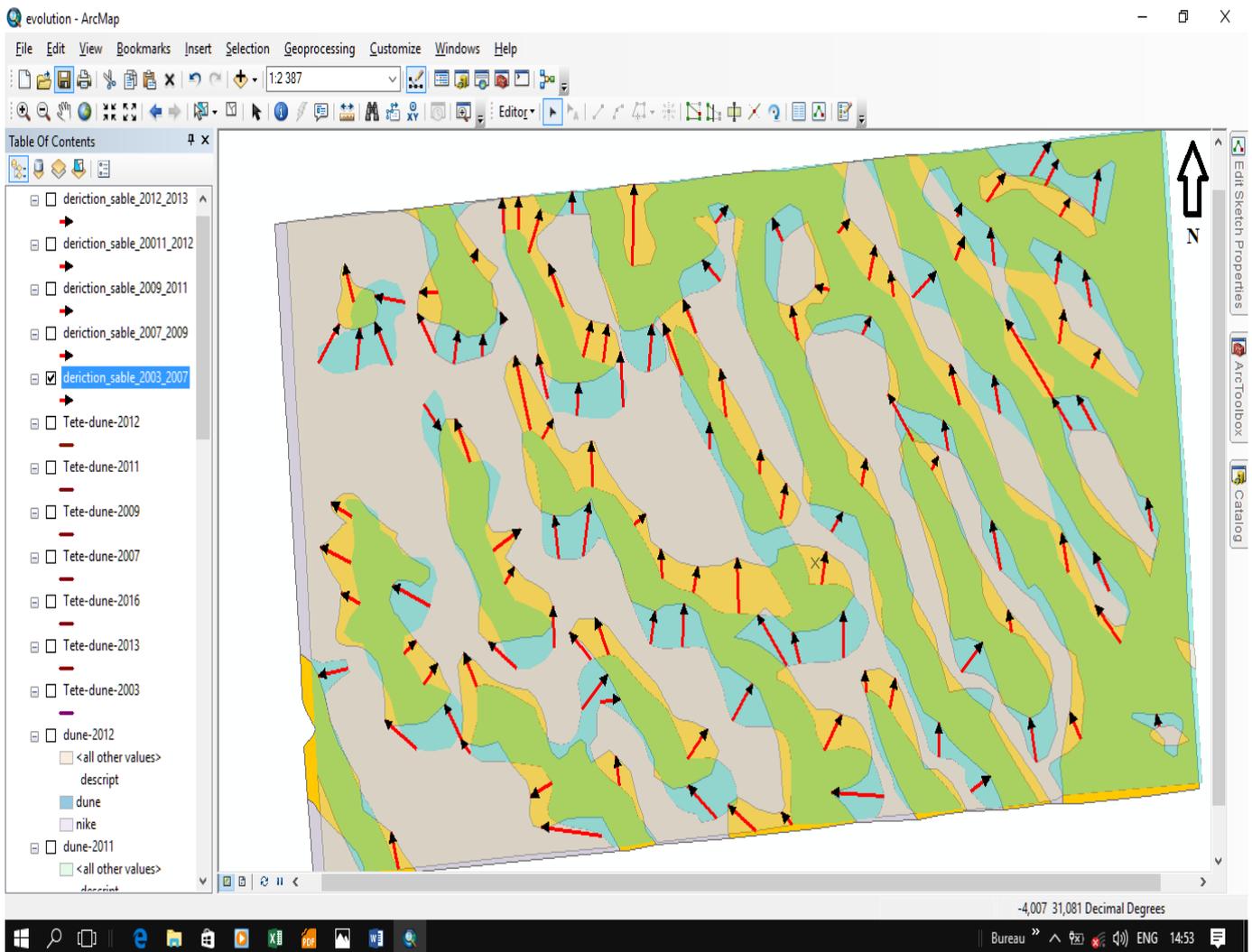


Figure 22 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 13-07-2003 et 30-03-2007

Le figure 21 montre la situation des dunes de sables en 13-07-2003 (couleur bleu), est leur nouvelle situation en 30-03-2007. La couleur verte présente les zones qui ont restée ensablées entre les deux dates d'étude.

Le sens et la distance du déplacement sont illustrés par des flèches rouges.

## Apport de l'imagerie spatiale à la quantification des mouvements des dunes de sable de Marzouga

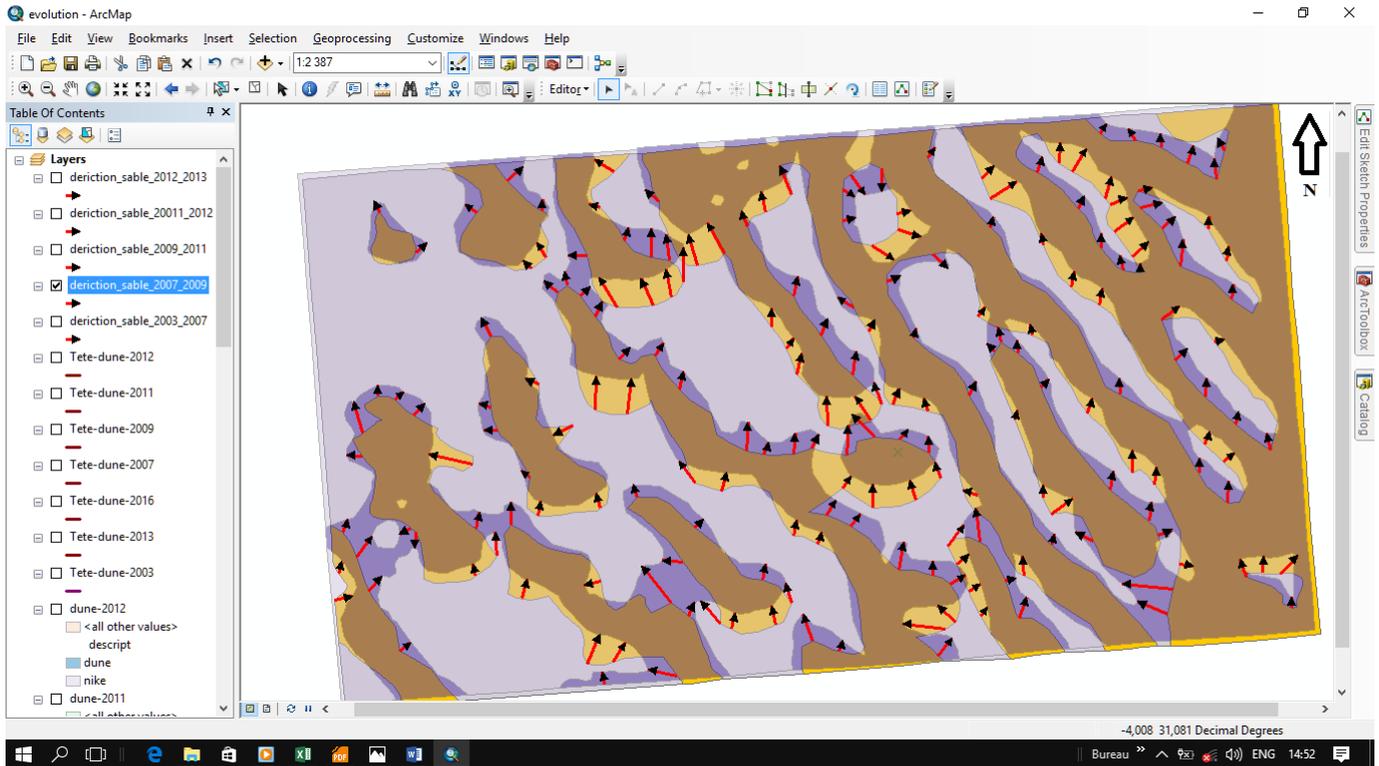


Figure 23 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 16-08-2009 et 30-03-2007

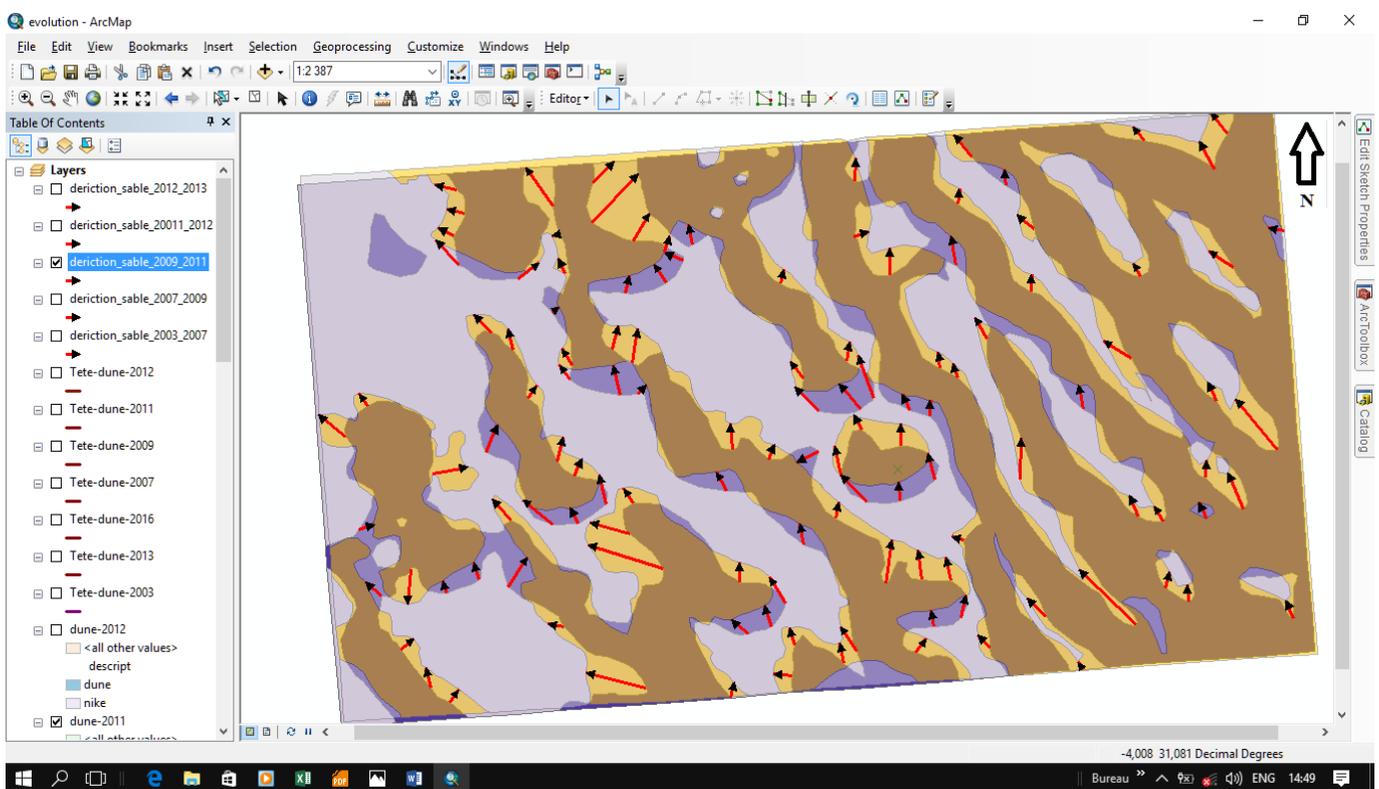


Figure 24 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 14-07-2011 et 16-08-2009

## Apport de l'imagerie spatiale à la quantification des mouvements des dunes de sable de Marzouga

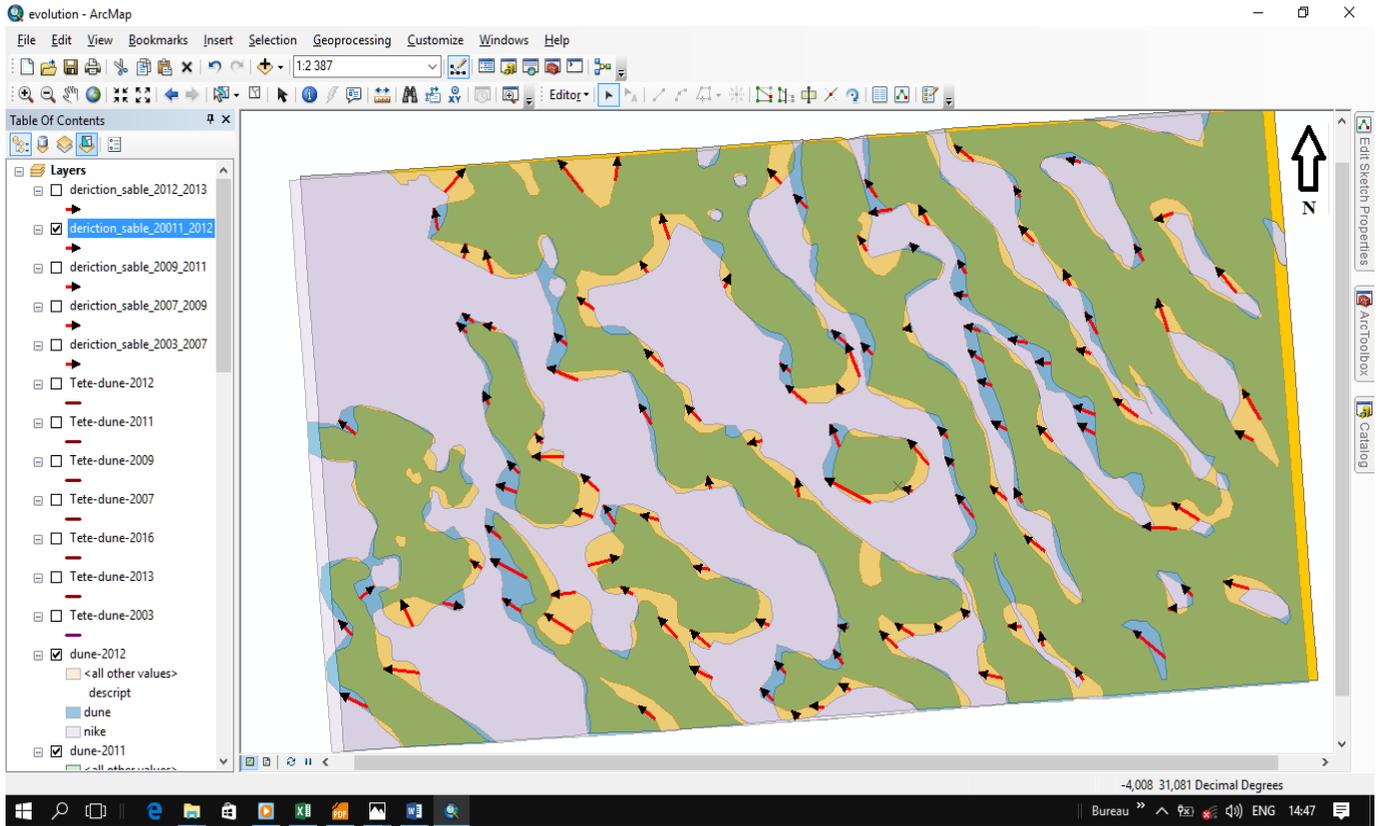


Figure 25 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 23-09-2012 et 14-07-2011

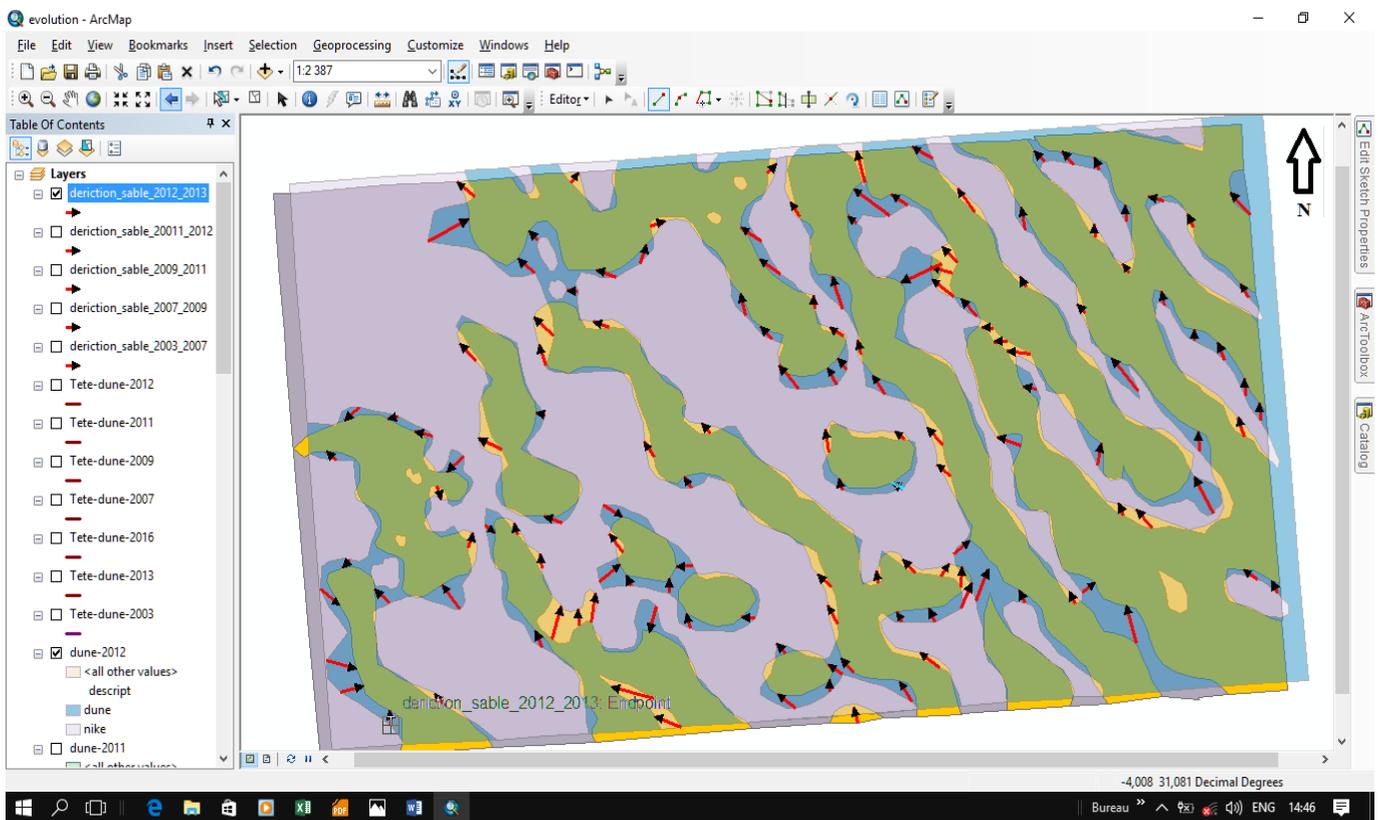
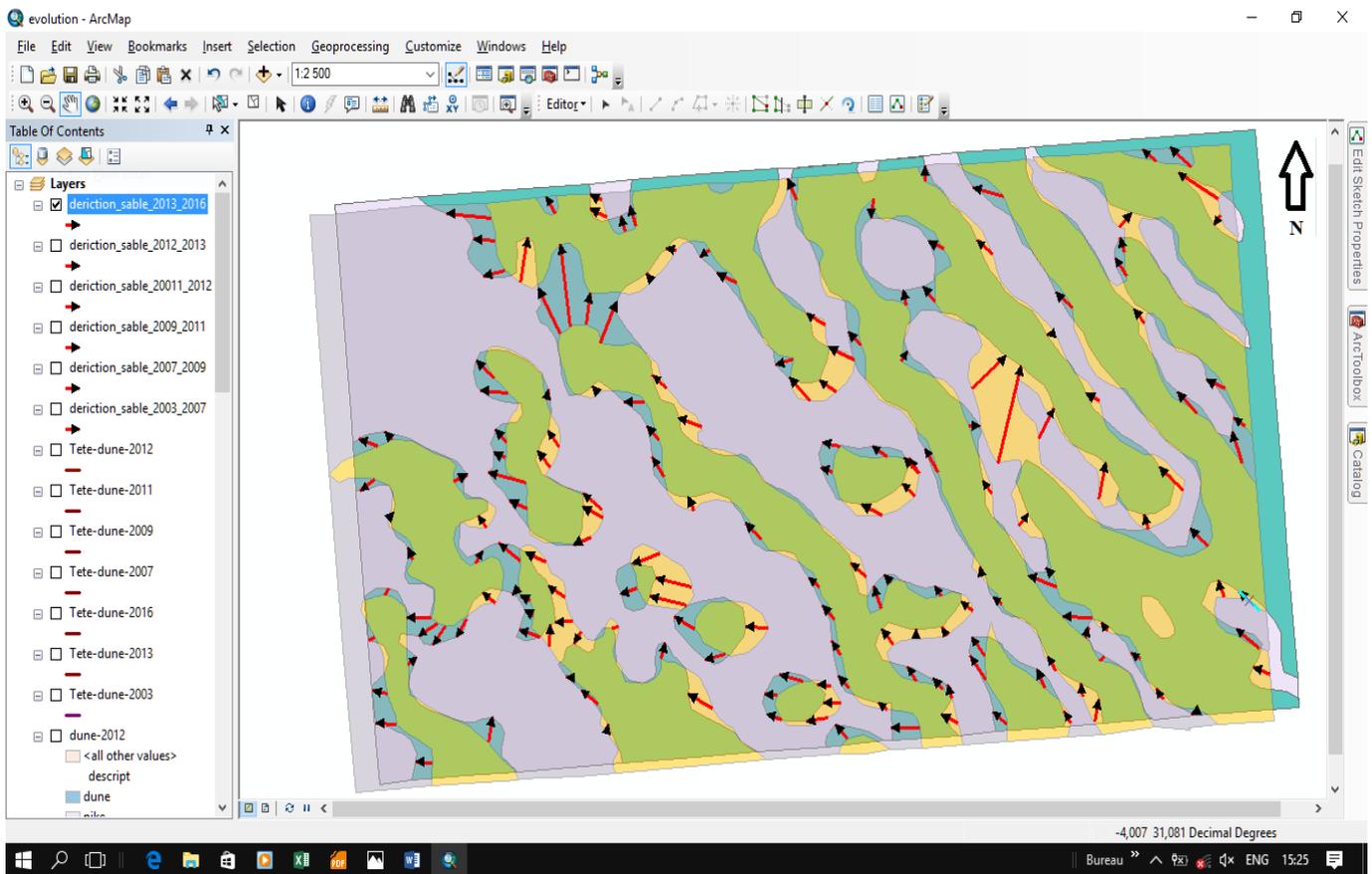


Figure 26 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 07-11-2013 et 23-09-2012



**Figure 27 : Sens et distances de déplacement des dunes de sables entre 12-02-2016 et 07-11-2013**

Les figures montrent que les sens de déplacement des dunes, avec un déplacement dominant de direction SE-NW. Cela est logique si on compare le sens de mouvement avec les directions des vents qui règnent dans la région.

Ces résultats traduisent l'avancement remarquables des dunes de sables dans la partie Est de la zone dans les différentes images. Cela explique aussi la différence de pourcentage des surfaces occupées pas les dunes sableuses déjà signalé au début de ce chapitre.

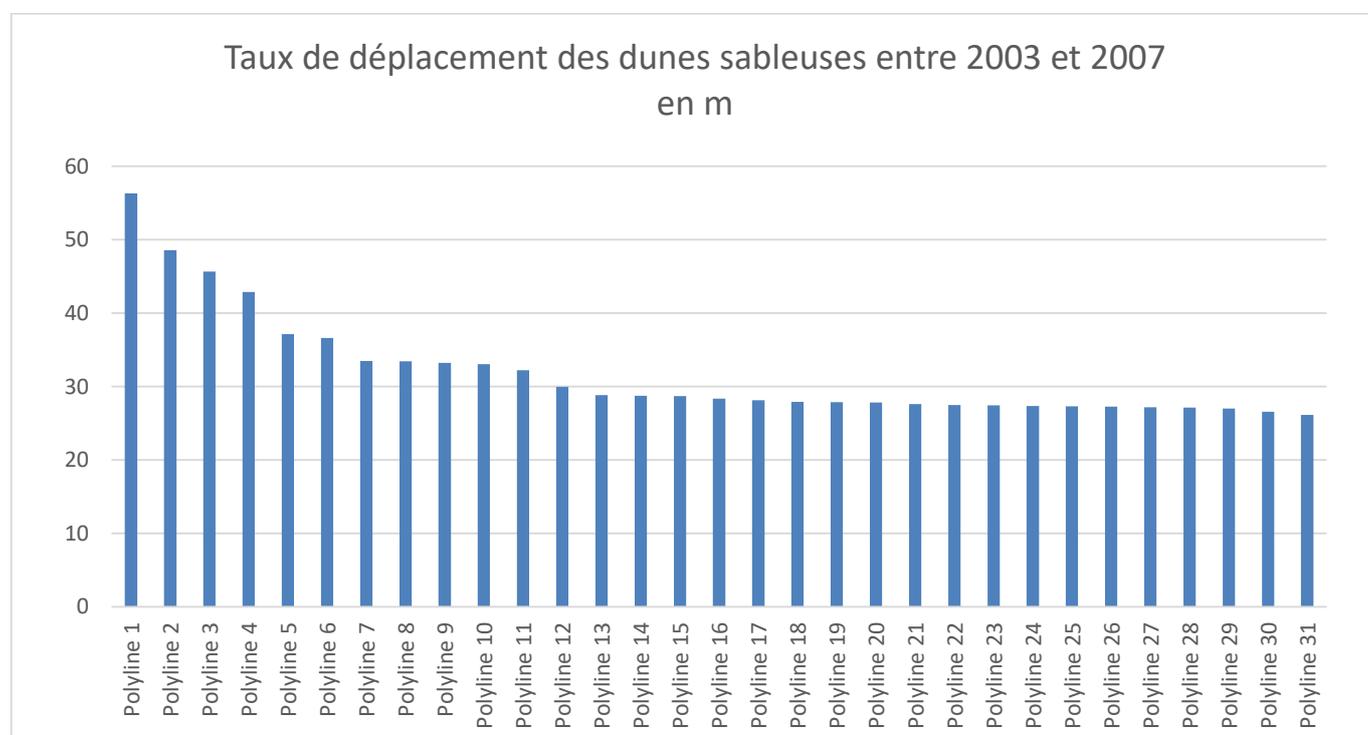
On note aussi qu'entre 2003 et 2011, le taux de déplacement est important. Ceci est dû au climat de la zone en cette période qui est un climat très sec et en absence de précipitations. Entre 2011 et 2016, une diminution de déplacement a eu lieu à cause de la pluviométrie en cette période, qui rend les grains de sable difficile à arracher et les transporter par le vent.

❖ Résultats de calculs des vitesses des déplacements par an des dunes de sables à Marzouga.

Pour calculer les vitesses de déplacements des dunes sableuse annuellement on a fait référence à la distance de mouvement des dunes entre les images étudiées et les dates qui les séparent.

Les déplacements sont nombreux, alors on a choisi les plus importantes mouvements (déplacement maximale) entre deux images qui se suivent.

Les résultats sont les suivants (voir annexes 2 pour plus de détail) :



**Figure 28 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 13-07-2003 et 30-03-2007**

Comme montre le Graphe, en une durée de 4 ans, les mouvements des dunes de sables diffèrent d'un côté à l'autre. La distance maximale enregistrée entre les deux images est de 56 m.

Par utilisation du logiciel ArcGis, on a pu déterminer annuellement, la vitesse avec laquelle les dunes se déplacent.

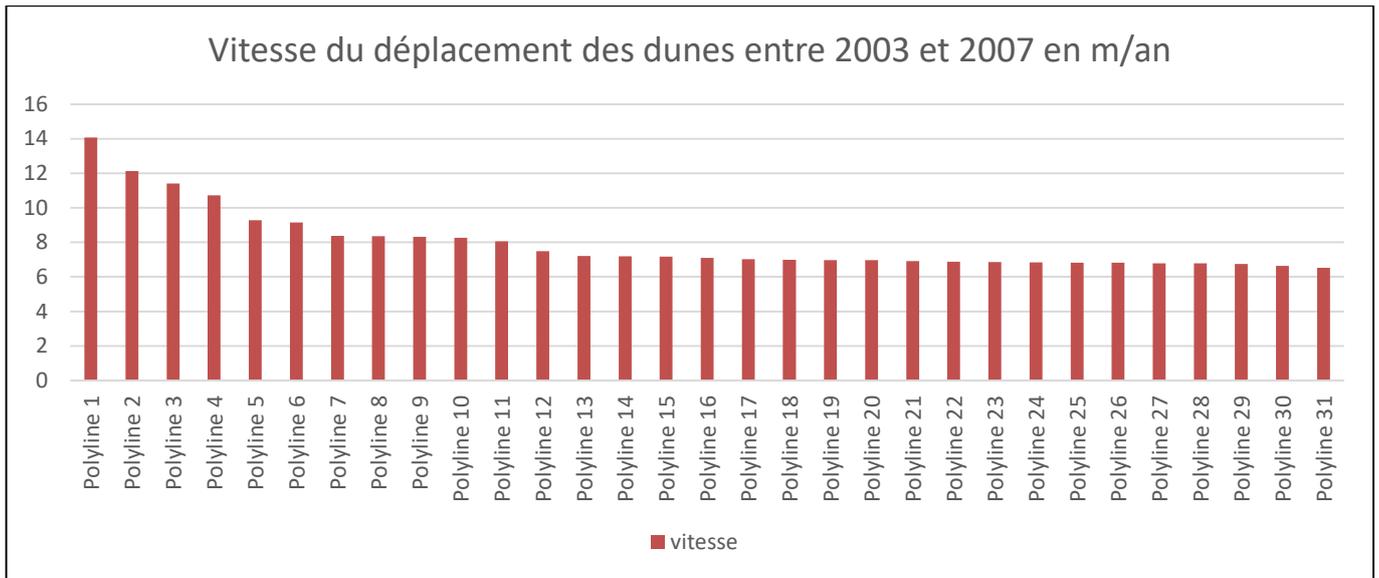


Figure 29 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 13-07-2003 et 30-03-2007

D'après le diagramme (figure 28), on remarque que la vitesse de déplacements annuel des dunes de sables varie d'un côté à l'autre, et peut arriver jusqu'à 14 m/an.

Les figures 29 à 38 montrent es autres résultats des distances et vitesses annules obtenues entre les différentes images.

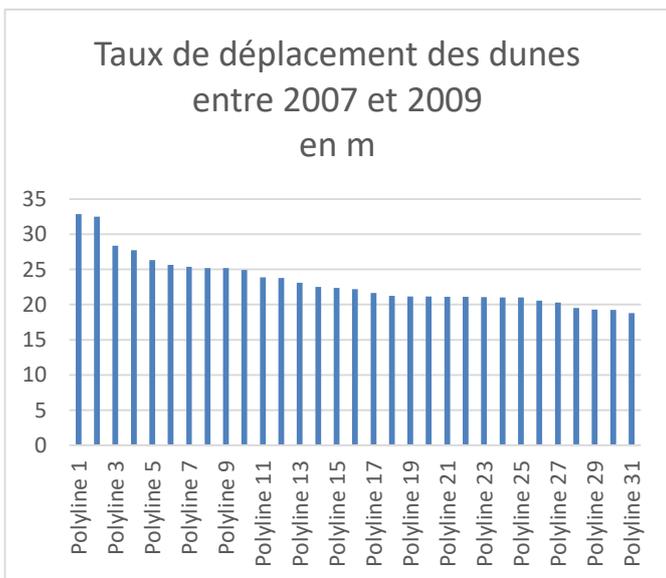


Figure 30 : Distance de déplacement des dunes de sables entre 30-03-2007 et 16-08-2009

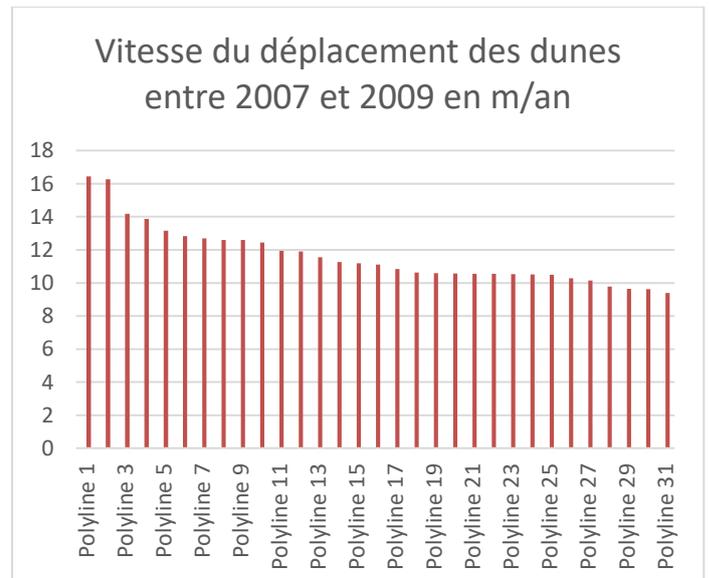


Figure 31 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 30-03-2007 et 16-08-2009

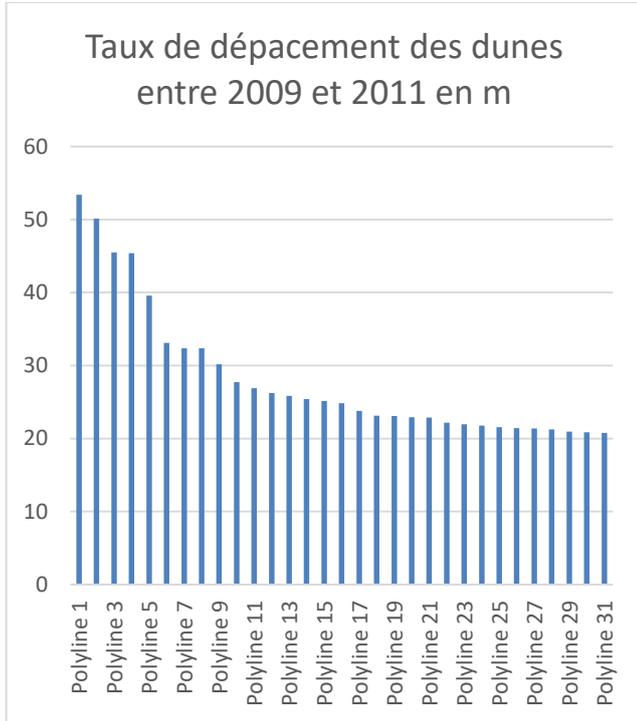


Figure 32 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 16-08-2009 et 14-07-2011

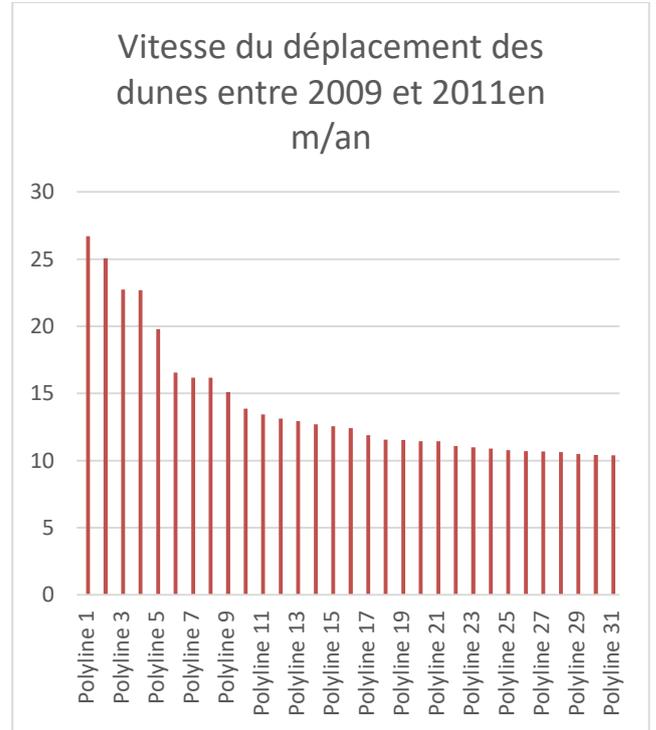


Figure 33 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 16-08-2009 et 14-07-2011

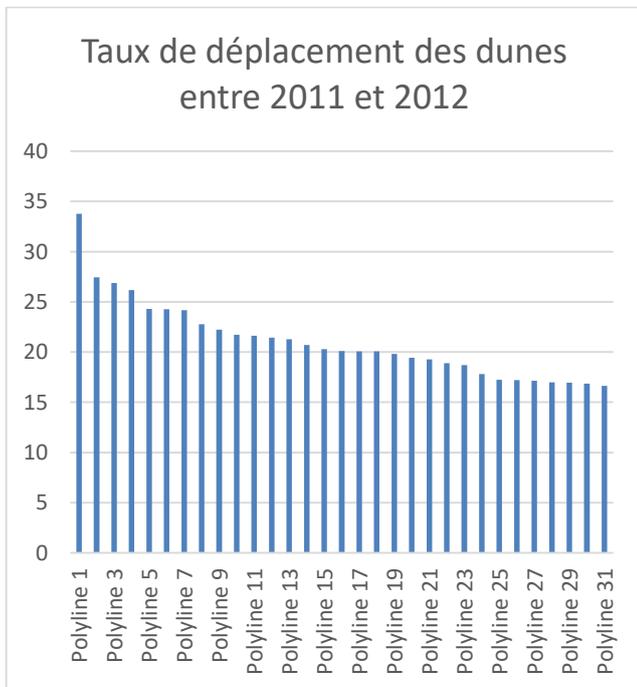


Figure 34 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 14-07-2011 et 23-09-2012

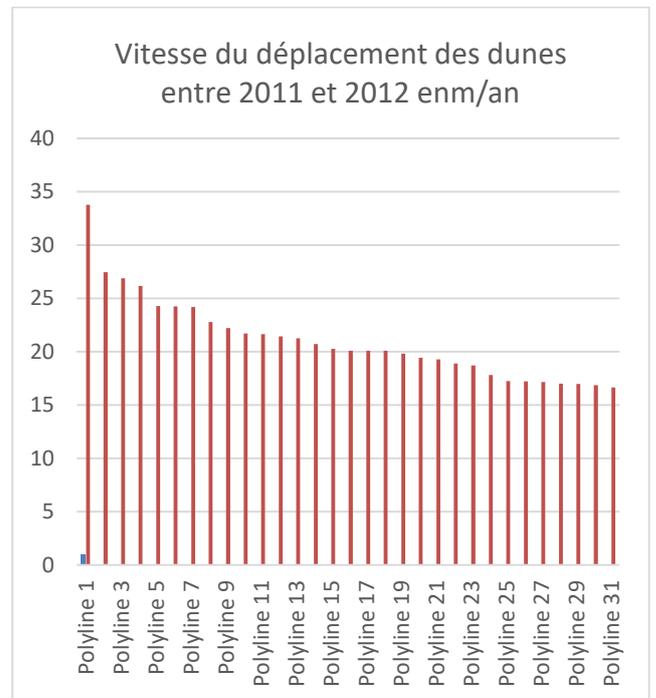


Figure 35 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 14-07-2011 et 23-09-2012

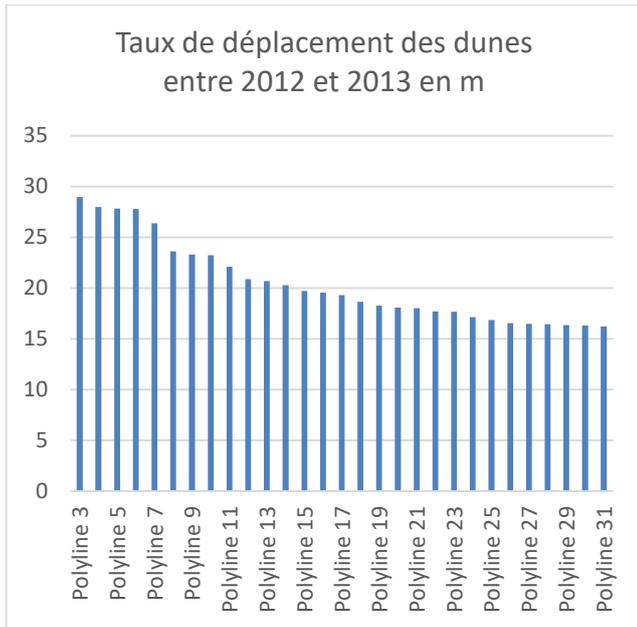


Figure 36 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 23-09-2012 et 07-11-2013

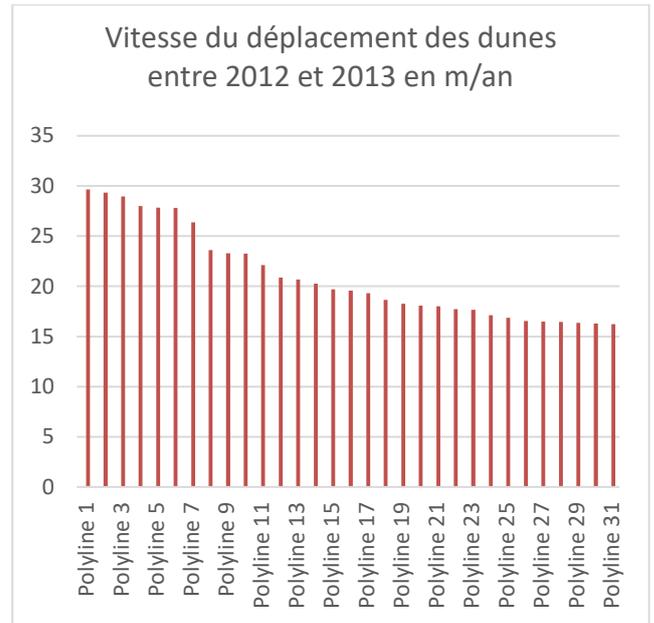


Figure 37 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 23-09-2012 et 07-11-2013

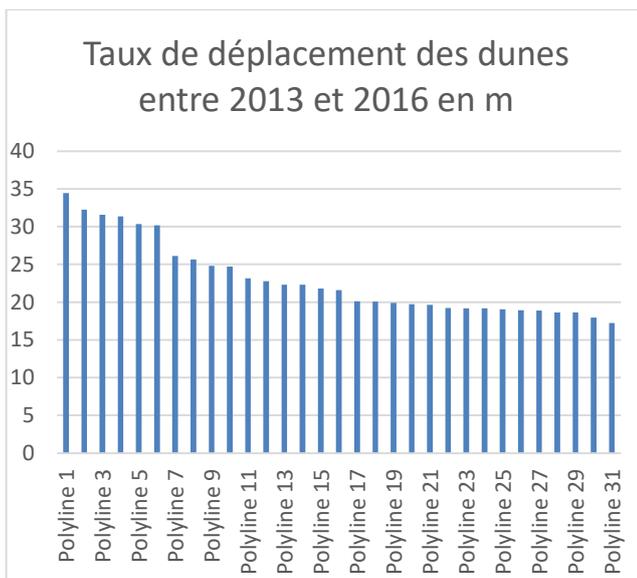


Figure 38 : Distances de déplacement des dunes de sables entre 07-11-2013 et 12-02-2016

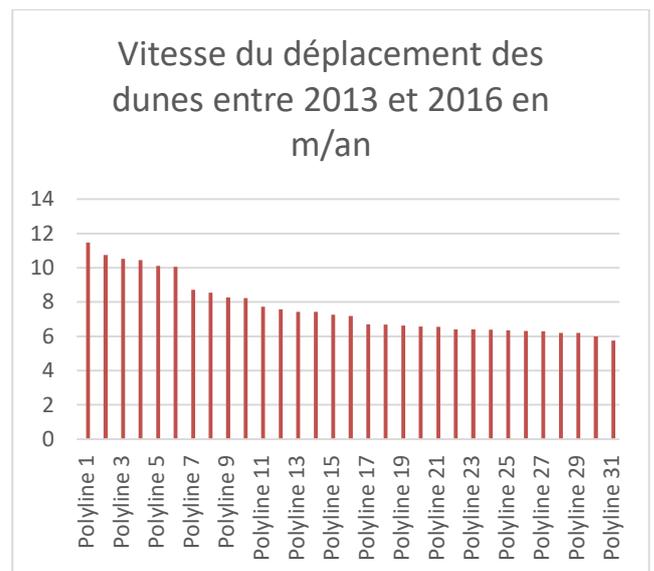


Figure 39 : Vitesse de déplacement des dunes de sables entre 07-11-2013 et 12-02-2016

Les résultats obtenus montrent que la vitesse de déplacement des dunes de sables varie annuellement.

Les vitesses maximales enregistrées entre les différentes images sont :

| Année  | 2003-2007 | 2007-2009 | 2009-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2016 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| vitesse maximale enregistrée en mètre par an | 14,07811  | 16,43988  | 26,69464  | 33,76361  | 29,64552  | 11,4745   |

**Tableau 5 : Résultats de calcul des vitesses annuelles entre chaque deux images.**

Dans la région de Marzouga, entre 2003 et 2016, la dominance des vents au printemps et en été a été indiscutable, ces vents efficaces provoquent la migration des dunes sableuses (Erg Chebbi) dans des sens multidirectionnelles, avec une dominance des vents SE-NW.

À Marzouga, le résultat indique un déplacement de dunes vers le NW observable pendant les années d'étude. Les vitesses calculées, valeur considérée comme moyenne à faible, pourrait expliquer la présence des dunes pyramidales dans ce secteur. Mais celle-ci peut aussi être justifiée par la grande disponibilité du matériel sableux dans ce secteur qui a pu donner naissance à des dunes pyramidales, étant donnée la forte variabilité directionnelle.

## Conclusion générale

Sur ce travail nous avons essayé, en exploitant des données de télédétection et l'outil SIG, de comprendre les mécanismes de l'ensablement et de quantifier les mouvements des dunes de sables dans la région de Marzouga appelés aussi Erg Chebbi.

Notre étude a commencé par la présentation du contexte géographique de la zone d'étude. Marzouga fait partie de la plaine de Tafilalt au Sud-Est du Maroc. La morpho-géologie de la région de Marzouga est dans son ensemble, favorable à une dynamique éolienne. Les formations lithologiques fournissent un stock de sable mobilisable, ce qui facilite l'action de l'ensablement sous l'effet des vents dominants.

L'analyse de l'évolution des conditions climatiques entre les périodes 2003 et 2016 de la région montre qu'ils ne sont guère favorables à une stabilité du phénomène, c'est un climat désertique caractérisé par une faible pluviométrie moyenne, et irrégulière (<200 mm). Cette pluviométrie est accompagnée par une température élevée et par des vents multidirectionnels fréquents (SE-NW, W-E, SSE-NNW), dont la vitesse mensuelle dépasse les 29Km/h. Ces vents sont responsables de la mobilisation des sables accumulés en forme pyramidale.

Le sens de migration potentielle de sable se fait dans de multiple directions, principalement du SE vers le NW en relation avec la force éolienne qui domine dans la région. Le suivi de ce déplacement durant la période d'étude montre que les surfaces occupées par le sable sont de plus en plus importante d'une année à autre (de 33% en 2003 à 60% en 2011 de la surface totale de la zone étudiée). De plus, les vitesses de migration annuelles montrent l'existence d'un déplacement de sable qui se fait sur de longues distances, 33,98 m entre 2011 et 2012.

A l'issue de cette étude, il apparaît que les méthodes numériques de traitement supervisé des données satellitales apportent une contribution tout à fait performante au suivi de l'évolution du phénomène de l'ensablement. Il est donc recommandé d'utiliser conjointement l'analyse des données anémométriques et des observations de terrain avec les outils d'étude modernes (images spatiales haute résolution et multi temporelles) pour déterminer le comportement des flux sableux et définir ainsi une stratégie pour combattre l'ensablement dans une région où les mouvements des sables sont très complexes.

## Annexes 1

| Shape *    | Description | Surface-polygone en m <sup>2</sup> |
|------------|-------------|------------------------------------|
| Polygon 1  | dune        | 3133,741195                        |
| Polygon 2  | dune        | 4388,989932                        |
| Polygon 3  | dune        | 5699,960176                        |
| Polygon 4  | dune        | 2640,233751                        |
| Polygon 5  | dune        | 3192,1166                          |
| Polygon 6  | dune        | 77980,6743                         |
| Polygon 7  | dune        | 1827,604666                        |
| Polygon 8  | dune        | 17334,94337                        |
| Polygon 9  | dune        | 8501,89232                         |
| Polygon 10 | dune        | 2010,490084                        |
| Polygon 11 | vide        | 99810,62295                        |
| Polygon 12 | vide        | 716,709296                         |
| Polygon 13 | vide        | 89307,88087                        |
| Polygon 14 | vide        | 1010,165044                        |
| Polygon 15 | vide        | 2135,487145                        |
| Polygon 16 | vide        | 134,785867                         |
| Polygon 17 | vide        | 220,359473                         |
| Polygon 18 | vide        | 13752,99946                        |
| Polygon 19 | vide        | 917,575223                         |

**Tableau 6 : Résultats des calculs de surface pour l'image 13-07-2003**

| Shape *    | Description | Surface-polygone en m <sup>2</sup> |
|------------|-------------|------------------------------------|
| Polygon 1  | dune        | 4405,32666                         |
| Polygon 2  | dune        | 3318,80519                         |
| Polygon 3  | dune        | 5780,14832                         |
| Polygon 4  | dune        | 3269,17758                         |
| Polygon 5  | dune        | 15863,6207                         |
| Polygon 6  | dune        | 2452,7835                          |
| Polygon 7  | dune        | 109363,399                         |
| Polygon 8  | dune        | 5897,12442                         |
| Polygon 9  | dune        | 5505,65134                         |
| Polygon 10 | dune        | 677,404538                         |
| Polygon 11 | vide        | 2587,99459                         |
| Polygon 12 | vide        | 1630,46306                         |
| Polygon 13 | vide        | 1787,47069                         |
| Polygon 14 | vide        | 1646,69084                         |
| Polygon 15 | vide        | 18150,3901                         |
| Polygon 16 | vide        | 101999,074                         |
| Polygon 17 | vide        | 18150,3901                         |
| Polygon 18 | vide        | 1787,47069                         |
| Polygon 19 | vide        | 448,003093                         |
| Polygon 20 | vide        | 1036,68361                         |
| Polygon 21 | vide        | 2587,99459                         |
| Polygon 22 | vide        | 1646,69084                         |
| Polygon 23 | vide        | 6451,58433                         |
| Polygon 24 | vide        | 2041,29102                         |

**Tableau 7 : Résultats des calculs de surface pour l'image 30-03-2007**

| Shape *    | Description | Surface-polygone en m <sup>2</sup> |
|------------|-------------|------------------------------------|
| Polygon 1  | dune        | 2186,406793                        |
| Polygon 2  | dune        | 18679,80046                        |
| Polygon 3  | dune        | 4659,22032                         |
| Polygon 4  | dune        | 967,730769                         |
| Polygon 5  | dune        | 22350,5323                         |
| Polygon 6  | dune        | 98504,93976                        |
| Polygon 7  | dune        | 3651,758295                        |
| Polygon 8  | vide        | 1665,107912                        |
| Polygon 9  | vide        | 27875,60962                        |
| Polygon 10 | vide        | 50554,35803                        |
| Polygon 11 | vide        | 275,488972                         |
| Polygon 12 | vide        | 12175,10776                        |
| Polygon 13 | vide        | 31,362246                          |
| Polygon 14 | vide        | 6079,448003                        |
| Polygon 15 | vide        | 6471,097364                        |
| Polygon 16 | vide        | 2966,849806                        |
| Polygon 17 | vide        | 804,246877                         |
| Polygon 18 | vide        | 2471,758986                        |
| Polygon 19 | vide        | 1582,255425                        |
| Polygon 20 | vide        | 2233,313028                        |
| Polygon 21 | vide        | 1715,436156                        |
| Polygon 22 | vide        | 373,266704                         |
| Polygon 23 | vide        | 1000,579662                        |
| Polygon 24 | vide        | 519,856293                         |
| Polygon 25 | vide        | 584,280292                         |
| Polygon 26 | vide        | 48,08604                           |
| Polygon 27 | vide        | 39,813725                          |
| Polygon 28 | vide        | 137,091701                         |
| Polygon 29 | vide        | 49,596289                          |

**Tableau 8 : Résultats des calculs de surface pour l'image 16-08-2009**

| Shape *    | Description | Surface-polygone en m <sup>2</sup> |
|------------|-------------|------------------------------------|
| Polygon 1  | dune        | 4549,857718                        |
| Polygon 2  | dune        | 4338,902029                        |
| Polygon 3  | dune        | 35935,74043                        |
| Polygon 4  | dune        | 2337,443193                        |
| Polygon 5  | dune        | 83209,41549                        |
| Polygon 6  | dune        | 7739,530592                        |
| Polygon 7  | dune        | 13467,75633                        |
| Polygon 8  | vide        | 56472,80232                        |
| Polygon 9  | vide        | 24892,26976                        |
| Polygon 10 | vide        | 9396,578799                        |
| Polygon 11 | vide        | 4300,076728                        |
| Polygon 12 | vide        | 753,932215                         |
| Polygon 13 | vide        | 206,38369                          |
| Polygon 14 | vide        | 1829,570111                        |
| Polygon 15 | vide        | 974,195214                         |
| Polygon 16 | vide        | 1136,640303                        |
| Polygon 17 | vide        | 71,810922                          |
| Polygon 18 | vide        | 105,042011                         |
| Polygon 19 | vide        | 308,436366                         |
| Polygon 20 | vide        | 413,479019                         |
| Polygon 21 | vide        | 368,826234                         |
| Polygon 22 | vide        | 410,079203                         |
| Polygon 23 | vide        | 174,733654                         |
| Polygon 24 | vide        | 45,952054                          |
| Polygon 25 | vide        | 48,507049                          |
| Polygon 26 | vide        | 272,306206                         |
| Polygon 27 | vide        | 735,879166                         |
| Polygon 28 | vide        | 930,585942                         |

**Tableau 9 : Résultats des calculs de surface pour l'image 14-07-2011**

## Apport de l'imagerie spatiale à la quantification des mouvements des dunes de sable de Marzouga

| Shape *    | Description | Surface-polygone en m <sup>2</sup> |
|------------|-------------|------------------------------------|
| Polygon 1  | dune        | 78859,61481                        |
| Polygon 2  | dune        | 2060,369226                        |
| Polygon 3  | dune        | 30571,25011                        |
| Polygon 4  | dune        | 7113,876748                        |
| Polygon 5  | dune        | 4344,017059                        |
| Polygon 6  | dune        | 3913,468855                        |
| Polygon 7  | dune        | 12504,50444                        |
| Polygon 8  | vide        | 710,809618                         |
| Polygon 9  | vide        | 1833,427975                        |
| Polygon 10 | vide        | 1525,356669                        |
| Polygon 11 | vide        | 2043,209773                        |
| Polygon 12 | vide        | 288,41241                          |
| Polygon 13 | vide        | 766,392249                         |
| Polygon 14 | vide        | 1066,926388                        |
| Polygon 15 | vide        | 28298,99693                        |
| Polygon 16 | vide        | 14468,67179                        |
| Polygon 17 | vide        | 188,798237                         |
| Polygon 18 | vide        | 117,152869                         |
| Polygon 19 | vide        | 63,183388                          |
| Polygon 20 | vide        | 55,753016                          |
| Polygon 21 | vide        | 457,448072                         |
| Polygon 22 | vide        | 63535,57439                        |
| Polygon 23 | vide        | 1014,802552                        |
| Polygon 24 | vide        | 112,949343                         |
| Polygon 25 | vide        | 3951,151672                        |
| Polygon 26 | vide        | 305,126017                         |
| Polygon 27 | vide        | 40,943135                          |
| Polygon 28 | vide        | 67,302621                          |

**Tableau 10 : Résultats des calculs de surface pour l'image 23-09-2012**

| Shape *    | Description | Surface-polygone en m <sup>2</sup> |
|------------|-------------|------------------------------------|
| Polygon 1  | dune        | 7899,886817                        |
| Polygon 2  | dune        | 12341,49562                        |
| Polygon 3  | dune        | 13895,12264                        |
| Polygon 4  | dune        | 1986,429917                        |
| Polygon 5  | dune        | 59036,45381                        |
| Polygon 6  | dune        | 3808,556672                        |
| Polygon 7  | dune        | 2142,072636                        |
| Polygon 8  | dune        | 6090,959963                        |
| Polygon 9  | dune        | 4331,404214                        |
| Polygon 10 | dune        | 1258,258211                        |
| Polygon 11 | dune        | 1361,232546                        |
| Polygon 12 | dune        | 1014,124594                        |
| Polygon 13 | dune        | 292,874964                         |
| Polygon 14 | vide        | 114933,4375                        |
| Polygon 15 | vide        | 8876,755935                        |
| Polygon 16 | vide        | 859,061781                         |
| Polygon 17 | vide        | 2407,363435                        |
| Polygon 18 | vide        | 1711,974302                        |
| Polygon 19 | vide        | 249,404213                         |
| Polygon 20 | vide        | 397,180897                         |
| Polygon 21 | vide        | 2174,888618                        |
| Polygon 22 | vide        | 8849,499279                        |
| Polygon 23 | vide        | 721,815456                         |

**Tableau 11 : Résultats des calculs de surface pour l'image 07-11-2013**

| Shape *    | Description | Surface-polygone en m <sup>2</sup> |
|------------|-------------|------------------------------------|
| Polygon 1  | dune        | 4617,359723                        |
| Polygon 2  | dune        | 12929,18494                        |
| Polygon 3  | dune        | 5253,011548                        |
| Polygon 4  | dune        | 1041,620515                        |
| Polygon 5  | dune        | 1481,707369                        |
| Polygon 6  | dune        | 634,213114                         |
| Polygon 7  | dune        | 344,212701                         |
| Polygon 8  | dune        | 29637,75704                        |
| Polygon 9  | dune        | 1861,392782                        |
| Polygon 10 | dune        | 67812,73932                        |
| Polygon 11 | dune        | 2398,44006                         |
| Polygon 12 | vide        | 61927,61533                        |
| Polygon 13 | vide        | 3499,293421                        |
| Polygon 14 | vide        | 31605,16441                        |
| Polygon 15 | vide        | 16344,45407                        |
| Polygon 16 | vide        | 1947,271721                        |
| Polygon 17 | vide        | 1115,074216                        |
| Polygon 18 | vide        | 1850,336652                        |
| Polygon 19 | vide        | 401,133063                         |
| Polygon 20 | vide        | 704,913148                         |
| Polygon 21 | vide        | 629,932582                         |
| Polygon 22 | vide        | 5930,209565                        |

**Tableau 12 : Résultats des calculs de surface pour l'image 12-02-2016**

## Annexes 2

| Shape *     | Distance de déplacement en m | Vitesse de déplacement en m/an |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|
| Polyline 1  | 56,31245                     | 14,07811                       |
| Polyline 2  | 48,56054                     | 12,14013                       |
| Polyline 3  | 45,65268                     | 11,41317                       |
| Polyline 4  | 42,90598                     | 10,7265                        |
| Polyline 5  | 37,14859                     | 9,287148                       |
| Polyline 6  | 36,62549                     | 9,156373                       |
| Polyline 7  | 33,50986                     | 8,377466                       |
| Polyline 8  | 33,44182                     | 8,360456                       |
| Polyline 9  | 33,24949                     | 8,312372                       |
| Polyline 10 | 33,05886                     | 8,264714                       |
| Polyline 11 | 32,23109                     | 8,057772                       |
| Polyline 12 | 29,95591                     | 7,488977                       |
| Polyline 13 | 28,82485                     | 7,206213                       |
| Polyline 14 | 28,75653                     | 7,189132                       |
| Polyline 15 | 28,7039                      | 7,175974                       |
| Polyline 16 | 28,37475                     | 7,093688                       |
| Polyline 17 | 28,12619                     | 7,031547                       |
| Polyline 18 | 27,9232                      | 6,980801                       |
| Polyline 19 | 27,86201                     | 6,965503                       |
| Polyline 20 | 27,84852                     | 6,96213                        |
| Polyline 21 | 27,63877                     | 6,909691                       |
| Polyline 22 | 27,51015                     | 6,877538                       |
| Polyline 23 | 27,45983                     | 6,864957                       |
| Polyline 24 | 27,3617                      | 6,840425                       |
| Polyline 25 | 27,32348                     | 6,83087                        |
| Polyline 26 | 27,25731                     | 6,814327                       |
| Polyline 27 | 27,1722                      | 6,79305                        |
| Polyline 28 | 27,1381                      | 6,784524                       |
| Polyline 29 | 27,02301                     | 6,755754                       |
| Polyline 30 | 26,56495                     | 6,641238                       |
| Polyline 31 | 26,1249                      | 6,531224                       |

**Tableau 13 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 13-07-2003 et 30-03-2007**

| Shape *     | Distance de déplacement en m | Vitesse de déplacement en m/an |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|
| Polyline 1  | 32,879755                    | 16,43988                       |
| Polyline 2  | 32,519242                    | 16,25962                       |
| Polyline 3  | 28,37754                     | 14,18877                       |
| Polyline 4  | 27,755683                    | 13,87784                       |
| Polyline 5  | 26,336442                    | 13,16822                       |
| Polyline 6  | 25,663668                    | 12,83183                       |
| Polyline 7  | 25,37726                     | 12,68863                       |
| Polyline 8  | 25,216599                    | 12,6083                        |
| Polyline 9  | 25,21607                     | 12,60804                       |
| Polyline 10 | 24,905256                    | 12,45263                       |
| Polyline 11 | 23,885475                    | 11,94274                       |
| Polyline 12 | 23,80601                     | 11,90301                       |
| Polyline 13 | 23,099123                    | 11,54956                       |
| Polyline 14 | 22,537893                    | 11,26895                       |
| Polyline 15 | 22,393347                    | 11,19667                       |
| Polyline 16 | 22,218729                    | 11,10936                       |
| Polyline 17 | 21,675034                    | 10,83752                       |
| Polyline 18 | 21,264458                    | 10,63223                       |
| Polyline 19 | 21,161381                    | 10,58069                       |
| Polyline 20 | 21,155211                    | 10,57761                       |
| Polyline 21 | 21,095091                    | 10,54755                       |
| Polyline 22 | 21,09223                     | 10,54611                       |
| Polyline 23 | 21,053305                    | 10,52665                       |
| Polyline 24 | 21,011792                    | 10,5059                        |
| Polyline 25 | 21,005823                    | 10,50291                       |
| Polyline 26 | 20,578855                    | 10,28943                       |
| Polyline 27 | 20,301259                    | 10,15063                       |
| Polyline 28 | 19,544122                    | 9,772061                       |
| Polyline 29 | 19,287391                    | 9,643696                       |
| Polyline 30 | 19,259594                    | 9,629797                       |
| Polyline 31 | 18,784763                    | 9,392382                       |

**Tableau 14 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 30-03-2007 et 16-08-2009**

| Shape *     | Distance de déplacement en m | Vitesse de déplacement en m/an |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|
| Polyline 1  | 53,389282                    | 26,69464                       |
| Polyline 2  | 50,113854                    | 25,05693                       |
| Polyline 3  | 45,482247                    | 22,74112                       |
| Polyline 4  | 45,370049                    | 22,68502                       |
| Polyline 5  | 39,590726                    | 19,79536                       |
| Polyline 6  | 33,096916                    | 16,54846                       |
| Polyline 7  | 32,350497                    | 16,17525                       |
| Polyline 8  | 32,340748                    | 16,17037                       |
| Polyline 9  | 30,179476                    | 15,08974                       |
| Polyline 10 | 27,733186                    | 13,86659                       |
| Polyline 11 | 26,87523                     | 13,43762                       |
| Polyline 12 | 26,242096                    | 13,12105                       |
| Polyline 13 | 25,856368                    | 12,92818                       |
| Polyline 14 | 25,389232                    | 12,69462                       |
| Polyline 15 | 25,128649                    | 12,56432                       |
| Polyline 16 | 24,841518                    | 12,42076                       |
| Polyline 17 | 23,789149                    | 11,89457                       |
| Polyline 18 | 23,132284                    | 11,56614                       |
| Polyline 19 | 23,076571                    | 11,53829                       |
| Polyline 20 | 22,90272                     | 11,45136                       |
| Polyline 21 | 22,877748                    | 11,43887                       |
| Polyline 22 | 22,189637                    | 11,09482                       |
| Polyline 23 | 21,966518                    | 10,98326                       |
| Polyline 24 | 21,79544                     | 10,89772                       |
| Polyline 25 | 21,5639                      | 10,78195                       |
| Polyline 26 | 21,417915                    | 10,70896                       |
| Polyline 27 | 21,378378                    | 10,68919                       |
| Polyline 28 | 21,264462                    | 10,63223                       |
| Polyline 29 | 20,968423                    | 10,48421                       |
| Polyline 30 | 20,840434                    | 10,42022                       |
| Polyline 31 | 20,764143                    | 10,38207                       |

**Tableau 15 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 16-08-2009 et 14-07-2011**

| Shape *     | Distance de déplacement en m | Vitesse de déplacement en m/an |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|
| Polyline 1  | 33,763606                    | 33,76361                       |
| Polyline 2  | 27,445217                    | 27,44522                       |
| Polyline 3  | 26,888396                    | 26,8884                        |
| Polyline 4  | 26,177009                    | 26,17701                       |
| Polyline 5  | 24,288975                    | 24,28897                       |
| Polyline 6  | 24,255861                    | 24,25586                       |
| Polyline 7  | 24,179046                    | 24,17905                       |
| Polyline 8  | 22,78677                     | 22,78677                       |
| Polyline 9  | 22,219891                    | 22,21989                       |
| Polyline 10 | 21,707344                    | 21,70734                       |
| Polyline 11 | 21,639752                    | 21,63975                       |
| Polyline 12 | 21,424771                    | 21,42477                       |
| Polyline 13 | 21,266367                    | 21,26637                       |
| Polyline 14 | 20,703185                    | 20,70318                       |
| Polyline 15 | 20,280017                    | 20,28002                       |
| Polyline 16 | 20,090165                    | 20,09017                       |
| Polyline 17 | 20,077731                    | 20,07773                       |
| Polyline 18 | 20,07389                     | 20,07389                       |
| Polyline 19 | 19,81601                     | 19,81601                       |
| Polyline 20 | 19,416614                    | 19,41661                       |
| Polyline 21 | 19,274112                    | 19,27411                       |
| Polyline 22 | 18,879162                    | 18,87916                       |
| Polyline 23 | 18,698242                    | 18,69824                       |
| Polyline 24 | 17,80935                     | 17,80935                       |
| Polyline 25 | 17,236295                    | 17,2363                        |
| Polyline 26 | 17,21678                     | 17,21678                       |
| Polyline 27 | 17,152335                    | 17,15233                       |
| Polyline 28 | 16,998673                    | 16,99867                       |
| Polyline 29 | 16,966002                    | 16,966                         |
| Polyline 30 | 16,871123                    | 16,87112                       |
| Polyline 31 | 16,646491                    | 16,64649                       |

**Tableau 16 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 14-07-2011 et 23-09-2012**

## Apport de l'imagerie spatiale à la quantification des mouvements des dunes de sable de Marzouga

| Shape *     | Distance de déplacement en m | Vitesse de déplacement en m/an |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|
| Polyline 1  | 29,645525                    | 29,64552                       |
| Polyline 2  | 29,337549                    | 29,33755                       |
| Polyline 3  | 28,94367                     | 28,94367                       |
| Polyline 4  | 27,984137                    | 27,98414                       |
| Polyline 5  | 27,8373                      | 27,8373                        |
| Polyline 6  | 27,793446                    | 27,79345                       |
| Polyline 7  | 26,369183                    | 26,36918                       |
| Polyline 8  | 23,60205                     | 23,60205                       |
| Polyline 9  | 23,292052                    | 23,29205                       |
| Polyline 10 | 23,243212                    | 23,24321                       |
| Polyline 11 | 22,102308                    | 22,10231                       |
| Polyline 12 | 20,876271                    | 20,87627                       |
| Polyline 13 | 20,679714                    | 20,67971                       |
| Polyline 14 | 20,279512                    | 20,27951                       |
| Polyline 15 | 19,702833                    | 19,70283                       |
| Polyline 16 | 19,56247                     | 19,56247                       |
| Polyline 17 | 19,315279                    | 19,31528                       |
| Polyline 18 | 18,640259                    | 18,64026                       |
| Polyline 19 | 18,254133                    | 18,25413                       |
| Polyline 20 | 18,08914                     | 18,08914                       |
| Polyline 21 | 18,007199                    | 18,0072                        |
| Polyline 22 | 17,70926                     | 17,70926                       |
| Polyline 23 | 17,652592                    | 17,65259                       |
| Polyline 24 | 17,123914                    | 17,12391                       |
| Polyline 25 | 16,853555                    | 16,85356                       |
| Polyline 26 | 16,548568                    | 16,54857                       |
| Polyline 27 | 16,472664                    | 16,47266                       |
| Polyline 28 | 16,448332                    | 16,44833                       |
| Polyline 29 | 16,340693                    | 16,34069                       |
| Polyline 30 | 16,300605                    | 16,3006                        |
| Polyline 31 | 16,215637                    | 16,21564                       |

**Tableau 17 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 23-09-2012 et 07-11-2013**

| Shape *     | Distance de déplacement en m | Vitesse de déplacement en m/an |
|-------------|------------------------------|--------------------------------|
| Polyline 1  | 34,42351                     | 11,4745                        |
| Polyline 2  | 32,241832                    | 10,74728                       |
| Polyline 3  | 31,563721                    | 10,52124                       |
| Polyline 4  | 31,362343                    | 10,45411                       |
| Polyline 5  | 30,33958                     | 10,11319                       |
| Polyline 6  | 30,177777                    | 10,05926                       |
| Polyline 7  | 26,120129                    | 8,70671                        |
| Polyline 8  | 25,649211                    | 8,549737                       |
| Polyline 9  | 24,785977                    | 8,261992                       |
| Polyline 10 | 24,700111                    | 8,233371                       |
| Polyline 11 | 23,162578                    | 7,72086                        |
| Polyline 12 | 22,756425                    | 7,585475                       |
| Polyline 13 | 22,317766                    | 7,439255                       |
| Polyline 14 | 22,296934                    | 7,432312                       |
| Polyline 15 | 21,79001                     | 7,263337                       |
| Polyline 16 | 21,569956                    | 7,189985                       |
| Polyline 17 | 20,095562                    | 6,698521                       |
| Polyline 18 | 20,065606                    | 6,688535                       |
| Polyline 19 | 19,883658                    | 6,627886                       |
| Polyline 20 | 19,725267                    | 6,575089                       |
| Polyline 21 | 19,650586                    | 6,550195                       |
| Polyline 22 | 19,221914                    | 6,407304                       |
| Polyline 23 | 19,194277                    | 6,398092                       |
| Polyline 24 | 19,171085                    | 6,390362                       |
| Polyline 25 | 19,044886                    | 6,348295                       |
| Polyline 26 | 18,937764                    | 6,312588                       |
| Polyline 27 | 18,890916                    | 6,296972                       |
| Polyline 28 | 18,627709                    | 6,209236                       |
| Polyline 29 | 18,612713                    | 6,204237                       |
| Polyline 30 | 17,964692                    | 5,988231                       |
| Polyline 31 | 17,244103                    | 5,748034                       |

**Tableau 18 : Distance et vitesse de déplacement des dunes de sables entre 07-11-2013 et 12-02-2016**

## Références bibliographiques

- ALALI A, BENMOHAMMADI A/ (2013) « L'ensablement dans la plaine de Tafilalet (sud-est du Maroc) ».
- ALALI A., BENMOHAMMADI A., BOUDAD L., AQID N. (2014) « Etude sédimentologique des sables dunaires de la plaine de Tafilalet (Yerdi, Labrouj, Mfis, Marzouga et Lambarkia) ».
- AUF (2013). Agence universitaire de la Francophonie. Transport et formes d'accumulation sableuses.
- BENALLA MANSOUR, EL MEHDI ALEM, PIERRE ROGNON, ROBERT DESJARDINS, ABDERRAHMAN HILALI, ABDESLAM KHARD. (2003) « Les dunes du Tafilalet (Maroc) \_ dynamique éolienne et ensablement des palmeraies ».
- BENALLA, M. (2003) (a) « Etude morphodynamique de l'évolution des dunes de Tafilalet : Apports de la Sédimentologie et de l'imagerie aérienne et spatiale, Rabat, 6 p ».
- BEN SALEM ABDELKRIM. (2013) « Vulnérabilité et adaptation aux changements climatiques dans les oasis de la région de Tafilalet- Maroc ».
- GUISHAN CUI, WOO-KYUN LEE, DOO-AHN KWAK, SUNGHO CHOI, TAEJIN PARK & JONGYEOL LEE (2011) « Desertification monitoring by LANDSAT TM satellite imagery ».
- HACHEMI KAMEL, YVES-FRANÇOIS THOMAS. (2013) « Analyse de la mobilité d'un champ de Barkhanes (Mauritanie) à partir des images SAR ».
  - MAXIME GOMMEAUX. (2005) « Bactéries du sable de Marzouga ».
- MONTENAT. C, L. BAIDDER, P. BARRIER, A. HILALI, H. LACHKEM, AND J. MENNIG. (1996) « Contrôle tectonique de l'édification des monticules biosédimentaires dévoniens du hmar Lakhdad d'Erfoud (Anti-Atlas oriental, Maroc) ».
- SPARAVIGNA, A. (a) (2017) « Dunes changing their shape: The case of the dunes of the Laayoune - Sakia El Hamra region ».
- SPARAVIGNA, A. (b) (2017) « Sand Dunes of Khenifiss National Park of Morocco ».



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Nom et prénom : Nabil EL-GUENNOUNI**

**Année Universitaire : 2017/2018**

**Titre : Apport de l'imagerie spatiale à la quantification des mouvements des dunes de sable de Marzouga**

### **Résumé**

A Marzouga, située dans la plaine de Tafilalt au Sud-Est du Maroc, le paysage est caractérisé par la présence de vastes espaces de sédiments sableux (Erg Chebbi) localement organisés en champs de dunes pyramidales. Les conditions morphologiques et climatiques de la région sont nettement favorables à une dynamique éolienne. Ces dunes réactivées menacent l'existence de terrains agricoles, de villages ainsi que de routes.

Quantifier la dynamique des champs de l'Erg Chebbi fournit une information précieuse pour la gestion des ressources locales.

Par contribution d'une série d'images satellitaires multi-spectrales et multi-dates, sur une durée d'observation de plus de quatorze ans (13-07-2003/ 12-02-2016), nous avons réalisé une analyse quantitative de la mobilité des champs de dunes de l'erg Chebbi. Les évolutions actuelles sont décrites par emploi de l'application du SIG.

Les résultats ont montré que le sens de migration potentielle de sable se fait dans de multiples directions, principalement du SE vers le NW dû principalement à la force éolienne qui domine dans la région. Le suivi de ce déplacement durant la période d'étude montre que les surfaces occupées par le sable sont de plus en plus importantes d'une année à l'autre (de 33% en 2003 à 50% en 2016 de la surface totale de la zone étudiée). De plus, les vitesses de migration annuelles sont accentuées ces dernières années, et ont dépassé 33,98 m/an entre 2011 et 2012. D'où la nécessité de continuer à développer des stratégies pour combattre l'ensablement dans une telle région.

**Mots clés: Marzouga, Erg Chebbi, imagerie satellitaire, ensablement**