

## I. INTRODUCTION

**Objetif de ce travail**

Au nord-est de la ville de Nouadhibou, à cheval sur la frontière entre la Mauritanie et le Sahara Occidental les paysages sont caractérisés par la présence de vastes espaces de sédiments sableux localement organisés en champs de barkhanes. Les dunes réactives menacent l'existence de terrains agricoles, de villages ainsi que de routes. Quantifier la dynamique des champs de barkhanes fournit une information précieuse pour la gestion des ressources locales.

Les environnements désertiques et subarides fournissent un contexte particulièrement favorable aux études historiques de suivi des évolutions de la radiométrie et de la géométrie des paysages grâce aux archives des données SAR des satellites ERS-1/2 (pour les deux dernières décennies). Les évolutions actuelles pouvant être décrites par emplots des données ENVISAT.

L'objectif de ce travail est : (i) de produire, sur une durée d'observation de plus de quinze ans (1995-2010), une analyse quantitative de la mobilité des champs de dunes de type barkhanes situés au nord-est de la ville de Nouadhibou ; (ii) de confronter la mobilité observée avec la mobilité attendue à partir d'observations climatologiques ; (iii) de produire une cartographie digitale de la géomorphométrie du champ de barkhanes.

## Localisation et caractéristiques de la zone d'étude

La zone d'étude est située au nord-est de la ville de Nouadhibou et centrée par 21°4'N - 16°8'W sur la frontière entre le Sahara Occidental et la Mauritanie (Figure 1).

Coordonnées du cadre rouge (zone d'étude) :  
 - latitude nord : 20.4307° 21.6337°  
 - longitude ouest : 16.0887° 17.249°

Le champ de barkhanes étudié (Figure 2), situé environ 50 km au nord-est de la ville de Nouadhibou, est un territoire désertique dont le paysage est caractérisé par la présence de vastes espaces de sédiments sableux localement organisés en champs de barkhanes.

Coordonnées géographiques du centre du champ de barkhanes :  
 21° 20' 02,57" Nord ; -16° 47' 56,83" Est.  
 Altitude : 10 m ; Superficie : 892 km<sup>2</sup>.



Figure 1. Carte géographique de la région (zone d'étude en rouge).

## II. BARKHANE

Dune épousant la forme d'un croissant allongé dans le sens du vent. Elle naît là où l'appout de sable est faible et se déplace le plus souvent sur un substrat « dur » dans un contexte de vents sinon unidirectionnels, du moins saisonnièrement unidirectionnels. Le vent faisant rouler le sable qui remonte la pente jusqu'au sommet de la dune et vient avalancher sur le versant aval, phénomène fait provoquer le déplacement de la dune (Figure 3).

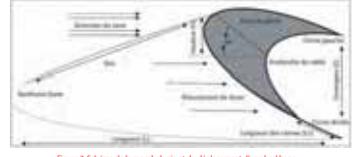


Figure 3. Schéma de la morphologie et du déplacement d'une barkhane.

L'acquisition des images SAR a été fournie par l'ESA (Agence Spatiale Européenne) dans le cadre d'un projet (n° 11148) sur l'étude du phénomène d'ensablement dans la région Mauritanie - Sahara Occidental.

## III. METHODOLOGIE

### III.1. Image d'amplitude (Intensité)

Les capteurs SAR (Synthetic Aperture Radar), capteurs actifs embarqués sur des satellites en orbites polaires mesurent les deux composantes du signal rétrodiffusé (amplitude et phase). L'amplitude du signal est fonction des caractéristiques physiques et diélectriques de l'élément d'image. La phase dépend des caractéristiques géométriques contenant l'information de distance entre le radar et la cible, elle permet donc de mesurer les déplacements verticaux du sol de l'ordre d'1/2 longueur d'onde. Les images radar ont été prises par tous temps, de jour comme de nuit, quelle que soit la couverture nuageuse, à la différence des plateformes qui opèrent dans le domaine du visible.

### III.2. Données radar SAR utilisées

Les données SLC (Single Look Complex) utilisées, ont été traitées par compression d'impulsion en direction radiale en distance et par la synthèse d'ouverture SAR en direction azimutale à partir du même centre de traitement et d'archivage (LJK-PAF). Dans ce type de produit, chaque pixel est représenté par une valeur complexe (partie réelle et partie imaginaire) d'où l'amplitude et la phase du signal sont extraites.

- Pour cette étude, nous avons utilisé 9 images de passage descendant : 2 images mono vues complexes (SLC) des satellites ERS-1 et 7 images stellite ENVISAT (tableau 1).

- Ces images ont respectivement 26460 lignes et 4900 colonnes pour ERS et 26890 lignes et 5178 colonnes pour ENVISAT.

- Elles couvrent une surface de (100km x 100km) avec une résolution de 4m (en azimut) et 20m (en distance).

- L'acquisition est descendante (acquisition de jour), d'une direction azimutale vers le bas.

- La scène est illuminée vers la droite en visée latérale avec un angle d'incidence de 23°, dans la bande « C » de longueur d'onde (5.65 cm), et une polarisation verticale (VV).

Tableau 1. Données utilisées ERS-1 et ENVISAT

N°	Date	Heure	Satellite	Orbite	Track	Centre (Lat°/Lon°)
1	05/06/1995	11:38:24.78	ERS-1	20337	309	21,05°/-16,66°
2	27/11/1995	11:38:23.43	ERS-1	22842	309	21,05°/-16,66°
3	08/06/2004	11:08:29.97	ENVISAT	11886	309	21,04°/-16,59°
4	11/09/2007	11:08:37.67	ENVISAT	28920	309	21,04°/-16,59°
5	13/05/2008	11:08:33.00	ENVISAT	32427	309	21,04°/-16,59°
6	17/02/2009	11:08:29.40	ENVISAT	36435	309	21,04°/-16,59°
7	24/03/2009	11:08:30.15	ENVISAT	36936	309	20,99°/-16,60°
8	31/08/2010	11:08:25.37	ENVISAT	44451	309	21,04°/-16,59°
9	05/10/2010	11:08:21.04	ENVISAT	44952	309	21,04°/-16,59°



Figure 5. Image optique montrant quelques barkhanes dans le cadre rouge de référence (Image Digital Globe, 2013).

### III.3. Traitements effectués

#### III.3.1. Calibration et géo-référencement

Nous avons pu extraire et produire 9 images d'amplitudes calibrées et géo-référencées (Figure 4). 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 (UTM zone 28-N, WGS84). Cette étape a été déroulée automatiquement en attribuant les caractéristiques géographiques de chaque image.

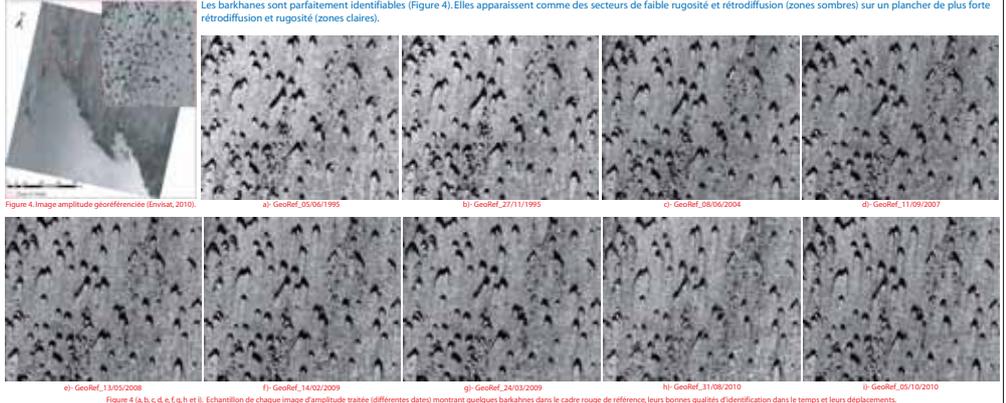
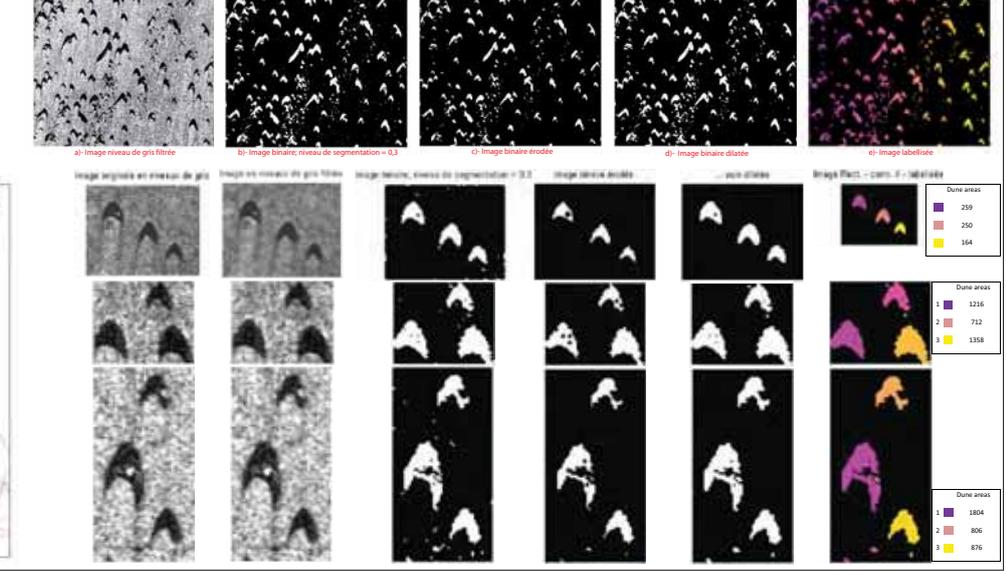


Figure 4 (a, b, c, d, e, f, g, h, i). Echantillon de chaque image d'amplitude traitée (différentes dates) montrant quelques barkhanes dans le cadre rouge de référence, leurs bonnes qualités d'identification dans le temps et leurs déplacements.

(i) la deuxième a été déroulée automatiquement par discrimination à partir d'un seuil représentant la surface de glisse (couleur noire) des zones de barkhanes.

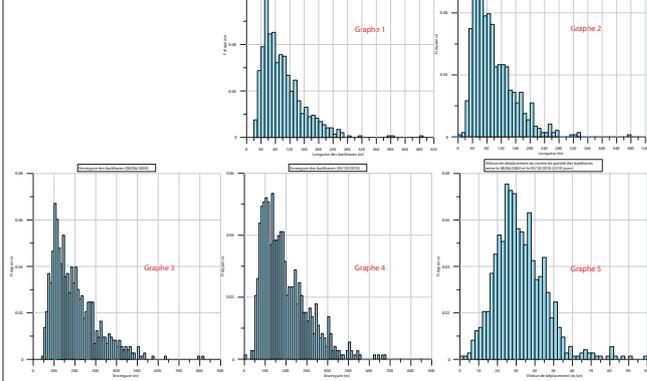


Enfin leur caractérisation morphométrique est connue par analyse de contours, dont une suite d'indicateurs a été dérivée : longueur, envergure, périmètre, aire, centre de gravité, indice de compacité, vitesse de déplacement, etc. Diverses relations déjà observées in situ ont été retrouvées et confirmées : Longueur = (Envergure) x Aire = (Longueur) x Vitesse de déplacement = (Longueur) x etc.

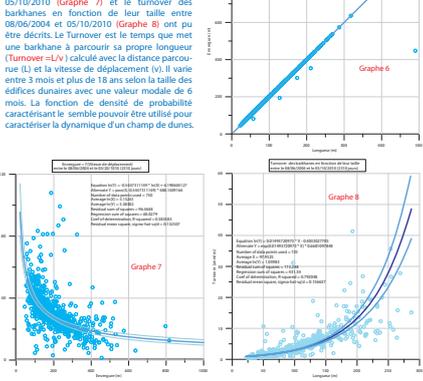
## IV. RESULTATS

Ce travail, nous a permis de répertorier plus de 900 barkhanes dans la région. Nous avons aussi suivi leur évolution sur une période de plus de 15 ans (mai 1995/octobre 2010). Nous avons mis en évidence le déplacement des barkhanes sous l'effet des vents alizés du nord-est. Les premiers résultats obtenus se résument ci-dessous :

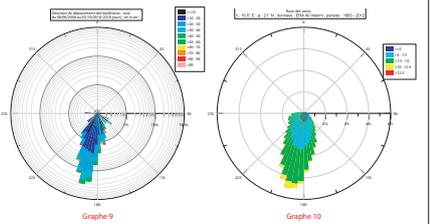
(1) Les dimensions des barkhanes du champ de dunes étudié (longueur (Graph 1 et Graph 2), envergure (Graph 3 et Graph 4)) ont pu être précisées, puis par analyse diachronique leur vitesse de déplacement (Graph 5).



(2) Les relations affines entre longueur et envergure des barkhanes ont pu être précisées (Graph 6). De même, les relations entre l'envergure en fonction de la vitesse de déplacement des barkhanes entre le 08/06/2004 et 05/10/2010 (Graph 7) et le turnover des barkhanes en fonction de leur taille entre 08/06/2004 et 05/10/2010 (Graph 8) ont pu être décrits. Le Turnover est le temps que met une barkhane à parcourir sa propre longueur (Turnover = L/v) calculé avec la distance parcourue (L) et la vitesse de déplacement (v). Il varie entre 3 mois et plus de 16 ans selon la taille des édifices dunaires avec une valeur modale de 6 mois. La fonction de densité de probabilité caractérisant le semble pouvoir être utilisé pour caractériser la dynamique d'un champ de dunes.



(3) La direction de déplacements des barkhanes entre le 08/06/2004 et le 05/10/2010 exprimées en m/an (Graph 9) et la direction des vents issues de la base des données ECMWF Interim Reanalysis pour la période 1983-2012 exprimées en m/s (Graph 10) ont été comparées. Le déplacement du centre de gravité des barkhanes vers le SSW (moyenne = 190,47) sous l'effet des vents alizés (moyenne = 189,57) est clairement mis en évidence.



Grâce à l'analyse de changements, nous avons pu classer les barkhanes (surface de glisse) en trois catégories (tableau 2) selon leur vitesse par rapport à leur longueur (petites, moyennes et grandes).

Tableau 2. Déplacement et vitesse globale du champ de barkhane étudié (plus de 15 ans)

Barkhane	nombre	%	Barkhane	nombre	%	Surface (S) (m <sup>2</sup> )	Déplacement (m)	Vitesse (m/an)
petites	528	57,70	petites	532	58,83	S = 20000	571,62	38,10
moyennes	269	29,69	moyennes	262	28,70	20000 < S < 40000	409,58	27,30
grandes	95	10,38	grandes	93	10,27	S > 40000	351,87	23,45
Champ de barkhane	100%		Tout				444,35	29,62

## V. CONCLUSION

Les barkhanes (surface de glisse) sont parfaitement identifiables dans les images d'amplitude SAR. La même barkhane peut être identifiée et suivie dans les 9 images traitées ce qui témoigne de la stabilité de leur morphologie pendant cette période de plus de 15 ans. L'imagerie SAR permet de détecter et de localiser de faibles mouvements de dunes sur un laps de temps court. L'analyse multi-temporelle conduite par emploi d'images d'amplitude a montré la possibilité : (i) de cartographier les distributions des formes dunaires ; (ii) de déterminer vitesse et direction de la remise en mouvement du sable ; (iii) de localiser les zones les plus touchées et les plus menacées par le processus d'ensablement. Elle fournit une méthode utile pour répondre à la problématique de l'analyse du processus d'ensablement, de la remise en mouvement du sable dunaire, elle permet d'appréhender l'évolution et la dégradation du milieu sur différentes périodes.