SUIVI MORPHODYNAMIQUE DES BARKHANES PAR COUPLAGE TÉLÉDÉTECTION ET MESURES GPS. APPLICATION AU SUD-OUEST DU MAROC

Hicham ELBELRHITI

Département des sciences fondamentales et appliquées.
Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. BP 6202, 10101 – Rabat, Maroc.
**E mail: helbelrhiti@gmail.com, Téléphone: (00212)-662-012-856*

Soumis le 18 juin 2010, accepté le 09 avril 2011, mis en ligne le 30 mai 2011 © *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n° 1, p. 32-42

Résumé:

L'étude de la morphodynamique dunaire fait souvent appel aux techniques de la télédétection et en particulier aux photographies aériennes et aux images satellitaires. Le GPS ordinaire est un outil de télédétection gratuit disponible depuis les années 90 qui n'a pas connu le succès des autres techniques. Dans cet article, on démontre, par des mesures de terrain, que cet outil est parfaitement adapté (1) aux mesures morphologiques des grosses barkhanes du sud-ouest marocain avec des précisions comparables à celles obtenues par les autres techniques (2) aux mesures des vitesses de déplacement des petites barkhanes à l'échelle de l'année. En couplant ces mesures avec des photographies aériennes d'archives, on peut aussi calculer les vitesses de déplacements des grosses barkhanes sur des longues périodes avec une excellente précision. (3) à suivre les interactions et les collisions barkhane-barkhane sur des périodes courtes (quelques mois) pour les petites barkhanes, et, avec l'utilisation des photographies aériennes d'archive, sur des échelles de temps plus longues (quelques décennies) pour les grosses barkhanes.

Mots-clefs : GPS ; dune ; barkhane ; migration ; forme ; photographie aérienne.

MORPHODYNAMICS OF BARCHANS MONITORED BY COUPLING REMOTE SENSING TECHNIQUES AND GPS MEASUREMENTS. APPLICATION TO SOUTH WEST OF MOROCCO.

***Abstract**:*

The morphodynamics of dunes studies often use remote sensing tools and in particular aerial photographs and satellite images. Regular GPS is a remote sensing tool freely available since 90, through the release of the positioning system of United States Department of Defense. This tool has not been as successful as the other remote sensing techniques. Herein we demonstrate, through field measurements, that this tool is (1) ideal for morphological measurements of large barchans in South West of Morocco with accuracies comparable to those obtained by other techniques (2) suitable to measure the velocity of small barchans across the year and coupling with aerial photographs from the archive to measure the velocity of large barchans with a good accuracy (3) allowing to track the interactions and collisions barchan-barchan through short periods for small barchans (several months) ; if using aerial photographs from the archive (several decades), we can follow also those between large ones.

Keywords: GPS; dune; barchans; migration; shape; aerial photograph.

1. INTRODUCTION

L'étude de la morphodynamique des dunes a fait souvent recours à des techniques de la télédétection à savoir l'imagerie satellitaire et les photographies aériennes (Mainguet *et al.*, 2001; Levin *et al.*, 2006). En géomorphologie, et afin de pouvoir étudier la morphologie des barkhanes, les géomorphologues ont défini quelques variables géomorphologiques pour caractériser la forme en croissant. Les variables les plus utilisées sont la longueur de la barkhane L, mesurée selon l'axe central entre le pied et le bas de la face d'avalanche, sa hauteur H mesurée selon un axe vertical et sa largeur W mesurée de corne à corne et la longueur des cornes L_{corne}, mesurée entre le pied de la face d'avalanche et l'extrémité de la corne (figure 1b et c). Ces variables géomorphologiques sont la plupart du temps mesurées sur les photographies aériennes et sur les images satellitaires. La deuxième caractéristique la plus étudiée sur les barkhanes dans le cadre

géomorphologique est leur dynamique. Dans cette optique, hormis quelques travaux (Khatelli & Belhaj, 1994 ; Al-Dousari and Pye 2005, Elbelrhiti & Douady, 2011), la majorité des études sur le sujet ne se sont penchées que sur des vitesses de propagation moyennes (par exemple, Hastenrath, 1967 ; Oulehri, 1992 ; Sauermann *et al.*, 2000 ; Elbelrhiti, 2005). Malgré la grande dispersion des données, toutes ces études montrent que la vitesse des dunes décroît avec leur taille (Andreotti *et al.*, 2002). Le couplage de ces données géomorphologiques avec d'autres données (climatiques par exemple) permettait de résoudre plusieurs énigmes en géomorphologie. À titre d'exemple, le couplage des formes des dunes et d'un indice de la variabilité de la direction du vent noté RDP/DP et calculé à partir des enregistrements de la vitesse et de la direction du vent, a permis d'expliquer les conditions de naissance de différents types de dunes (Fryberger & Dyne, 1979). Les barkhanes, qui sont des dunes en forme de croissant, prennent naissance dans un vent majoritairement monodirectionnel (l'indice RDP/DP tend vers 1) avec un apport de sable relativement faible (Fryberger & Dyne, 1979 ; Wasson & Hyde, 1983) (Figure 1c).

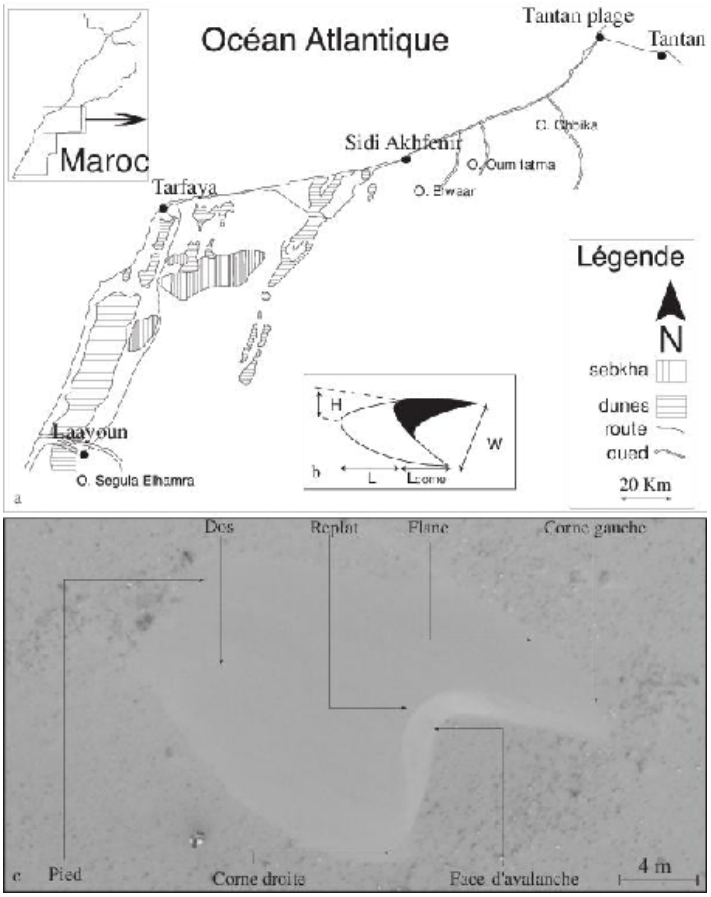


Figure 1 : a- Carte géomorphologique simplifiée du Sahara atlantique marocain. b- Schéma montrant quelques variables géomorphologiques utilisés pour étudier la forme des barkhanes. c- Vue aérienne d'une barkhane de 1,3 m de haut dans la région de Tarfaya.
a- Simplified geomorphologic map of Moroccan Atlantic Sahara. b- Sketch showing some geomorphologic variables used to study the shape of barchans. c- Aerial view of a small barchan near Tarfaya.

Au début des années 90, le Ministère américain de la défense (DoD) a mis à la disposition des civils son système de position globale connu communément sous le nom de GPS. Si le GPS différentiel a connu un succès dans l'étude de la géomorphologie dunaire (ex. Rebêlo *et al.*, 2002, Navarro *et al.*, 2011), l'utilisation du GPS ordinaire gratuit n'a pas connu le même succès. Ceci est dû au fait qu'une grande partie de nos collègues pense que ce type de GPS n'est pas bien adapté pour faire ce genre de mesures. Dans ce qui suit nous démontrerons par des mesures de terrain que le système GPS ordinaire gratuit est parfaitement adapté aux mesures des formes des barkhanes et à l'évaluation de leurs vitesses dans certains cas bien précis.

2. PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Le site d'étude est situé au Sahara Atlantique marocain entre Akhfenir, Tarfaya et Laayoun (figure 1a). Il s'agit d'une plaine constituée majoritairement par un plateau calcaire relativement plat dont l'altitude oscille autour de 30 m. L'interaction avec l'océan se fait au nord par des falaises abruptes qui empêchent la montée du sable vers le continent. A partir du village Akhfenir, des plages intercalées par quelques falaises permettent l'alimentation du continent en sable (Oulehri, 1992).

De point de vue climatique, la région fait partie du domaine boréal de l'alizé maritime, dont l'indice RDP/DP est de l'ordre de 0,91, ce qui le rend l'un des vents les plus constant au monde (Elbelrhiti *et al.*, 2005). Les vents sont généralement humides, entraînant de faibles écarts thermiques. Les précipitations sont très faibles et souvent compensées par des précipitations occultes (Delannoy, 1975). Ce type de climat donne naissance à une végétation steppique généralement maigre et naine, qui ne permet en aucun cas de fixer les dunes de sable (Elbelrhiti, 2005).

Les dunes de la région étudiée sont constituées majoritairement par des barkhanes (Sauermann *et al.*, 2000 ; Elbelrhiti *et al.*, 2008). Les courants marins apportent le sable sur la plage, les alizés (soufflant du nord-nord-est vers le sud-sud-ouest) emportent ce sable et forment ainsi des champs de barkhanes qui longent la côte. Citons à titre d'exemple le plus grand champ des dunes qui commencent à quelques kilomètres au nord-est de Tarfaya et qui a plus de 300 km de long et entre 8 et 12 km de large (Clos-Arceduc, 1967).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour étudier les barkhanes nous avons eu recours à des techniques de mesures physiques sur le terrain, des mesures effectuées sur des photographies aériennes numérisées et d'autres obtenues sur le terrain en utilisant un GPS. Les mesures physiques du terrain sont utilisées pour tester la fiabilité des autres techniques de mesure.

3.1. Mesure de déplacement par marquage physique

Pour mesurer précisément les déplacements des barkhanes sur des temps courts, nous avons mis en place une référence de position externe (un grand clou enfoncé et cimenté dans le plateau calcaire) à une vingtaine de mètres en aval de la dune (figure 2a). Sur une période de 18 mois et à l'aide d'un simple mètre et d'un compas, nous avons mesuré régulièrement la distance et l'angle par rapport au nord entre cette référence et trois points de la face d'avalanche aux extrémités droite et gauche et au milieu. Le tri-décamètre, manipulé seul, autorise une précision de l'ordre de quelques centimètres et le compas, monté sur un support avec viseur permet de mesurer l'angle avec une précision au degré. Avant que la référence de position ne se fasse recouvrir par la dune, nous en avons mis une autre en place et repéré la position de celle-ci par rapport à la première (distance et angle). On peut ainsi calculer les coordonnées cartésiennes (x,y) des points mesurés par rapport à la référence, et déduire par la suite le déplacement mensuel de la barkhane avec une excellente précision.

3.2. Mesure de contour par GPS (Global Positioning System)

L'utilisation du réseau de satellites militaires américains permet un positionnement absolu (précision métrique en XY, et décamétrique en Z). Il y a deux sources d'incertitude de mesure effectuées par GPS. D'une part, l'affichage des GPS que nous avons utilisés (eTrex Summit) donne la position au millième de minute près ce qui induit une discrétisation de la mesure par pas de 1,7m environ (1,80 m dans la direction Nord-Sud et 1,65 m dans la direction Est-Ouest). D'autre part, les GPS affichent une précision qui dépend du nombre de satellites visibles. Nous avons systématiquement travaillé avec une incertitude évaluée par l'appareil de 4 ou 5 mètres. Nous avons nous même estimé la sensibilité réelle en mesurant la position d'un même point physique (des clous cimentés dans la dalle calcaire) au cours du temps (figure 2a). L'écart type des mesures est de 2 m environ (sur la distance à la position moyenne) ce qui valide l'incertitude donnée par l'appareil.

La figure 2b montre un exemple caractéristique de "détourage" de quelques dunes à l'aide du GPS. Selon la taille de la dune, les points sont espacés de 5 à 20 mètres. Il est à noter que la précision avec laquelle on peut pointer la limite de la dune est encore de l'ordre de quelques mètres en particulier à l'arrière. À noter également le fait que les mesures sur les quelques minutes que dure le détourage sont encore plus précises en relatif que ce qui est indiqué ci-dessus, valable en absolu. On peut observer que cette technique donne une image fidèle du contour de la dune (figure 2c). En particulier, les caractéristiques morphologiques (rapport d'aspect, cornes...) sont très bien capturées. En complément, nous avons systématiquement fait des photographies des dunes de face et de profil de manière à pouvoir reconstituer formes et emplacements des faces d'avalanches de la dune.

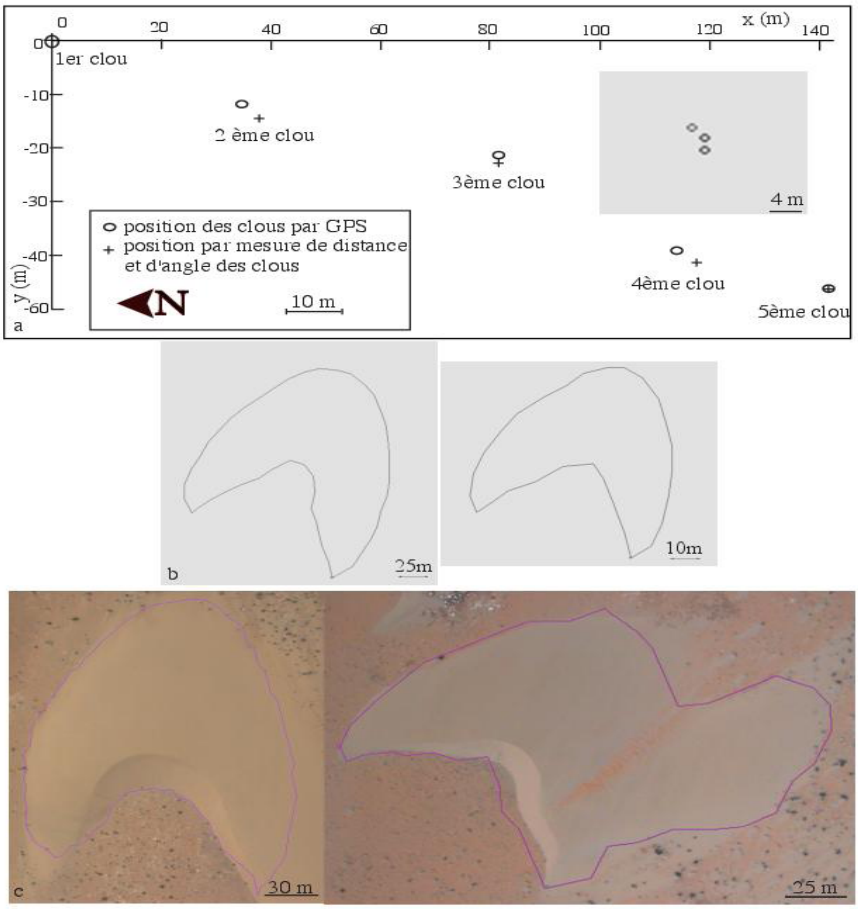


Figure 2: a- Superposition des positions de cinq clous servant à mesurer physiquement la vitesse des barkhanes. Nous avons identifié les positions GPS des clous extrêmes à leurs positions calculées à partir de l'angle et la distance entre eux. Nous remarquons que la marge d'erreurs sur les autres ne dépasse pas 4 m. L'encadré gris représente 3 mesures GPS d'un même clou cimenté dans la dalle calcaire, à plusieurs dates entre Novembre 2002 et Avril 2004. On note l'effet de la discrétisation de la mesure et l'incertitude sur les mesures, de quelques mètres. b- Exemple de détourage GPS de quelques barkhanes de différentes tailles. c- Gauche: le contour GPS d'une barkhane se superpose au mètre près à sa photographie, prise depuis un cerf-volant. Droite: superposition d'une photographie aérienne de barkhane prise par le cerf-volant et du contour GPS effectué 4 jours après.

a- Overlay of the position of five nails used to measure physically the barchan's speed. We identified the GPS position of the nails situated at the extreme, we can see that the error on other nails does not exceed 4 m. The gray box shows 3 times the measurements of GPS location of a nail fixed on hard rock soil. Measurements were done at different date. We can see the effect of discretization of the measure and the uncertainty in the measurement don't exceed few meters. b- An example of the GPS outlines of some barchans of various size. c- Left: The photograph is taken from a kite; we can see clearly that the GPS outline of that barchan superimposed to the photograph keep the geomorphologic characteristics of the dune. Right: Overlay of an aerial photograph of barchan taken from a kite and its GPS outline performed 4 days after

3.3. Photographies aériennes

Depuis plusieurs décennies, l'emploi de la photographie aérienne à haute résolution a été systématisé, permettant une couverture partielle ou totale des territoires. Ainsi, nous avons réussi à réunir une importante série de photographies aériennes du Sahara Atlantique, de 1975 à 1999 (tableau 1). Les épreuves dont nous disposons ont été tirées au contact et sont toutes au format 24 cm x 24 cm. Les conditions de prise de vue ayant été perdues dans la plupart des cas (figure 3a), nous avons dû les reconstituer à partir des mentions sur les bords de ces photographies. Selon les cas, la photographie mentionne soit la date exacte et l'heure, soit l'année seulement. Dans ce dernier cas, nous avons estimé le mois à partir de l'inclinaison du soleil et des caractéristiques des dunes visibles. Dans la plupart des cas, l'altimètre de l'avion est visible et l'échelle mentionnée, mais nous n'avons utilisé ces informations qu'à des fins de vérifications. Nous avons numérisé les photographies aériennes à l'aide d'un scanner à plat 2400 dpi. Toutes les photographies ont été scannées à la résolution de 1 m par pixel, sauf la série à l'échelle 1/20000, scannée à 25 cm par pixel. Par comparaison, les images satellites LANDSAT gratuites qui présentent une archive de plus de 30 ans ont au mieux une résolution spatiale de 15 m par pixel (il existe des images satellitaires à haute résolution spatiale comme QUICKBIRD et IKONOS, mais à des prix prohibitifs) (figure 3b).

Tableau 1 : Série de photographies aériennes utilisées dans cette étude
Aerial photographs used in this study

Année	Échelle	Région	Objectif	Focale en (mm)
1975	1/50000	Agoutir,Tarafaya, Tah	UA_gI 6018	152,92
1976	1/20000	Laâyoun,Tarafaya, Tah	UA_g 434	152,55
1979	1/60000	Laâyoun	SA_gII	88,82
1999	1/20000	Laâyoun	SA_g92	88,5

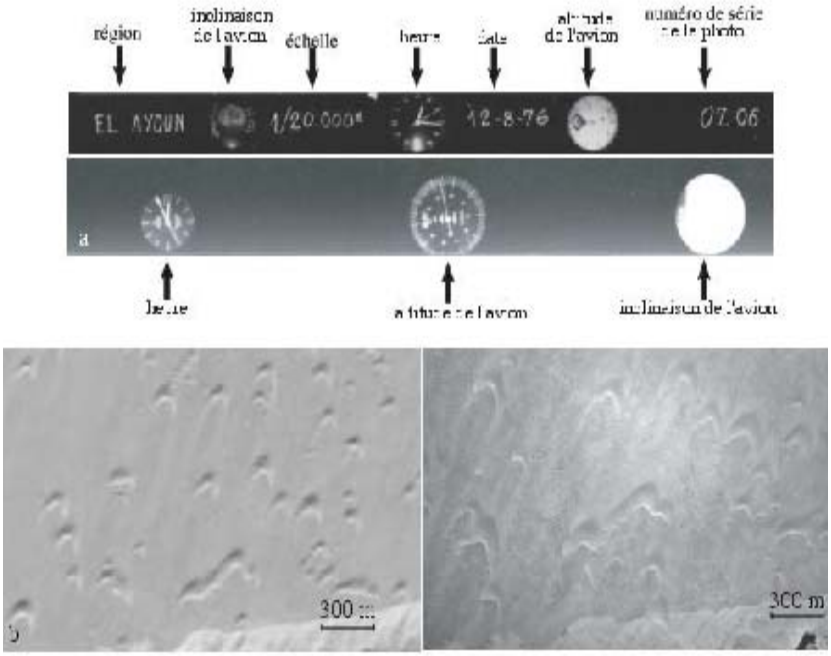


Figure 3: a- Hormis les photographies aériennes de Laâyoun prises en 1976 sur lesquelles apparaissent presque tous les paramètres de la prise de la photographie (en-tête en haut), sur les autres seuls quelques paramètres sont marqués (en-tête en bas). b- Depuis désormais des dizaines d'années, les satellites d'observation permettent une couverture exhaustive de la Terre. Il est donc possible d'acquérir des images satellite des régions du monde où il n'existe pas de couverture photographique aérienne récente. La résolution des images disponibles gratuitement comme Landsat ETM+ est encore insuffisante pour pouvoir les utiliser pour le suivi de la morphodynamique des barkhanes (photographie à gauche); par comparaison la photographie aérienne de la même région (à droite) offre un luxe de détails.
a- Apart Laâyoun aerial photographs taken on 1976, which appear almost all the parameters of the picture (top header), on the others, only few parameters are marked (bottom header). b- Since seventies, satellites provide exhaustive coverage of the Earth. So it is possible to have satellite image of parts of the earth where there is no photographic coverage. The resolution of satellite images available for free as Landsat ETM+ appears still not accurate for the monitoring of barchans morphodynamics (left photograph). Reversely, aerial photographs of the same region (right) offers a wealth of detail.

Ces contraintes de coût et de résolution nous ont amené à réfléchir à d'autres techniques d'observation et d'acquisition de données. Nous avons ainsi mis au point un système de prise de vue par cerf-volant (figure 2c). Le modèle de cerf-volant utilisé, de plusieurs mètres d'envergure, a été choisi pour sa grande stabilité, sa capacité à décoller par faible vent avec une charge de plusieurs kilogrammes. L'appareil photographique numérique que nous avons utilisé n'ayant pas de déclencheur électrique, nous avons conçu une griffe radiocommandée permettant le déclenchement à distance. Le cerf-volant a été utilisé jusqu'à des hauteurs de l'ordre de 100 m. Cela permet, compte tenu de l'ouverture angulaire de l'appareil photographique, de couvrir un champ de 100 m de large typiquement, avec une excellente résolution (10 cm par pixel). Par comparaison, le drone PIXY paramoteur radiocommandé, conçu par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) peut naviguer jusqu'à une altitude de 300 m et donne une résolution qui dépend de l'altitude et qui peut aller de 30cm à quelques cm (Asseline *et al.*, 1999 ; Moquet, 2003)

Si la couverture totale d'un grand champ des dunes n'est guère possible par cerf-volant, nous avons pu, par montage en mosaïque de différentes photographies, obtenir des images présentant plusieurs dunes. Toutefois, la photographie par cerf-volant reste essentiellement dédiée à l'étude des formes des dunes, mais peu à leur dynamique.

3.4. Photographies aériennes et couplage GPS - photographie aérienne

Le paramètre caractérisant la résolution de la prise de vue, que ce soit une image numérique ou la digitalisation d'un tirage argentique, est la focale f de l'appareil photo, exprimée en pixels. Pour une prise de vue plongeante depuis une hauteur H, l'échelle (le nombre de pixels par mètres) vaut f/H. A contrario, connaissant la distance entre deux points visibles sur l'image et la focale, on peut déterminer H. En plus de la distance, H entre le centre optique et le centre de la photographie (quatre croix aux coins des photographies permettent d'en repérer le centre), trois angles sont nécessaires pour déterminer la position de l'appareil photo: les angles θ et v repèrent la position par rapport au repère centré sur le point de visée et φ l'angle de l'appareil photo autour de la ligne de visée (figure 4). Pour un repérage absolu, il convient d'ajouter les coordonnées GPS du point de visée. Il y a donc globalement six paramètres pour caractériser une prise de vue. Il faut donc avoir dans l'image trois points particuliers (points géodésiques, falaises, virages de routes, phares des ports, …) dont on puisse connaître les deux coordonnées (par marquage GPS par exemple). On ajuste alors les six paramètres pour que les six coordonnées décrivant cet ensemble de points coïncident avec celles mesurées. S'il est relativement aisé de fixer grossièrement l'échelle et donc l'altitude de la prise de vue avec deux points rapprochés, fixer finement les valeurs de tous les paramètres demande des points de références les plus éloignés possibles les uns des autres. Quand cela était possible nous avons utilisé beaucoup plus que trois points de calage, voire des lignes entières. L'incertitude liée au calage des photographies aériennes par rapport au GPS est illustrée sur la figure 5. On y voit superposés une photographie aérienne de 1975 et plusieurs contours GPS. Les trois points de superposition (figure 5 b, c et d) sont éloignés les uns des autres mais encadrent la mégabarkhane (qui est une barkhane géante comme l'indique son nom) que nous avons étudiée à l'aide de cette photographie. Une fois ces points fixés, nous constatons que le marquage GPS de la falaise représenté sur la figure 5 (e) est parfaitement superposé à sa photographie; le virage de la route (figure 5 f) est, lui, décalé de quelques mètres. En précision relative, sur de petites distances, on obtient donc une résolution de l'ordre du mètre (par exemple sur la mesure de la largeur d'une dune). En absolu, la précision dépend légèrement de la distance aux points de calage et n'excède pas 10 m.

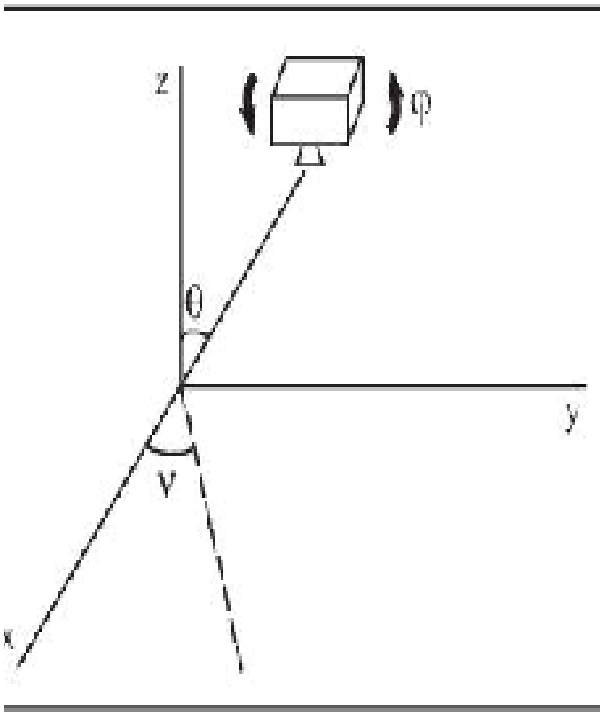


Figure 4: Schéma montrant les différents angles définissant la position l'appareil photo.
Sketch showing the different angles defining the position of the camera.

Pour étudier la morpho-dynamique des barkhanes, nous avons constitué des cartes des dunes par le marquage et le détourage de milliers de dunes et des points de repères ont été utilisés pour géoréférencer la carte des dunes avec les photographies aériennes.

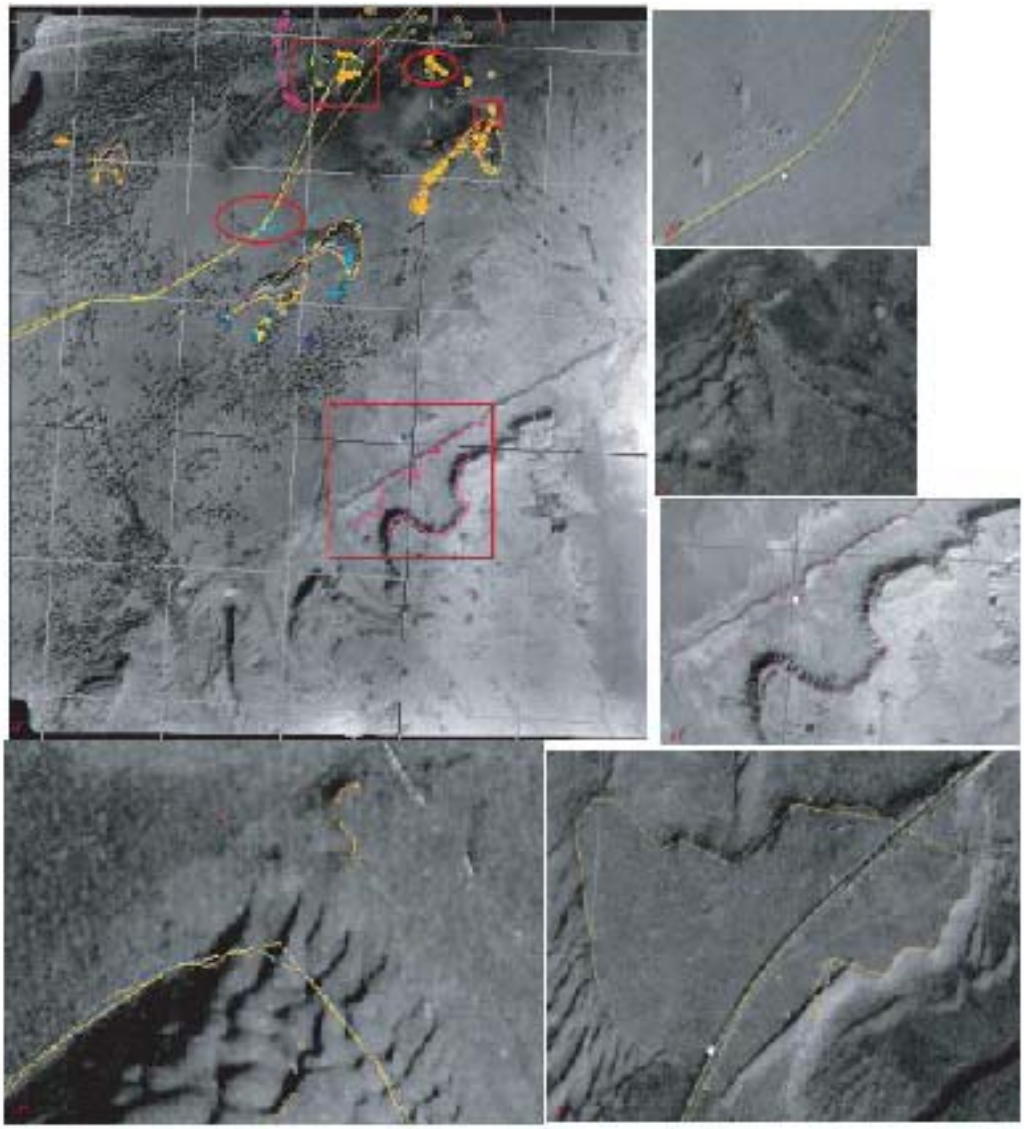


Figure 5: Exemple de couplage photographie aérienne-GPS. a) Superposition des contours GPS sur la photographie aérienne des mégabarkhanes prise en 1975 (Les différentes couleurs des contours GPS corresponds aux différentes date de prise des mesures). Les carrés rouges représentent les points que nous avons fixés pour la superposition et représentés par les photographies b), c) et d). Les cercles rouges représentent des tests pour l'incertitude (photographies e) et f)) de superposition. b) Falaise juste derrière la première mégabarkhane. c) Falaises à côté de la route. d) Falaises de la hamada. e) Falaise à côté des mégabarkhanes. f) Virage de la route.
a) GPS outlines superimposed to aerial photograph of megabarchans taken on 1975 (different colors of GPS outlines correspond to different dates of measurement). Red squares represent points that we fixed in order to overlay the GPS outline to the photograph. These squares are shoed by photographs b), c) and d). Red circles presented by photographs e) and f) show tests for the accuracy of our method. b) Cliff situated behind the first megabarchan. c) Cliffs beside the road. d) Cliffs of the Hamada. e) Cliff alongside megabarchans. f) Bend in the road.

4. RÉSULTATS

4.1. Morphologie des barkhanes

Les mesures morphométriques qui ont été effectuées sur les barkhanes montrent que la longueur des cornes fait quelques dizaines de mètres, alors que la longueur et la largeur des barkhanes ont des valeurs allant de 20 à 250 m (Finkel, 1959 ; Long and Sharp, 1964 ; Hastenrath, 1967 ; Hastenrath, 1987). Cela veut dire que le GPS ordinaire n'est pas bien adapté pour mesurer la longueur des cornes (quelque soit la taille de la barkhane) et les variables géomorphologiques des petites barkhanes (largeur et longueur). En revanche, il est parfaitement adapté pour ce genre de mesures sur les grosses barkhanes, dont la taille dépasse les 100 m de long ou de large, avec une erreur de l'ordre de quelques pourcents, erreur qui reste acceptable pour ce genre de mesures.

La figure 6a montre la longueur des barkhanes du Sahara Atlantique en fonction de leur largeur. Ces mesures ont été effectuées (1) directement sur le terrain en utilisant un tri-décamètre, (2) sur les photographies aériennes de 1975, 1976

et 1979 scannées à une résolution de 1m par pixel et (3) par GPS. On peut constater la parfaite superpositions des mesures effectuées par les différentes méthodes.

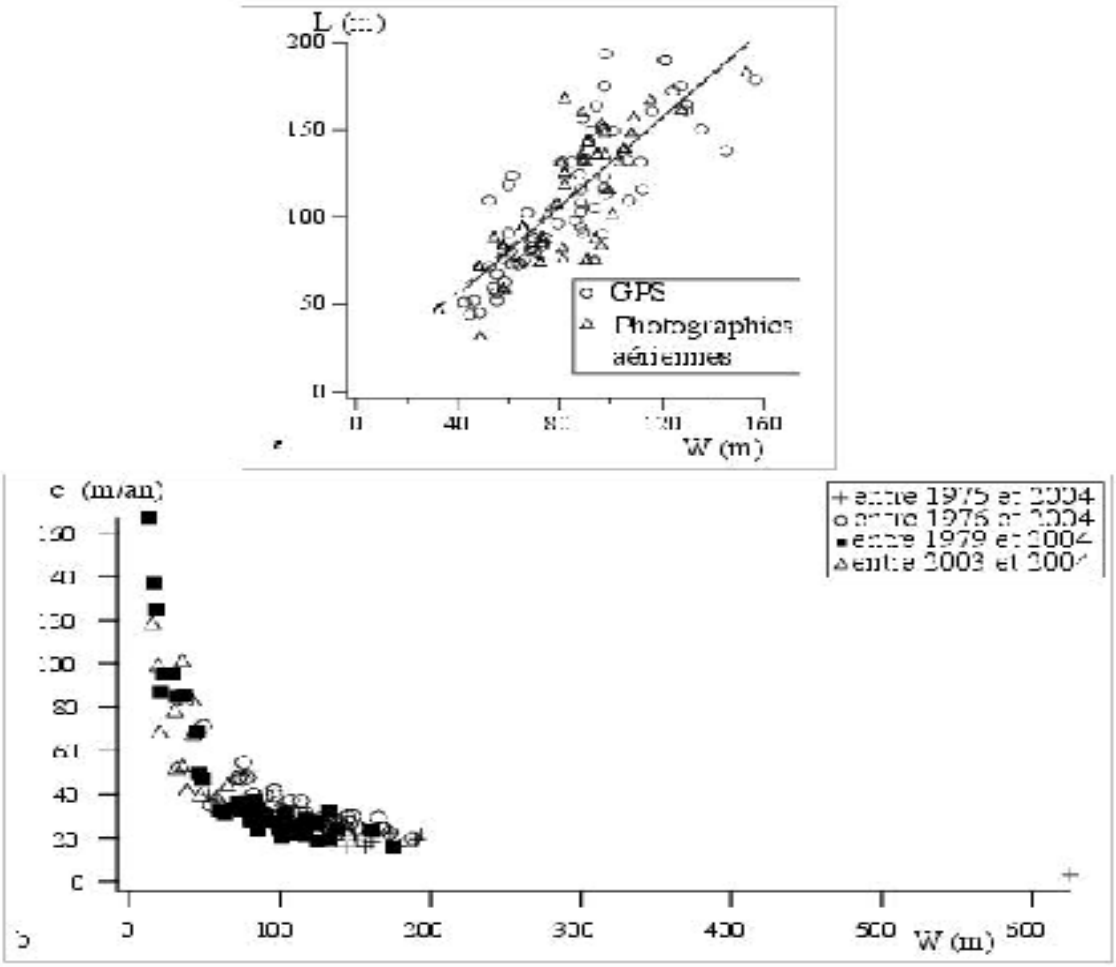


Figure 6 : a) Longueur des barkhanes du Sahara Atlantique en fonction de leurs largeur mesurées par GPS et sur des photographies aériennes de 1975, 1976, 1979 et 1999. On voit que les deux mesures se superposent. b) Les mesures de vitesse annuelle des barkhanes effectuées par GPS entre 2003 et 2004 se superposent sur celles effectuées par couplages GPS et photographies aériennes de différentes années.

a) Length of Atlantic Sahara barchans varies with their width measured by GPS and aerial photographs from 1975, 1976, 1079 and 1999. We see that the two measurements overlap. b) Measurements of the barchan's annual rate of migration taken by GPS between 2003and 2004 superimposed on those taken by coupling GPS and aerial photographs of different years.

4.2 Suivi de la dynamique des barkhanes

La seconde caractéristique la plus étudiée sur les barkhanes dans le contexte géomorphologique est leur mobilité. Nous avons effectué nos propres mesures de vitesse de propagation des barkhanes directement sur le terrain et en utilisant le couplage photographie arienne – GPS. Comparées à celles précédemment effectuées, elles couvrent grâce aux mega-barkhanes, une gamme d'échelle et de temps beaucoup plus importante. Les résultats (figure 6b) démontrent à nouveau une parfaite superposition entre les mesures effectuées sur le terrain et ceux obtenus par GPS et par couplage photographie aériennes – GPS.

La vitesse de déplacement d'une barkhane décroît rapidement avec sa taille (Bagnold, 1941). Une petite dune de la région (1 m de haut) peut se propager de plus de 100 m/an, soit en moyenne quelques dizaines de centimètres par jour. Cela signifie que le GPS ne peut être utilisé à l'échelle de la semaine pour mesurer ce déplacement. En revanche, il est parfaitement adapté à la mesure de déplacements à l'échelle de l'année. Une grande barkhane (7 m de haut) parcourt une distance de 25 m/an environ. Le GPS est alors adapté à la mesure sur de plus longues périodes, en utilisant des photographies aériennes d'archive. Par exemple, entre 1975, date de la première photographie aérienne dont nous disposons, et 2004, année du suivi GPS, une grande dune se déplace typiquement de plus de 700 m ce qui donne une précision relative de l'ordre de 1%.

4-3 Interactions et collisions entre les barkhanes

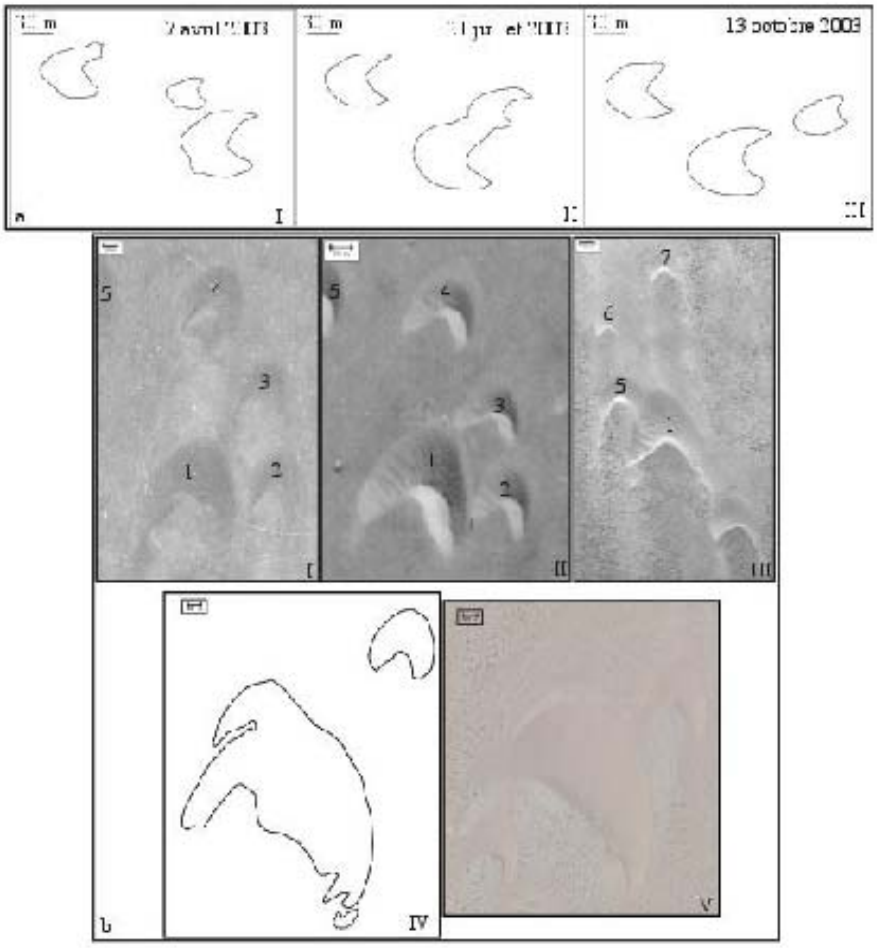


Figure 7 : a) Suivi d'une collision latérale entre des petites barkhanes. On voit que le GPS est parfaitement adapté pour ce genre de mesures qui se déroule pendant quelques mois. Dans ce cas, en plus des distances parcourues par les petites barkhanes, le GPS permet de suivre le changement de flux de sable durant l'interaction entre les dunes. b) L'interaction entre les grosses barkhanes s'effectue pendant plusieurs années voire des décennies. Sur cette figure on voit une interaction entre quelques barkhanes initiée en 1979. Trente ans après, l'image Quickbird prise en 2009 montre que la collision n'est pas achevée.

a) Lateral collision between small barchans: we can see that the GPS is perfectly suited for this kind of measurements that take place on a few months. In this case, in addition to the distance traveled by small barchans, the GPS allow to track the change in the sand flux during the collision process. b) The interaction between large barchans need several years, even decades. On this figure, we can see the interaction between barchans starting in 1979. Thirty years after, the Quickbird satellite image taken on 2009 shows that the collision in not finished yet.

Si le GPS ordinaire n'est pas adapté pour effectuer des mesures de forme sur les petites barkhanes, son utilisation pour le suivi des interactions barkhane-barkhane et les changements de flux de sable qui en découle s'avérerait très intéressante. La figure 7a présente l'évolution de la collision de petites barkhanes. On voit que cette interaction s'effectue pendant quelques mois ; dans ce cas le GPS est parfaitement adapté pour le suivi de cette collision. En effet, les barkhanes de la région effectuent l'essentiel de leur migration pendant la période allant d'avril à septembre (Oulehri, 1992 ; Elbelrhiti & Douady, 2011). Donc une barkhane de taille élémentaire parcourra une distance proche de 100 m durant cette période, ce qui donne une erreur de l'ordre de 1%. En revanche, les barkhanes de grande taille ont besoin de plusieurs années pour achever une collision. Dans ce cas, le recours aux photographies aériennes anciennes est nécessaire. D'une part, les grosses barkhanes ont besoin d'une longue période de plusieurs années pour achever une collision (Elbelrhiti, 2005 ; Elbelrhiti *et al.*, 2005). D'autre part, durant cette long période, les barkhanes parcourent une grande distance, ce qui améliore l'incertitude de la mesure. La figure 7b présente un bon exemple d'une collision impliquant une grosse barkhane. La première photographie a été prise en 1976 et montre trois barkhanes de taille moyenne situées derrière une grosse barkhane. Une quatrième barkhane de taille moyenne est située sur le côté gauche de la grosse barkhane. La photographie prise en 1979 montre qu'à part le rapprochement des barkhanes de taille moyenne de la grosse barkhane, peu d'évolutions sont à noter durant les trois précédentes années. Vingt ans plus tard, en 1999, les évolutions sont importantes. On note en particulier la collision en cours entre les barkhanes 1 et 5. En 2004,

date de la prise du contour GPS on voit une barkhane entrer en collision avec le résultat des collisions précédentes. Durant cette longue collision, on note notamment que la dune cible (barkhane n° 1) est devenue plus grosse que cela était en 1976. Ainsi, elle est passée de 120 m de large en 1976 à 180 m en 2009. Cela montre que les collisions participent à la redistribution du flux de sable au sein d'un couloir de barkhanes (Elbelrhiti *et al.*, 2010).

5. CONCLUSION

En conclusion, les résultats démontrent que les mesures par GPS ordinaire, sont parfaitement adaptées au suivi géomorphologique sur les barkhanes du sud-ouest marocain. Ceci pourrait combler l'absence de séries de photographies aériennes récentes, et permettre l'économie d'achat d'images satellitaires à haute résolution souvent onéreuses pour des équipes de recherches des pays du Sud. En effet, le GPS ordinaire est très bien adapté pour mesurer la migration et les interactions entre les petites dunes à l'échelle de l'année, mais reste insuffisant pour mesurer leur morphométrie. A contrario, pour les grosses barkhanes, il est parfaitement adapté pour faire des mesures sur leur longueur et largeur, mais manipulé seul ne donne pas des mesures fiables concernant leur migration. Ceci peut être contourné en combinant des cartes des contours GPS des barkhanes avec des photographies aériennes d'archive. Cette combinaison permet de suivre les collisions et les interactions entre les grosses dunes sur des longues périodes.

Bibliographie

Al-Dousari, A., M. & Pye, K., (2005) Mapping and monitoring of dunes in North-western Kuwait. Kuwait Journal of Sciences and Engineering, vol. 32, p. 119-134.

Andreotti, B., Claudin, C., Douady, S., (2002) Selection of dunes shape and velocity. Part 1: Dynamics of sand, wind and barchans. Eur. Phys. J. B, vol. 28, p. 321-339.

Asseline J., De Noni G., Chaume R., (1999) Note sur la conception et l'utilisation d'un drone lent pour la télédétection rapprochée. Photo-interprétation- Images aériennes et spatiales, 37, 3-13 et 42-47.

Clos-Arceduc A**.,** (1967) Les fleuves de sables entre le Maroc et la Mauritanie, et la théorie des barkhanes. C. R. Acad. Sci., Paris, série D, vol. 261, p.3637- 3639.

Bagnold. R. A., (1941) The physics of blown sand and desert dunes, Chapman and Hall, London. 265p.

Delannoy, H., (1975) Contribution à l'étude climatologique de la province de Tarfaya (Maroc). In : Contribution à l'étude scientifique de la province de Tarfaya. Trav. Inst. Chér., série générale, vol. 3 p. 15-60.

Elbelrhiti, H., (2005) Morphodynamique des barkhanes: Etude des dunes du Sud-Ouest Marocain. Thèse Université Paris VII, France. 165p.

Elbelrhiti, H., Claudin, P., and Andreotti, B., (2005) Field evidence for surface-wave-induced instability of sand dunes. Nature, vol 437. p. 720-723.

Elbelrhiti, H., Claudin, P., and Andreotti, B., (2008) Barchan dunes corridors: Field characterization and investigation of control parameters, J. Geophys. Res. Vol 13. F02S15. doi:10.1029/2007JF000767.

Elbelrhiti, H., Dewitte, O., Montanarella, L., (2010) Commentaire sur l'article intitulé « Essai de morphométrie sur un système dunaire du Sud-Ouest marocain à partir d'une image Landsat » [Sécheresse 2010 ; 21(1) :54-62]. Télédétection, vol. 9, n. 2, p. 151-155

Elbelrhiti, H., Douady, S., (2011) Equilibrium versus disequilibrium of barchan dunes. Geomorphology, vol. 125, p.558-568.

Finkel. H. J., (1959) The barchans of southern Peru, Journal of Geology, vol. 67, p. 614-647.

Fryberger, S. G., and Deane, G. (1979) Dunes forms and wind regims. In McKee, E.D., ed, A study of global sand seas:US. Geol. Surv. Prof Paper 1052, p. 137-170.

Hastenrath, S.L., (1967) The barchans of the Arequipa Region, Southern Peru, Zeitschrift für Geomorphologie vol. 11, p. 300-331.

Hastenrath, S.L. (1987) The barchans of Southern Peru revisited, Zeitschrift für Geomorphologie vol. 31, n 2, p. 167-178.

Khatelli, H., & Belhaj, N., (1994) La dynamique des dunes dans le Sud-Ouest tunisien. Sciences et changement planétaire / Sécheresse vol. 5, p. 245-249.

Levin, N., Tsoar, H., Maia, L., P. Sales, V. C., Herrmann, H., (2007) Dune whitening and inter-dune freshwater ponds in NE Brazil. Catena, vol. 70. p. 1–15.

Long, J.T., and Sharp, R.P., (1964) Barchan dune movement in Imperial Valley, California, Geological Society of America, vol. 75, p. 149-156.

Mainguet, M., Dumay, F., Oould El Hacen, M. L., et Maefoudh, A., (2001) Diagnostic par la télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne : période d'amorce de la désertification en Mauritanie saharo-sahélienne. Télédétection, vol. 2, n° 2, p. 129-136

Moquet, A (2003) Apports de la télédétection pour la cartographie d'habitats terrestres en zones humides méditerranéennes. Application aux habitats de la Réserve Nationale de Camargue. Mémoire de fin d'étude pour le titre d'Ingénieur Agronome de l'École Nationale Supérieur d'Agronomie et des Industries Alimentaires Nancy.

Navarro, M., Muños-Péreza, J.J., Román-Sierraa, J., Tsoarb, H., Rodriguezc, I., Gómez-Pinad, G., (2011) Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term, Geomorphology, doi: 10.1016/j.geomorph.2011.01.009

Oulehri, T., (1992) Etude géodynamique des migrations de sable éoliens dans la région de Laâyoun (Nord du Sahara marocain). Thèse de Doctorat, Université Paris 6, France.

Rebêlo, L. P., Brito, P. O., Monteiro, J. H., (2002) Monitoring the Cresmina dune evolution (Portugal) using differential GPS. Journal of Coastal Research vol. 36. p. 591–604.

Sauermann, G., Rognon, P. Poliakov, A., and Hermann, H. J., (2000) The shape of barchan dunes of southern Morocco. Geomorphology, vol. 36, p. 47-62.

Wasson, R.J., and Hyde, R., (1983) Factors determining desert dunes type. Nature, vol. 304, p. 337-339.

Remerciements

Nous voulons remercier B. Andreotti, S. Douady, et P. Claudin pour leur aide et contribution dans les mesures sur le terrain, B. Andreotti pour le support technique pour la réalisation du logiciel dédié spécialement pour cette étude et L. Cartier pour la conception de la griffe radiocommandée.