

# CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE DES BARKHANES A PARTIR D'IMAGES SPOT PANCHROMATIQUE L'exemple du cap Juby (Maroc)

Catherine MERING ◆▼, Tarik OULEHRI ▼

◆ Dépt de Géotectonique. U.P.C.M. 4, place Jussieu 75252 Paris Cedex 05

▼ L.I.A. ORSTOM 72, Route d'Aulnay 93143 Bondy Cedex

Mots clefs : Cartographie, Morphologie Mathématique, milieux arides, systèmes dunaires, barkhanes, photo-interprétation.

**Résumé** : La région du cap Juby connaît de grands problèmes d'ensablement qui entravent son aménagement. La mesure des déplacements des *barkhanes* qui constituent le système dunaire passe par leur cartographie. Pour cela nous avons établi une méthode, basée sur la Morphologie Mathématique, pour extraire ce type de dunes à partir d'images Spot Panchromatique. En appliquant des filtres morphologiques et linéaires à l'image en teintes de gris, on obtient une image binaire des *barkhanes*. La validation se fait par superposition de celle-ci sur l'image originale.

## Introduction

La cartographie des unités de paysage se fait de façon classique par photo-interprétation à l'aide de documents de photographie aérienne et plus récemment à partir d'images satellite à haute résolution. Les inconvénients de cette approche sont la non-reproductibilité, la subjectivité de l'opérateur ainsi qu'un grand effort d'observation quand elle s'applique à de grandes surfaces telles que des étendues dunaires.

La cartographie à moyenne échelle de tels espaces, indépendamment de leur intérêt pratique, a un intérêt scientifique dans les domaines de la géodynamique et de la paléoclimatologie (directions des vents et formation des déserts). Dans le cas des *barkhanes* qui sont des dunes mobiles, une telle cartographie peut être utilisée pour les études d'aménagement.

Nous avons tenté ici une cartographie semi-automatique des *barkhanes*. Elle est le produit d'un séquençement de traitements d'images, et peut donc être entièrement reproduite sur des espaces comparables à partir des images Spot.

La région étudiée (fig. 1) se situe dans la Province de Laayoune au nord du Sahara occidental, dans la région du cap Juby (27°56'N; 12°05'W).

Pour réaliser cette étude, on a acquis deux scènes Spot Panchromatique espacées de six ans afin de calculer les taux de déplacements en fonction des tailles des *barkhanes* (KJ 22-296 du 15/08/87 et du 16/03/93) et les comparer aux résultats théoriques (Oulehri, 1992).

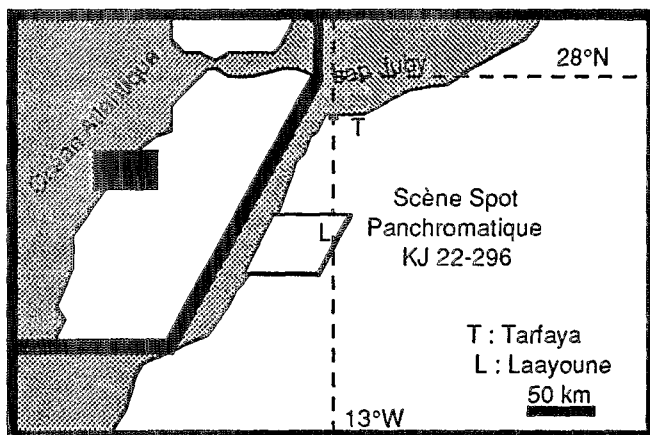


fig. 1 : Carte de situation

### Description de l'ensemble dunaire

**Sur le terrain :** Au cap Juby, la *barkhane* (fig. 2) est la forme dunaire principale. Cette dune en forme de croissant caractérise les régions arides à régime éolien de haute énergie et de faible variabilité directionnelle (Lancaster, 1985). C'est la direction NNE qui marque ici l'orientation du système dunaire à toutes les échelles d'observation (Oulehri, 1992).

La morphologie d'une *barkhane* se résume à un front concave et un dos convexe séparés par une crête. Ces *barkhanes* s'organisent au sein d'un *erg* large d'une douzaine de kilomètres et s'allongeant sur plus de 300 km depuis le cap Juby, d'où l'appellation de "fleuve de sable".

Cet ensemble dunaire se distingue sur le terrain par l'absence de sol au sens écologique du terme et de *graras* (petites dépressions de quelques dizaines de m<sup>2</sup> où l'accumulation des eaux de ruissellement permet le développement d'une végétation arbustive).

**Sur les images :** Cette différence de nature se traduit par une différence de réponse spectrale sur l'image de 1987. Les surfaces ensablées et la dalle gréseuse apparaissent avec des teintes de gris plus sombres que le reste de l'image. Ce qui permet d'extraire le "fleuve de sable" par simple analyse radiométrique. En revanche, l'analyse radiométrique ne permet pas d'extraire l'ensemble dunaire sur l'image de 1993 car les brouillards côtiers estompent les contrastes radiométriques. Ce handicap supplémentaire a motivé le choix de cette image pour le développement de cette méthode.

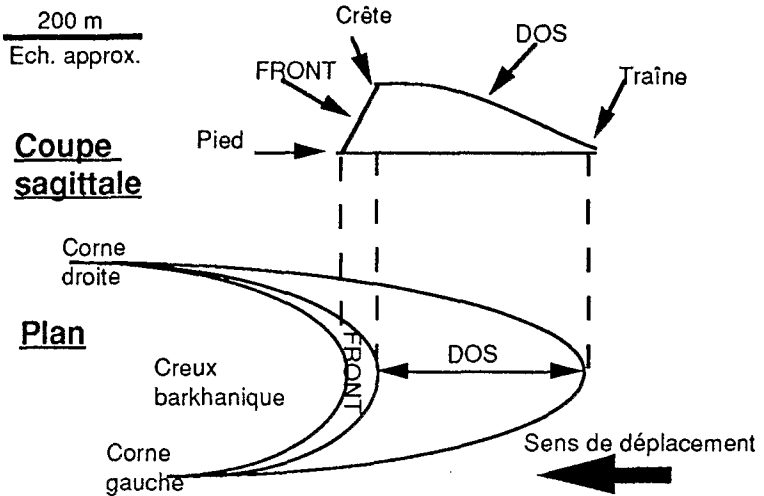


fig. 2 : Schéma d'une barchane

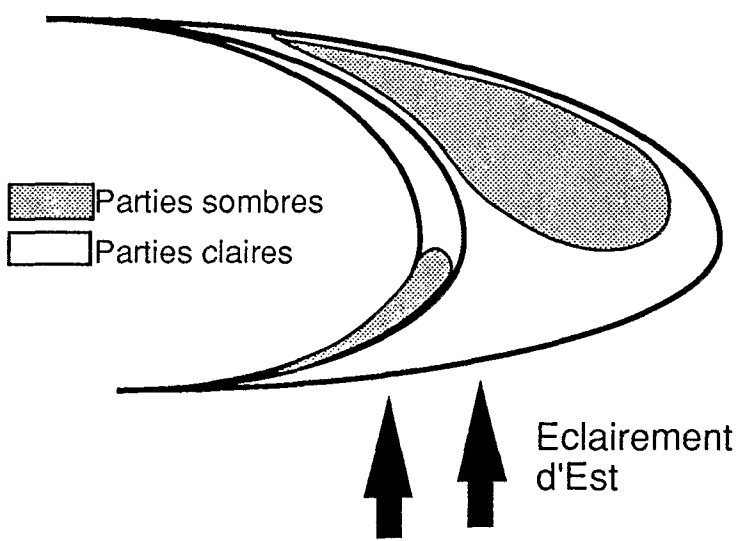


fig. 3 : Schéma des deux classes radiométriques principales de la barchane

## Stratégie de traitement des images pour la photo-interprétation et la cartographie des dunes

### Limites de l'analyse radiométrique

Au sein du système dunaire, cette méthode permet encore moins de distinguer les *barkhanes* du substratum gréseux et des voiles sableux qui le recouvrent par endroit.

En effet, réduire le nombre de niveaux de gris à analyser s'avère insuffisant pour identifier les formes. Les *barkhanes* sont des objets géomorphologiques visibles sur les images Spot Panchromatique grâce aux variations radiométriques liées à la variation de l'éclairement du modelé sableux observé à cette échelle (fig. 3). Le versant du dos de la *barkhane* d'éclairement maximum et le versant d'éclairement minimum apparaîtront dans deux classes radiométriques différentes. La réunion des deux classes ne permet pas de reconstituer la forme du dos car ces classes ne contiendront pas la totalité du dos de *barkhane* (il existe des classes intermédiaires dues à la lumière rasante) tout en contenant d'autres objets extérieurs. Par exemple, les versants des dos cachés du soleil ont une réponse spectrale identique à celle des fronts non éclairés et à celle des *graras*.

On va tenter l'extraction des ensembles clairs et des ensembles sombres de la *barkhane*, les réunir, et délimiter la *barkhane* tout entière par extraction des parties intermédiaires. On devra ensuite éliminer de l'image des ensembles qui ne sont pas des *barkhane* telles que les voiles sableux (clairs) et les *graras* (sombres).

Il faut donc trouver une méthode pour cartographier les *barkhanes* en tant qu'entités. Le but de cette méthode est de produire une cartographie fidèle des surfaces occupées par les *barkhanes*. Le résultat des traitements sera donc évalué en comparant les images binaires obtenues à une carte qui pourrait être faite par photo-interprétation.

### Choix d'une stratégie

Le nombre des techniques de traitement d'image à la disposition de la communauté devient considérable et il est hors de question de les tester de manière empirique sur les images. Il faut donc établir une stratégie qui permette de trouver les traitements adéquats pour faire ressortir et extraire les éléments de l'image qui seront soit le contour soit la surface des ensembles dunaires. Une telle stratégie doit être efficace sur des images de même nature portant sur des objets similaires.

L'homogénéité spectrale de l'ensemble "substratum-dunes" donne un rôle prépondérant à la géométrie des formes par rapport à la réponse radiométrique des objets. L'étude passe donc nécessairement par une analyse des formes. Classiquement, dans ce cas, on utilise la photo-interprétation pour identifier et extraire les formes recherchées. La photo-interprétation, fondée sur la perception visuelle d'objets sur un document

analogique issu d'une prise de vue nadirale, procède, comme toute analyse visuelle, d'un effort de structuration de l'image.

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

Une telle transformation opère à la fois par simplification de la texture et par simplification des contours. Lors de la simplification de la texture, les détails jugés non significatifs sont gommés au profit d'une teinte de gris uniforme. Le seuillage permet d'extraire "une catégorie d'objets" sous forme d'une image binaire dont on peut à nouveau simplifier les contours.

Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes numériques permettant d'exécuter les fonctions de simplification et d'extraction à partir des images à niveaux de gris. Il s'agit entre autre des méthodes de segmentation, de lissage, de seuillage (Pratt, 1978). Néanmoins les méthodes de la Morphologie Mathématique (Serra, 1982) nous paraissent plus particulièrement adaptées à notre étude. En effet, ces méthodes permettent à l'opérateur de structurer progressivement l'image selon les critères morphologiques qu'il juge pertinents. Notre objectif est de délimiter, à partir d'une image en teintes de gris, des entités de forme thématiquement significatives. Cette approche peut être assimilée à une "photo-interprétation assistée par ordinateur".

Le contraste des teintes de gris a été le premier élément qui a permis de proposer des séquences ou des coopérations de traitement d'images pour une cartographie complète.

## Traitements des images

### Primitives de transformation d'images binaires

On suppose connu les transformations de la Morphologie Mathématique sur les images binaires telles que l'*érosion*, la *dilatation*, l'*ouverture* et la *fermeture* par un élément structurant B de taille n (Serra, 1982). On illustre ces transformations sur la figure 4. On a utilisé deux éléments structurants différents, le carré et l'octogone construits à partir de la trame carrée qui est la trame originelle des images satellite.

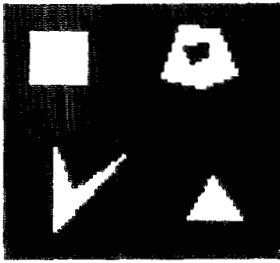
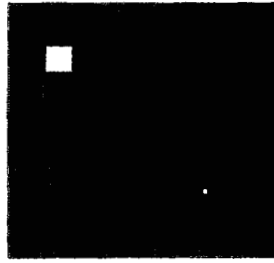
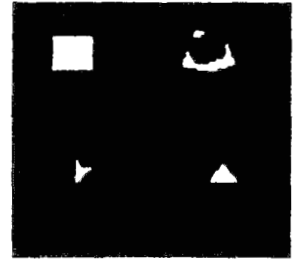


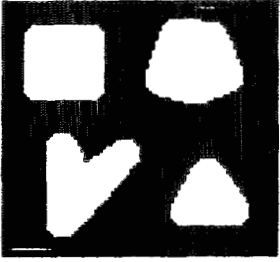
Image originale



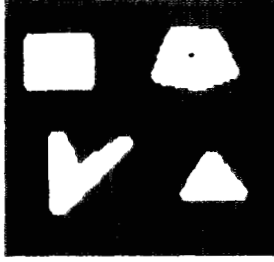
érosion par l'octogone



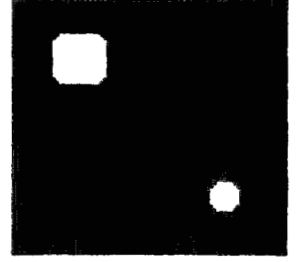
érosion par le carré



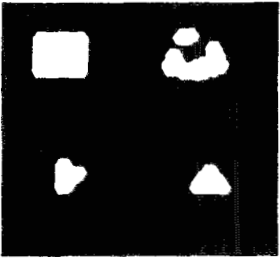
dilatation par l'octogone



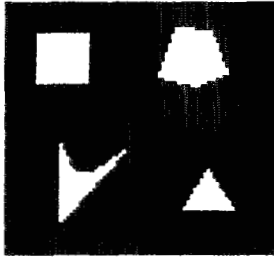
dilatation par le carré



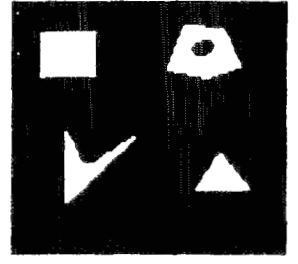
ouverture par l'octogone



ouverture par le carré



fermeture par l'octogone



fermeture par le carré

fig. 4 : Primitives de transformation d'une image binaire.

X X X  
 X X X  
 X X X

Le carré

X X X  
 X X X X X  
 X X X X X  
 X X X X X  
 X X X

L'octogone

fig. 5 : Les deux éléments structurants utilisés pour les transformations

L'*ouverture* et la *fermeture* permettent de structurer l'image en simplifiant les contours des objets mais sans modifier de façon importante leur géométrie ni leur taille. Cependant dans certains cas, il s'agit simplement de "nettoyer" un ensemble, c'est à dire d'éliminer les "petites" composantes connexes tout en préservant intégralement les contours des plus grandes composantes connexes, ce que ne réalise pas l'*ouverture*. On utilise alors pour cela une procédure dite de *reconstruction géodésique* dont le principe est le suivant : après avoir éliminé les petites composantes de l'ensemble X de départ par une *érosion* à l'aide d'un élément structurant convexe B(n) de taille n convenable, c'est à dire permettant d'éliminer la plus grande des petites composantes, on dilate l'ensemble Y restant (appelé ensemble *marqueur*) à l'aide de B puis on effectue l'intersection ensembliste entre  $D^B Y$  et X (appelé ensemble *masque*) et on recommence l'opération jusqu'à ce que l'image ne change plus: il s'agit en effet d'une transformation idempotente (Coster et Chermant, 1989). L'algorithme de la *reconstruction géodésique* est le suivant :

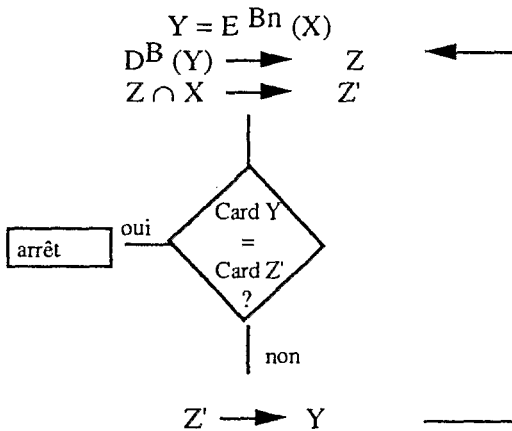


fig. 6 : Algorithme de la reconstruction

## Primitives de transformations d'images en teintes de gris

Dans le cas de la Morphologie Mathématique appliquée aux images en teintes de gris, on considérera la fonction  $f(x)$  qui représente la teinte de gris au point  $x$ . A chaque point on associe un élément structurant  $B$ . Dans le domaine défini par  $B$  autour de  $x$ ,  $f(x)$  possède une valeur supérieure et une valeur inférieure.

Pour construire la fonction *érodée* par un élément structurant  $B$ , il suffit d'attribuer en chaque point du domaine  $B_x$  (i.e. l'élément  $B$  centré au point  $x$ ) la valeur inférieure que prend  $f(x)$  dans ce domaine, ce que l'on écrit:

$$E^B f(x) = \inf \{ f(u) : u \in B_x \}$$

De même, pour construire la fonction *dilatée* par un élément structurant  $B$ , il suffit d'attribuer en chaque point du domaine  $B_x$  la valeur supérieure que prend  $f(x)$  dans ce domaine, ce que l'on écrit:

$$D^B f(x) = \sup \{ f(u) : u \in B_x \}$$

On définit l'*ouverture*  $f_B$  d'une fonction  $f$  par un élément structurant  $B$  de la façon suivante:

$$f_B(x) = D^B(E^B f(x))$$

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

$$f^B(x) = E^B(D^B f(x))$$

ce qui, d'après les relations établies plus haut, donne pour chacune des deux transformations:

$$\begin{aligned} f_B(x) &= \sup \{ E^B f(y) : y \in B_x \} \\ &= \sup \inf \{ f(z) : y \in B_x, z \in B_y \} \end{aligned}$$

$$f^B(x) = \inf \sup \{ f(z) : y \in B_x, z \in B_y \}$$

On a évidemment toujours l'inégalité suivante:

$$f_B(x) \leq f(x) \leq f^B(x)$$

Ces transformations ne modifient l'image en niveaux de gris qu'en certains points: l'*ouverture* arase les pics acérés et la *fermeture* comble les vallées étroites du relief auquel on a assimilé le sous-graphe  $U_f$  de la fonction  $f$ , comme on l'a illustré sur la figure 7.

Plus récemment Serra (1988) a proposé des filtres en teintes de gris dit "connexes" pour produire des images aux niveaux de gris plus homogènes dans la perspective de faciliter l'extraction des contours et le codage. Les définitions de ces filtres sont directement issues de celles des filtres morphologiques avec les modifications suivantes: l'*ouverture* (resp. la *fermeture*) *connexe* est obtenue par *dilatation (érosion) géodésique* de l'*érosion (dilatation) morphologique* initiale (i.e. la fonction initialement érodée est dilatée itérativement sous (sur) la fonction en teintes de gris originale).

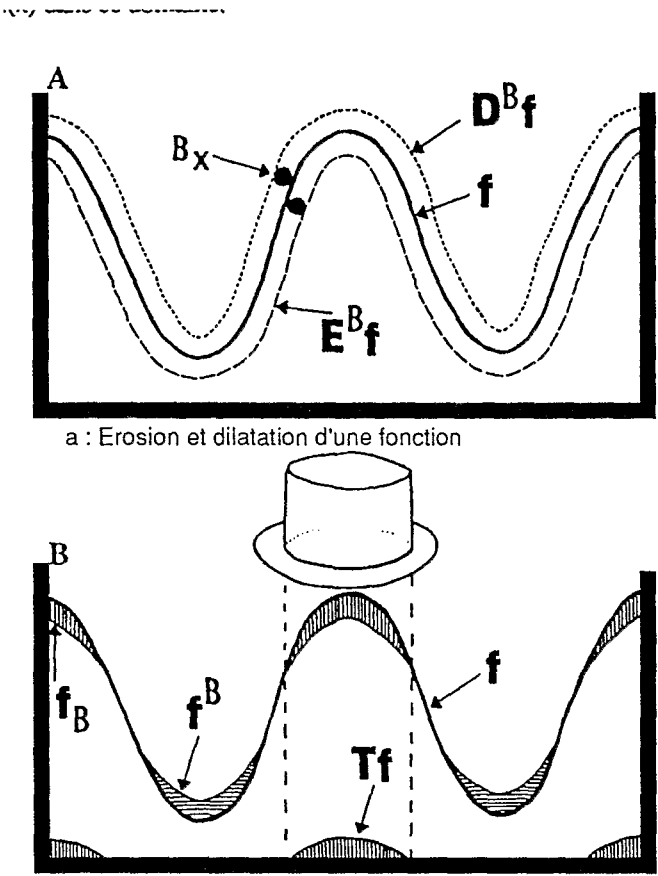
D'autre part la méthode des Filtres Alternés Séquentiels (FAS) est largement utilisée dans les travaux les plus récents d'analyse d'image pour



débruiter une image en teintes de gris. La technique consiste à appliquer alternativement des *ouvertures* et des *fermetures* de même taille ou de taille croissante sur l'image initiale. Crespo et al. (1993) ont récemment montré l'efficacité de cette méthode en l'appliquant également aux filtres connexes.

**Primitives d'extraction de contours**

Ces transformations ont la propriété de n'agir que sur les contrastes régionaux. Soit les objets correspondent à des extréma régionaux (minima ou maxima) soit il faut, par un pré-traitement, transformer la ligne de contraste en maxima régional. Les plus couramment utilisés ont été les *Chapeau haut de forme* (que nous noterons *C.H.F.*) et les *gradients directionnels*.



a : Erosion et dilatation d'une fonction

b : Ouverture, fermeture et "chapeau haut de forme" d'une fonction

Fig. 7 : le sous-graphe  $U_f$  de  $f$  assimilé à un relief

**Chapeau Haut de forme :** On utilisera les propriétés de l'*ouverture* et la *fermeture* pour définir des filtres morphologiques tels que les *chapeaux haut de forme*. Ces filtres permettent d'extraire d'une image en niveaux de gris uniquement les pics, c'est-à-dire les petits éléments clairs ou les vallées, c'est-à-dire les petits éléments sombres. Ainsi, en effectuant la différence entre l'image initiale et son *ouverture* par un élément structurant B de taille n noté nB, on extrait les pics dont l'épaisseur est inférieure à n soit:

$$Tf(x) = f(x) - f_{nB}(x)$$

De même, pour extraire les vallées d'épaisseur inférieure à n, on effectue la différence entre la *fermeture* de l'image par un élément structurant nB et l'image initiale, soit:

$$Tf(x) = f^{nB}(x) - f(x)$$

**Gradients directionnels :** Ce sont des filtres linéaires passe-haut qui s'obtiennent par convolution de l'image avec une fonction h déterminant la direction du gradient recherché.

$$g(i,j) = \{ \sum f(k,l) h(k,l) / k=i-n, i+n \quad l=j-n, j+n \}$$

Dans la pratique, les techniques de calcul des gradients sur les trames carrées ne diffèrent que par le coefficient figurant dans la définition de la fonction de convolution h, la position des nombres signés sur la trame déterminant la direction du gradient. Sur une trame carrée on peut définir (Prewitt, 1970) huit directions à l'intérieur d'un voisinage de taille 3 (fig. 8).

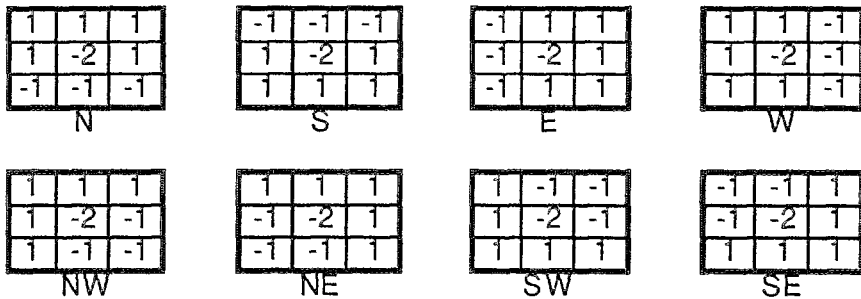


fig. 8 : Les huit directions des filtres gradients.

### Séquencement et coopération des primitives

Nous avons dû séquencer ou faire coopérer ces primitives de traitement. La plupart du temps, un seul traitement n'est pas suffisant pour carter les ensembles dunaires. Le principe du séquencement, utilisé de façon classique, est le suivant : les traitements sont enchaînés de façon à mettre le mieux en

évidence l'objet considéré assimilé dans ce cas à une région ou à niveau de gris homogène. L'étape incontournable de la cartographie consiste à seuiller les images en teintes de gris résultant des traitements.

Les images binaires résultantes des différentes séquences testées présente des qualités complémentaires par rapport au résultat escompté. Nous avons choisi de les utiliser en coopération ce qui se traduit pratiquement par des opérations ensemblistes sur les images (réunion, intersection.).

Pour améliorer l'aspect de la cartographie après une étape de seuillage, nous avons très fréquemment effectué un "nettoyage" des ensembles en supprimant les petites entités indésirables tout en conservant les contours des entités à carter. Ces résultats sont obtenus essentiellement à partir d'un seul algorithme, celui de la *reconstruction géodésique*.

### Description et illustration de la méthode (fig. 9)

On a appliqué à l'image initiale un FAS construit à partir d'*ouvertures* et de *fermetures* connexes c'est à dire :

$$\text{FAS} = O_c F_c O_c$$

où :  $O_c$  est l'ouverture connexe e taille 1.  
 $F_c$  est la fermeture connexe de taille 1.

On peut constater (fig 9.bis) que l'image à été considérable lissée et que les barkhanes apparaissent dans des teintes sombres. Cependant le seuillage d'une telle image ne permet d'isoler les barkhanes. En effet si celles-ci sont grossièrement caractérisées par des minima régionaux, un seuillage bas altère leur contour en sous-estimant leur surface. Si on augmente le niveau du seuillage, d'autres ensemble non dunaires et de taille importante sont alors extraits également. Cette technique n'est pas efficace car les barkhanes sont mises en évidence par des contrastes plus que par des teintes de gris. Nous avons donc préféré utiliser une approche par extraction de contrastes (Meyer, 1978).

On améliore d'abord l'aspect visuel de l'image Spot Panchromatique (fig. 10.a) en réduisant l'hétérogénéité de la texture par un filtre adéquat (filtre de Levialdi, 1981). A chaque étape on illustre les traitements par l'image d'une zone test (fig. 10.b). On a retenu les deux traitements d'extraction suivants :

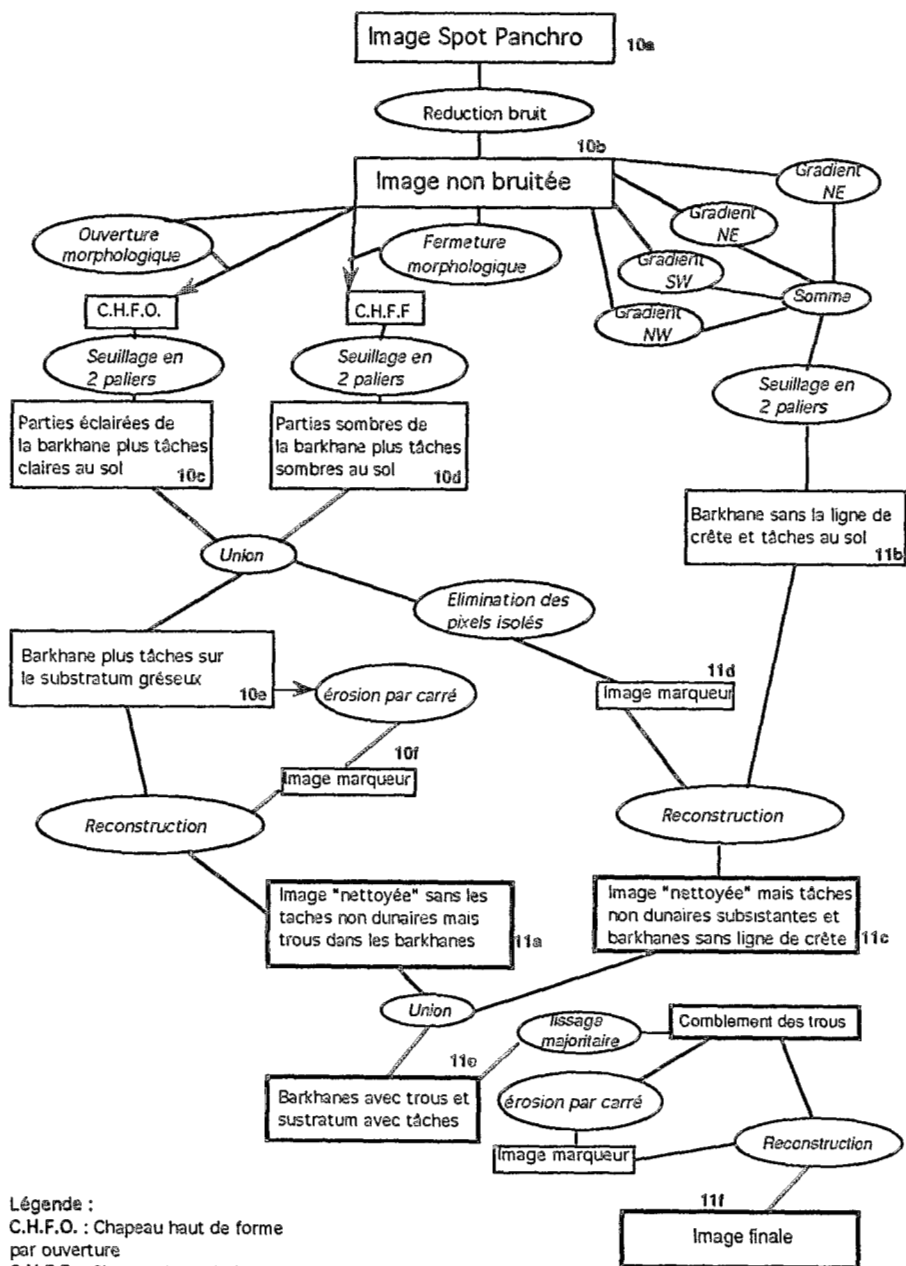
#### Filtres morphologiques

Le *C.H.F.* par *ouverture* extrait les parties claires des *barkhanes* et le *C.H.F.* par *fermeture* extrait les parties sombres.

Pour obtenir à la fois les parties les plus claires et les plus sombres qui forment les *barkhanes*, on fait une *ouverture morphologique* parallèlement à une *fermeture* suivies d'un *C.H.F.* avec chacune des images obtenues. Les deux *Chapeaux haut de forme* sont alors seuillés pour obtenir des images binaires.

Homogénéisation des teintes de gris des aires à extraire

Extraction des formes dunaires et affinement des contours sur les images binarisées



Légende :  
 C.H.F.O. : Chapeau haut de forme par ouverture  
 C.H.F.F. : Chapeau haut de forme par fermeture  
 10e : cf. fig. 10e

fig. 9 : Algorithme du traitement retenu

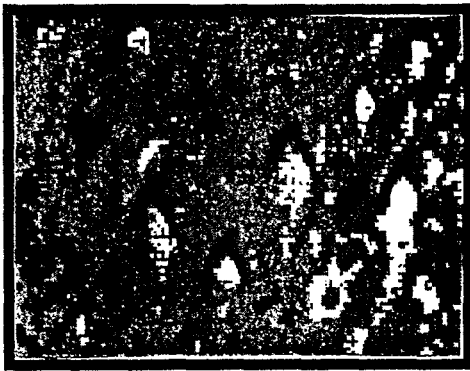


Image originale

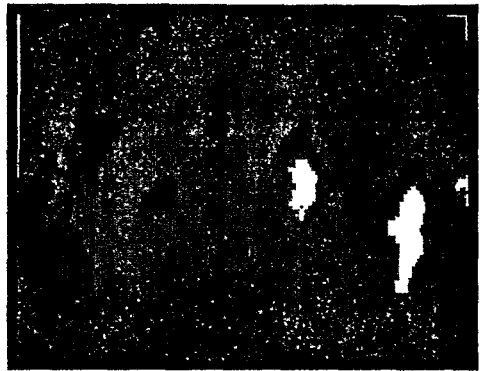
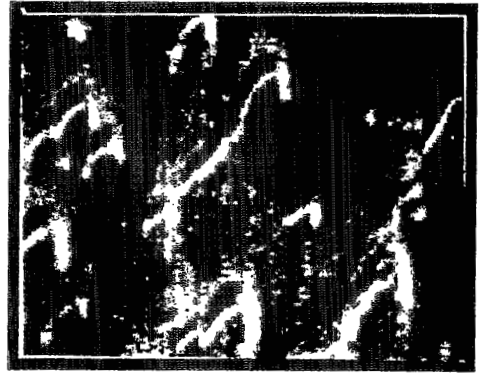


Image résultante

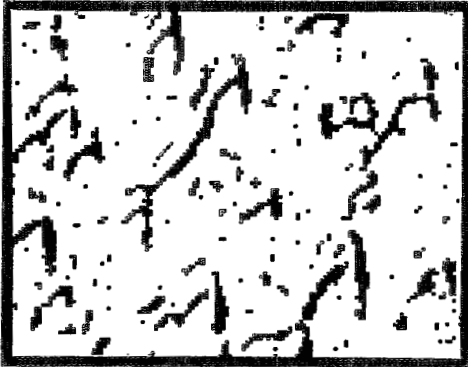
fig 9 bis : Filtres Alternés Séquentiels



a



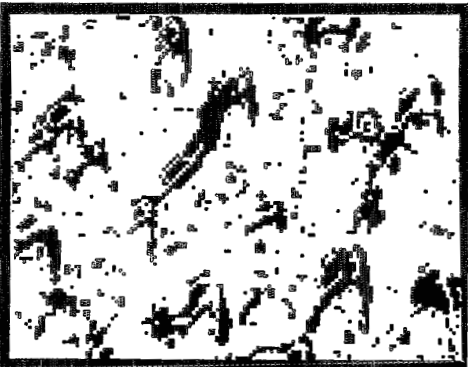
b



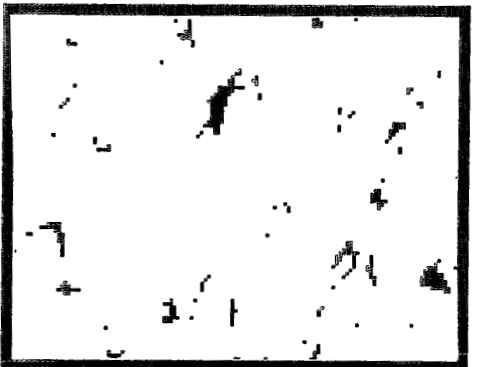
c



d



e



f

Ech. approx. : 240m

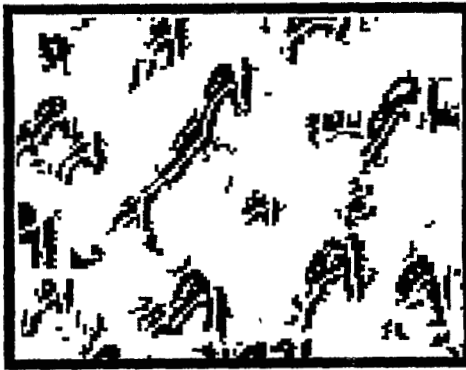
fig. 10 : Illustrations des traitements sur la zone test



a



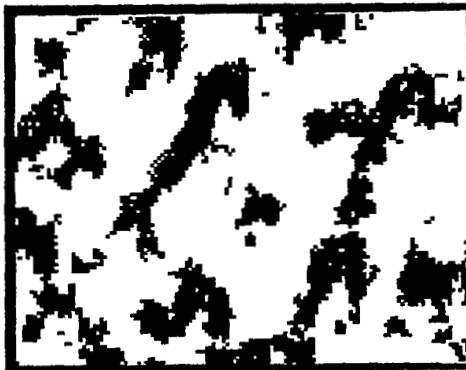
b



c



d



e



f

Ech. approx. : 240m

fig. 11 : Illustrations des traitements sur la zone test

Durant cette étape nous avons fait varier la taille de l'élément structurant et la valeur du seuil :

$$\text{Seuil } s \quad [ \text{Tf}(x) = f(x) - f_{nB}(x) \cup \text{Tf}(x) = f_{nB}(x) - f(x) ]$$

La séquence suivante :

$$\text{Seuil } 2 \quad [ \text{Tf}(x) = f(x) - f_{n5}(x) \cup \text{Tf}(x) = f_{n5}(x) - f(x) ]$$

est la combinaison qui a donné la forme la plus proche des *barkhanes* telles qu'elles sont perçues à l'œil sur l'image en teintes de gris. On effectue l'union ensembliste du *C.H.F. par ouverture* qui fait ressortir les parties claires (fig. 10.c) et le *C.H.F. par fermeture* qui fait ressortir les parties sombres (fig. 10.d). L'image résultante (fig. 8.e) comporte des tâches non dunaires. On la nettoie (fig. 11.a) par une *reconstruction géodésique* en l'utilisant comme ensemble *masque* et l'érodé par un carré (fig. 10.f) comme ensemble *marqueur*.

### Les filtres gradient par convolution

On a également utilisé des filtres linéaires de type passe haut car ils mettent en évidence des contours des plages de niveaux de gris similaires en privilégiant une direction donnée. Parmi ces filtres, quatre gradients obliques NE, NW, SE et SW ont été retenus car ils correspondent aux quatre directions perpendiculaires à l'orientation des cornes des *barkhanes* (fig. 12).

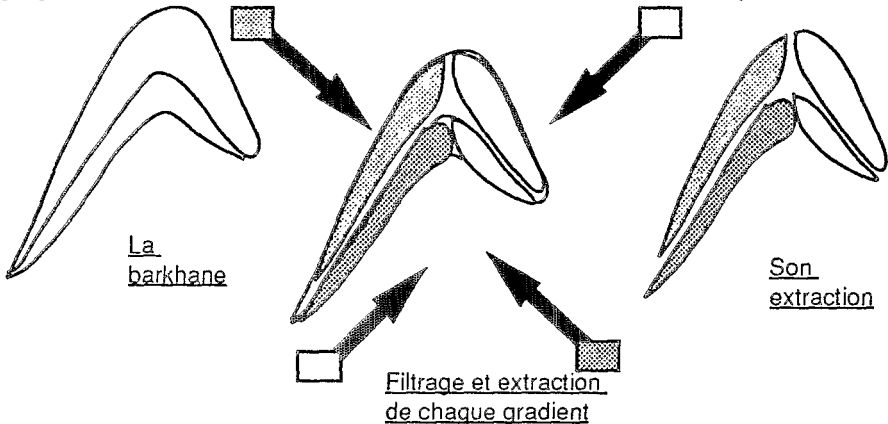


fig. 12 : Extractions des filtres gradients

Ces quatre filtrages sont effectués en parallèle et les images résultantes sont sommées numériquement. L'image obtenue, une fois seuillée, fait ressortir les lignes des crêtes en blanc (fig. 11.b). Ce traitement présente donc l'avantage d'offrir un marqueur précis (un pixel d'épaisseur) de la position de la *barkhane* sur l'image. Cette information pourrait donc être utilisée pour l'étude ultérieure sur les déplacements. Cette image comporte également des entités non dunaires qu'on élimine par *reconstruction géodésique* (fig. 11.c) en utilisant une image issue des filtres morphologique comme *marqueur* (fig. 11.d).



### Comparaison des deux traitements

L'image issue des filtres directionnels donne une meilleure approche des surfaces qui semblent sous estimées par les filtres morphologiques. En revanche ces derniers aboutissent à une meilleure restitution des formes car les filtres directionnels exagèrent la rectilinéarité des contours dans les directions utilisées, ce qui altère les formes originellement courbes.

Une tentative de synthèse des deux résultats a été faite en effectuant une *réunion ensembliste* des deux images résultantes (fig. 11.e). On opère sur cette image un *lissage majoritaire* qui bouche les petits trous et améliore l'aspect des contours (fig. 11.f). L'image obtenue semble surestimer les surfaces des barkhanes. On a donc deux cartes, dont l'une sous-évalue les formes et l'autre surévalue la surface.

L'amélioration de la carte passe par des filtrages sur l'image issue des filtres morphologiques, permettant de combler les trous. Ces filtres devront être des transformations extensives moins sévères que la *fermeture morphologique* telles que les transformations de la Morphologie Mathématique Faible proposées par Mazille (1988).

### Conclusion

L'utilisation conjointe des filtres morphologiques et des filtres linéaires nous a permis de produire une première carte des *barkhanes* où les surfaces sont légèrement surestimées.

Les méthodes de la Morphologie Mathématique Faible qui sont la synthèse des filtrages morphologiques et linéaires, nous permettra sans doute d'améliorer le tracé des *barkhanes*.

Les cartes ainsi produites à partir des scènes espacées de six ans seront utilisées pour quantifier le taux de déplacement des *barkhanes*.

**Remerciements :** Ce travail a été réalisé à l'aide des logiciels PLANETES (ORSTOM) et OSIRIS V 2.0 (LACTICAL/ESTEL). Les images ont été acquises avec le soutien du programme français ISIS (Incitation à l'Utilisation Scientifique des Images Spot patroné par le CNES et la société SPOT Image).

### **Références bibliographiques :**

- Coster M. et Chermant J.L. (1989) - Précis d'analyse d'images. CNRS, Paris
- Crespo J., Serra J. et Schaffer R.W. (1993) - Image segmentation using connected filters. in Mathematical Morphology and its applications to signal Processing, Barcelona, May 12-14, 1993, 52-57.
- Lancaster N. (1985) - Winds and sand movements in the Namib sand sea. *Earth surface proceses and landforms*, vol. 10, p. 607-619.
- Levaldi S. (1981) - Proc. NATO Advanced Study Institute, Bonas, France, éd. Par Simon J.C. et Haralick R.M., Riedel D. Publishing Compagny, 1981.

- Mazille J.E. (1988)** - Mathematical morphology and convolution. *Journal of microscopy*, Vol. 156, Pt 1, p. 3-13.
- Meyer F. (1978)** - Contrast feature extraction. - Special Issue of Practical Metallography, 8, 374-380.
- Oulehri T. (1992)** - Etude géodynamique des migrations de sables éoliens dans la région de Laayoune (Nord du Sahara marocain). Thèse d'Université Paris 6, n°92-12, 223 p.
- Pratt W. (1978)** - Digital Image Processing, Wiley and sons, New York, 750 p.
- Prewitt J.M.S. (1970)** - dans "Picture processing and psychopictories", éd. par Rosenfeld A. et Linpking B., Academic Press, London.
- Serra J. (1982)** - Image Analysis and Mathematical Morphology, Academic Press, London, 628 p.
- Serra J. (1988)** - Image Analysis and Mathematical Morphology, Theoretical Advances, vol. 2, Academic Press, London, 422 p.