

Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux,
1993, n°53, p. 221-232, 6 fig., 2 tabl.

QUANTIFICATION ET CARTOGRAPHIE PAR TELEDETECTION DES AIRES DUNAIRES SUR LES IMAGES SPOT PANCHROMATIQUE A PARTIR DES METHODES DE LA MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE

*QUANTIFICATION AND AUTOMATED CARTOGRAPHY OF DUNE
AREAS BY REMOTE SENSING OF PANCHROMATIC SPOT IMAGES
USING MATHEMATICAL MORPHOLOGY METHODS.*

par

Yann CALLOT*, Catherine MERING** et André SIMONIN***

Mots-Clés : Cartographie,
Géomorphologie,
Morphologie mathématique,
Dunes vives,
Photo-interprétation,
Déserts,
Régions arides,
Reconnaissance de formes.

Key-Words : Cartography,
Geomorphology,
Mathematic Morphology,
Sharp dunes,
Photo-interpretation,
Desert,
Arid areas,
Pattern recognition.

Résumé

Le nord-est du Grand Erg Occidental (Sahara Algérien) est une région à couverture continue de sables grossiers organisés en alignements de grands dômes séparés par des couloirs où domine la déflation. Des petites dunes vives à sables fins (*aklés*) recouvrent les dômes. L'homogénéité du substrat rendant difficile une approche spectrale, une cartographie automatique des dômes et des aires de déflation a été effectuée à partir des méthodes de la Morphologie Mathématique par élaboration d'une *séquence* d'opérations. Les images SPOT Panchromatique ont été utilisées, car elles sont les seules à avoir une taille de pixels permettant de différencier les formes. L'image originelle a été traitée en teinte de gris pour homogénéiser les aires d'aklés, puis binarisée et les contours ont été régularisés. La validation a été effectuée par comparaison avec la photo-interprétation et mesure de la différence symétrique entre l'ensemble calculé et l'ensemble photo-interprété. L'écart entre les deux méthodes varie entre 8 et 10% selon les aires traitées.

Fonds Documentaire IRD



010025370

Fonds Documentaire IRD

Cote : Bx 25370 Ex : unique

* URBAMA, Département de Géographie, Université de Tours, site Loire, 23 rue de la Loire, B.P. 2221, 37021 TOURS Cedex

** Unité de Télédétection, L.I.A., ORSTOM, 72 route d'Aulnay, 93143 BONDY Cedex

*** IMAGEO-CNRS, 191 rue Saint-Jacques - 75005 PARIS

Abstract

The northeastern part of the Great Western Erg (Algerian Sahara) is an area with a continuous cover of coarse sands, organized in alignments of large domes separated by corridors where deflation prevails. The domes are covered by small sharp dunes of fine sand (*aklés*). The homogeneity of the substratum does not favor a spectral approach. The cartography of the domes and deflation areas is performed by using Mathematical Morphology methods in a *sequence* of transformations. Panchromatic SPOT images are preferred, because the 10 by 10 m pixel resolution is the only unclassified satellite image data that enable differentiation of the landforms. The initial image is processed with greytone filters in order to homogenize the *aklé* areas. It is next thresholded and the contours of the resulting sets are then regularized. The validation is obtained by comparison with photo-interpretation. The *symmetrical difference* between photointerpretation and automated cartography is between 8 % in areas of simple dune morphology and 10 % in complex areas.

INTRODUCTION

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

La photo-interprétation "classique" est utilisée depuis longtemps pour l'étude des dunes (Clos-Arceuduc, 1969, Mainguet & Callot, 1978). Elle présente le défaut de n'être pas quantifiable et de nécessiter un lever à la main des formes. Pour s'affranchir de la phase "manuelle" de la photo-interprétation, nous avons cherché à réaliser par télédétection la cartographie et la mesure d'une série d'objets géomorphologiques. Les travaux présentés ici ont été effectués dans le cadre d'un contrat P.N.T.S. (programme National de Télédétection Spatiale) portant sur les divers apports de la télédétection à l'étude géomorphologique des massifs dunaires. Ils ont été réalisés pour leur plus grande part à l'Unité de Télédétection de l'ORSTOM - BONDY grâce au logiciel PLANETES.

PRESENTATION DU MILIEU

CONTEXTE. - La région choisie pour l'étude (fig.1a) se trouve au NW du Sahara algérien, dans la partie NE du Grand Erg Occidental, autour de 31°45'N et 2°40'E, dans des conditions climatiques assez arides -les précipitations varient entre 60 et 30mm- pour que le rôle de la couverture végétale soit négligeable. Nous avons utilisé une image SPOT Panchromatique (KJ 52/287 du 23/12/1989) et une image Landsat Thematic Mapper (195/038 du 25/12/1988).

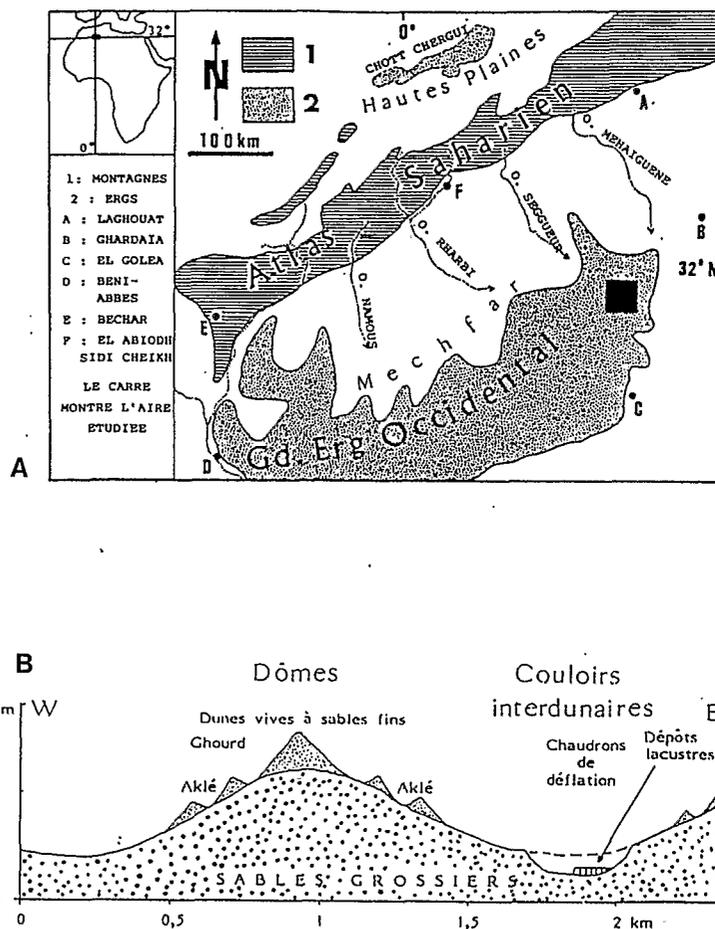


Fig. 1 - A : croquis de localisation ; B : coupe des formes dunaires.
Fig. 1 - A : Index Map ; B : Cross-section of the sand-hill shapes.

GEOMORPHOLOGIE. - La morphologie dunaire est bien contrastée (Callot, 1987, 1991) avec quatre types de formes (fig.1b) :

- De grands dômes souvent allongés et alignés, à sables grossiers, constituent la masse principale de l'Erg.
- Des formes dunaires vives à sables fins. De petites dimensions, très serrées, elles forment un *aklé* (groupement de dunes jointives d'aspect réticulé); lorsque la fourniture de sable devient trop abondante au sommet des dômes, il se forme des *ghourds* (dunes pyramidales) Dans la plupart des cas, l'aklé est superposé aux grandes formes dunaires.
- Des *feidjs*, couloirs interdunaires à couverture de sables grossiers épaisse (plusieurs dizaines de mètres) et continue, correspondent à des aires de déflation.
- Des "chaudrons", dépressions fermées creusées dans les secteurs de déflation maximale dans la couverture sableuse des feidjs.

La morphologie de l'Erg peut être réduite à deux types de formes: l'ensemble *dômes recouvert d'aklés* d'une part et l'ensemble *feidjs perforés par des chaudrons* d'autre part. C'est par la mesure des surfaces et des limites de ces deux ensembles qu'il est possible de quantifier les aires d'érosion et d'accumulation éoliennes dans l'Erg.

Cette dualité des formes est la conséquence de la remarquable stabilité des aires d'action éolienne dans la région : les chaudrons correspondent à des aires de déflation dont la situation est restée inchangée depuis le Pléistocène supérieur au moins -puisqu'ils contiennent des grès antérieurs à l'Holocène (Callot, 1991)-, et probablement depuis bien plus longtemps : la plus grande partie de l'Erg est organisée selon une structure éolienne figée par une dalle hama-dienne polygénique remontant au Plio-Pléistocène (Callot, 1988). Durant l'humide holocène, l'Erg a été stabilisé et des paléolacs se sont installés dans les fonds des chaudrons (Callot, 1992; Callot et Fontugne, 1992). Depuis le retour de l'aridité, vers 4 000 BP, les sables fins ont été remis en activité et se sont surimposés sur les aires d'accumulation sableuse des dômes pour donner le modelé actuel.

CARTOGRAPHIE PAR ANALYSE SPECTRALE

Plusieurs méthodes sont utilisées pour cartographier ou préciser les aires de phénomènes observables sur des images satellitaires. Une approche fréquente s'effectue à partir de l'analyse des réponses spectrales de différentes formes. Les scènes Thematic Mapper sont particulièrement adaptées à l'application de cette démarche grâce à leurs

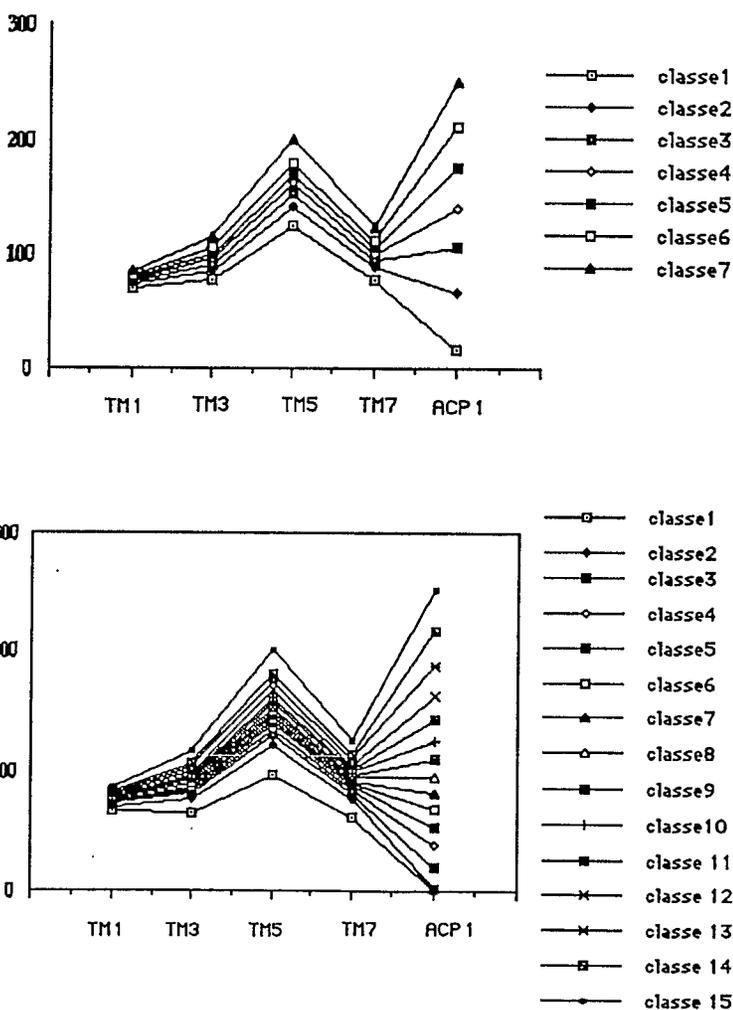


Fig. 2 - Classification automatique des pixels de l'image TM par la méthode des Nuées Dynamiques en 7 et 15 classes : ordonnancement des classes selon les valeurs moyennes des canaux.
 Fig. 2 - Coordinates of the mean values of four TM channels and a first Karunhene-Loeve component (ACP1) within each of the class resulting from both 7 and 15 classes dynamic clustering of TM.ERG.

nombreux canaux (7 dont un, le canal 6 infrarouge thermique, n'est pas utilisable dans le cas présent). Mais on observe dans l'Erg une remarquable corrélation entre ces canaux, due à la très grande homogénéité du substrat, exclusivement sableux dans tous les types de formes. La radiométrie rend compte alors essentiellement des variations de l'éclairement dues au relief sur un même "état de surface" (Escadafal, 1981).

Cette corrélation est si marquée que lorsqu'on effectue une classification automatique par la méthode des Nuées Dynamiques (Diday, 1971) à partir des canaux 1,3,5,7 et de la première composante d'une Analyse de Karunhene-Loeve des canaux 1,2,3,4,5,7 d'un extrait de la scène Thematic Mapper centré sur l'Erg, on constate que l'ordre des valeurs moyennes par classe pour un canal donné est identique pour tous les canaux. Cette corrélation a été vérifiée pour les classifications à 7,9, 11, 13 et 15 classes (cf fig.2). Dans un tel cas, le résultat d'une classification automatique peut être assimilé à une compression optimale des informations multispectrales.

La classification s'avère insuffisante pour identifier les formes. Si l'on considère un objet géomorphologique comme un dôme, l'opposition entre son versant éclairé et son versant à l'ombre sera nette et apparaîtra dans des classes différentes. Mais l'hétérogénéité de chaque versant, due aux irrégularités topographiques est telle qu'il n'est pas possible de fusionner les deux classes pour reconstituer la forme du dôme, car ces classes ne contiendront pas la totalité des dômes tout en contenant d'autres objets extérieurs. Par exemple, les versants face au soleil des chaudrons ont une réponse spectrale identique à celle des versants ensoleillés des dômes, ne permettant pas de les distinguer dans la classification. L'absence de correspondance entre classes radiométriques et formes ne permet donc pas d'établir une cartographie géomorphologique du massif dunaire fondée sur cette approche et encore moins d'y effectuer des quantifications des aires.

CARTOGRAPHIE PAR ANALYSE MORPHOLOGIQUE

Photo-interprétation et cartographie

L'étude des possibilités de classification multispectrale a montré que l'homogénéité du substrat donne un rôle prépondérant à la géométrie des formes par rapport à la réponse radiométrique des objets, quel que soit le type de capteur utilisé. L'étude passe donc nécessairement par une analyse des formes. Dans ce cas, on utilise souvent la photo-interprétation pour identifier et extraire les formes recherchées. Fondée sur la perception visuelle d'objets sur un document analogique issu d'une prise de vue verticale, elle procède, comme toute analyse visuelle, d'un effort de structuration de l'image. Les travaux dans le domaine de la psychologie cognitive et plus précisément ceux qui se réfèrent à la théorie de la Gestalt (Köhler, 1964), ont montré que cette structuration est dépendante à la fois de l'objet observé et du sujet observateur qui analyse l'image en fonction de ses connaissances et de ses buts.

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

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

Parmi les nombreuses méthodes numériques permettant d'exécuter les fonctions de simplification et d'extraction à partir des images à niveaux de gris (Pratt, 1978), les méthodes de la Morphologie Mathématique (Serra, 1982) sont plus particulièrement adaptées à notre étude : elles permettent à l'opérateur de structurer progressivement l'image selon les critères morphologiques qu'il juge pertinents (Mering et Jacqueminet, 1987). Notre objectif est de délimiter, à partir d'une image en teinte de gris, des entités de forme thématiquement significatives. Cette approche peut donc être assimilée à une "photo-interprétation assistée par ordinateur".

Principes des transformations morphologiques. Méthodes utilisées

Les transformations morphologiques sur les images binaires

L'image numérique analysée est une image *binnaire* résultant par exemple du seuillage d'une image à niveaux de gris ou d'une classification préalable à partir de plusieurs images en niveaux de gris (par exemple une classification multispectrale). L'ensemble ainsi défini sur l'image correspond à une valeur unique du seuil ou à une classe unique. Les seules valeurs de pixels sont 0 et 1.

On notera X l'ensemble des points de l'image ayant la valeur 1. En Morphologie Mathématique, la définition d'"ensemble" est celle de la Théorie des Ensembles. L'analyse morphologique d'un ensemble X s'effectue par l'intermédiaire de transformations ensemblistes Ψ *en tout ou rien*

$$X \text{ -----} \rightarrow \Psi(X)$$

Ces transformations opèrent à l'aide d'un *élément structurant* -qui sera appelé B - de géométrie simple tels que: le cercle, le segment, l'hexagone. On déplace B de façon à ce que son centre x occupe toutes les positions de l'espace euclidien. Pour chaque position, on vérifie si B et X vérifient un certain type de *relation ensembliste*, cette relation étant exprimée en terme d'*union*, d'*intersection* ou d'*inclusion*. Le résultat de cette vérification s'exprime par une réponse positive ou négative, d'où le nom de *transformations en tout ou rien*. Par exemple, pour effectuer une *érosion*, on vérifiera pour chaque point x de l'espace si B , centré en x , est inclus dans X . Si B , n'est pas inclus, on attribuera à X la valeur 0. L'ensemble des points x de l'espace pour lesquels la relation est vérifiée forme un nouvel ensemble, $Y(X)$. L'ensemble *érodé* de X , noté $E^B X$ aura une surface plus petite que celle de X , tout en conservant la même structure. De la même façon pour effectuer une *dilatation*, on vérifiera si B , centré en x rencontre X (c.a.d. si l'intersection entre B et X est différent de l'ensemble vide). L'ensemble *dilaté* de X , noté $D^B X$ aura une surface plus grande que celle de X , tout en conservant la même structure.

A partir de l'*érosion* et de la *dilatation*, on définit deux autres transformations *en tout ou rien* qui sont l'*ouverture* X_B [érosion puis dilatation de X] et la *fermeture* X^B [dilatation puis érosion de X]. L'ensemble ouvert X_B est plus régulier, moins riche en détail, et moins étendu que l'ensemble initial X (il est inclus dans celui-ci). L'*ouverture* adoucit les contours, coupe les isthmes étroits, supprime les petites îles et les caps étroits. L'ensemble fermé X^B est également plus régulier et moins riche en détails que l'ensemble initial, tout en étant plus étendu que celui-ci (X est inclus dans X^B). La *fermeture* bouche les canaux étroits, supprime les petits lacs et les golfes étroits.

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

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

Les filtres morphologiques sur les images en niveaux de gris

On généralise les transformations morphologiques sur des ensembles aux images en teintes de gris de la façon suivante: On considère une fonction $f(x)$. 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 (ie l'élément B centré au point x) la valeur inférieure que prend $f(x)$ dans ce domaine.

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.

Considérons, pour en simplifier l'illustration, une fonction de gris $f(x)$ d'une image, où $f(x)$ est positif puisque $f(x)$ correspond à un niveau d'éclairé. Cette fonction peut être considérée comme appartenant à l'espace R^2 dont chaque point serait défini par x et par t (valeur d'éclairé représentée sur l'axe des y). L'ensemble X_f correspond au graphe de la fonction. L'ensemble formé par X_f et les points au dessous définit un autre ensemble, le sous-graphe U_f de $f(x)$.

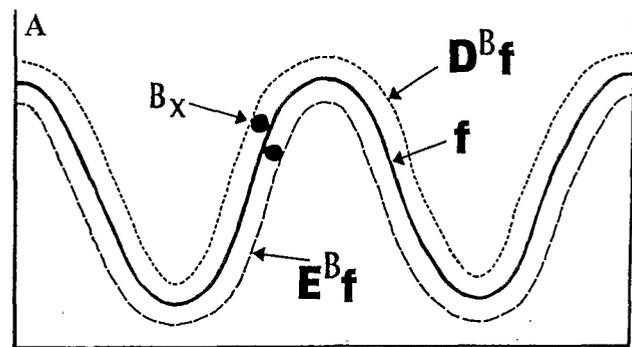
Si l'on assimile le sous graphe U_f de f à un relief (figure 3a), on dira que l'*érosion* réduit les "pics" et élargit les "vallées", alors que la *dilatation* épaissit les "pics" et comble les "vallées".

On définira de même, par analogie avec les transformations ensemblistes, l'*ouverture* f_B et la *fermeture* f^B morphologiques d'une fonction f .

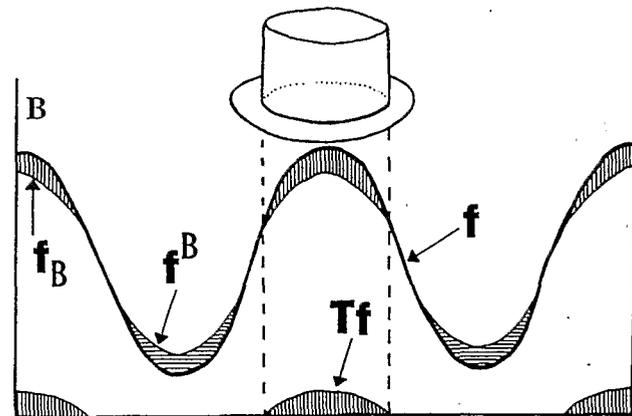
Ces transformations ne modifient l'image en niveaux de gris qu'en certains points: l'*ouverture* arase les pics acérés et la *fermeture* comble les vallées étroites du relief auquel on a assimilé le sous graphe U_f , comme on l'a illustré sur la figure 3b

On utilisera les propriétés de ces transformations pour définir des *filtres morphologiques* tels que les *chapeaux haut de forme* (fig. 3b). 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 .

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.



A : Erosion et dilatation d'une fonction



B : ouverture, fermeture et "chapeau haut-de-forme" d'une fonction

Fig. 3 - Filtres morphologiques sur les images en niveaux de gris. - A) Erosion et dilatation d'une fonction - B) Ouverture, fermeture et "chapeau-haut-de-forme" sur ouverture d'une fonction.

Fig. 3 - Morphological transformations of a function. - A) Erosion and dilation - B) Opening, Closing and Top Hat on opening.

CARTOGRAPHIE DES FORMES EOLIENNES

Méthodologie

Les images SPOT Panchromatique de l'Erg montrent des ensembles, souvent allongés, à texture différente: les dômes recouverts d'aklés sont contrastés et clairs; leur aspect très hétérogène est dû à la présence d'oppositions ombre-lumière dans les petites dunes vives Ils sont séparés par les aires de déflation, ensembles de forme similaire, à texture homogène et de teinte plus sombre (fig. 4a). Notre démarche visant à individualiser chacun de

ces deux ensembles, nous avons utilisé la grande différence texturale existant entre les aires d'aklés correspondant aux dômes et les aires de déflation correspondant aux couloirs interdunaires.

La définition des dômes passant par celle des aklés les recouvrant, nous avons utilisé les images Spot Panchromatique car leur résolution spatiale (10*10m) est la seule à permettre de détecter les sifs pris individuellement. Les canaux correspondant à la bande "visible" des images Landsat TM ne permettent pas d'aboutir à cette différenciation : les aklés sont de si petites dimensions que leurs faces éclairées à réponse spectrale élevée ne constituent jamais le seul élément d'un pixel d'image Landsat TM (30*30m) qui comporte toujours des éléments à l'ombre. Il en résulte une diminution de l'opposition entre les aires d'aklés et les aires de déflation rendant inefficaces les traitements utilisés.

Les traitements comportent deux phases ou *séquences*¹ de transformations morphologiques: la première, en teintes de gris, est une homogénéisation des aires que l'on cherche à distinguer; un seuillage des niveaux de gris permet une première segmentation grossière de l'image correspondant aux deux ensembles "dômes" et "aires de déflation"; la seconde consiste à préciser les contours des ensembles sur l'image binaire obtenue par seuillage.

Le résultat final de l'étude est une carte des aires de dunes vives et des aires de déflation. La déflation correspondant aux couloirs interdunaires, on obtient une cartographie des édifices dunaires de l'Erg, avec d'une part les grands dômes, souvent alignés et leurs aklés, et d'autre part les couloirs interdunaires et les chaudrons qui les occupent. Le comptage des pixels de chaque ensemble permet alors de quantifier les aires.

Transformations morphologiques pour l'extraction des aires de déflation (tableau 1)

C'est par délimitation des zones claires correspondant aux dunes vives que l'on déduit les zones de déflation qui sont considérées comme l'ensemble complémentaire de l'ensemble "dunes vives". Pour cela nous avons d'abord lissé les textures contrastées des aires d'aklés en aires claires sans modifier l'homogénéité des aires sombres de déflation pour pouvoir associer une même teinte de gris à un même ensemble.

OUVERTURE DE TAILLE 1 CHAPEAU HAUT DE FORME DILATATION DE TAILLE 2	MISE EN EVIDENCE : - DES SIFS - DES AKLES
BINARISATION AVEC SEUIL A 9 EROSION DE TAILLE 2 RECONSTRUCTION	IDENTIFICATION DES AIRES DE DEFLATION
COMPLEMENTATION EROSION DE TAILLE 2 RECONSTRUCTION COMPLEMENTATION	COMBLEMENT DES TROUS

Tabl. 1 - Séquence de cartographie des aires de déflation.
Tabl. 1 - Sequence for the mapping of deflation areas.

Toutes les transformations ont été effectuées soit à l'aide d'un élément structurant octogonal en trame carrée (fig. 5) soit à l'aide d'un élément structurant hexagonal en trame hexagonale (cf fig.4). Dans les deux cas, on évite de privilégier une orientation particulière des objets.

Sur la figure 4, nous représentons certaines des étapes de la séquence de transformations morphologiques effectuée à partir d'un extrait de la scène SPOT de 256 pixels de côté sur lequel on a calculé une trame

¹Une *séquence* est une suite d'au moins deux transformations morphologiques visant à déterminer un ensemble ou une mesure sur un ensemble. Une séquence simple, comme une *reconstruction*, peut être intégrée à une séquence plus complexe (voir infra). Une séquence peut parfois être entièrement automatisée. Dans le cas présent, elle ne l'est pas totalement : une seule des opérations, le seuillage des images en teintes de gris a été effectuée par l'opérateur.

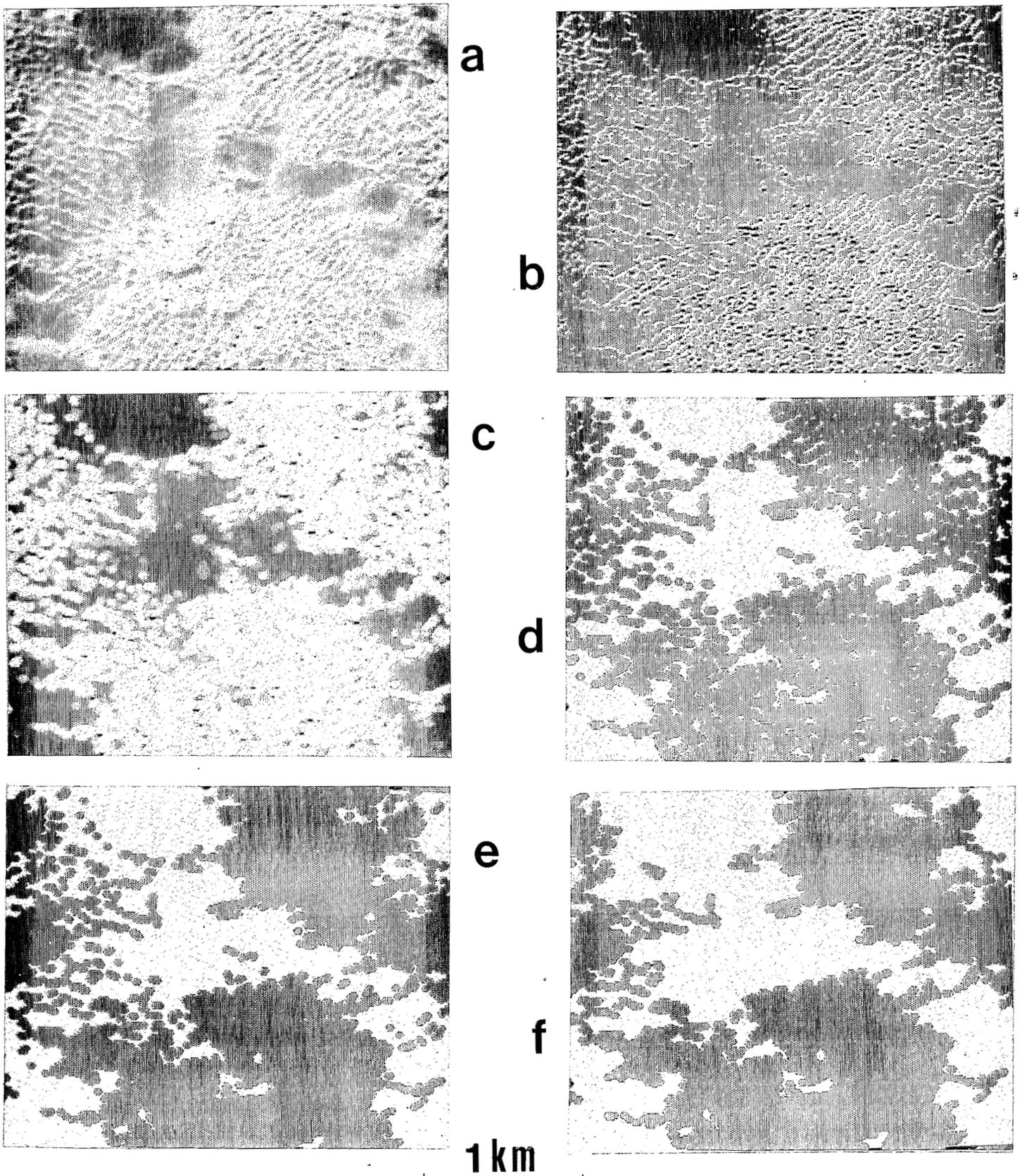
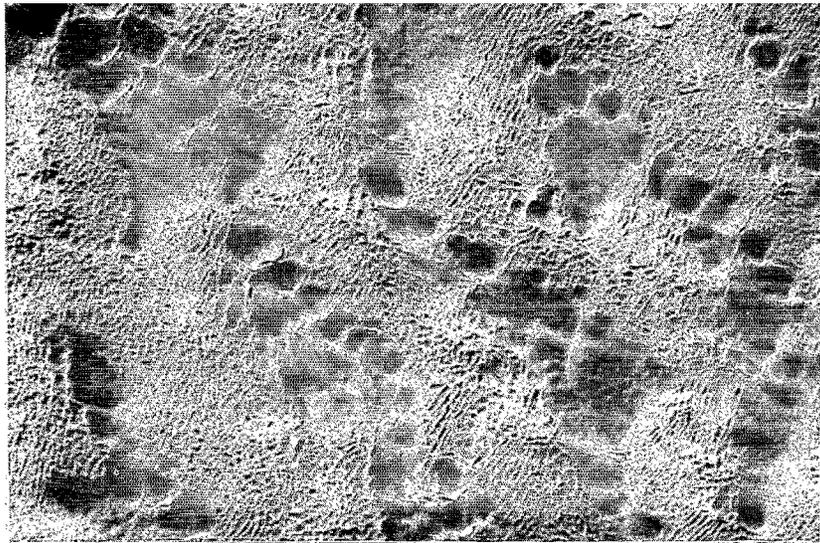
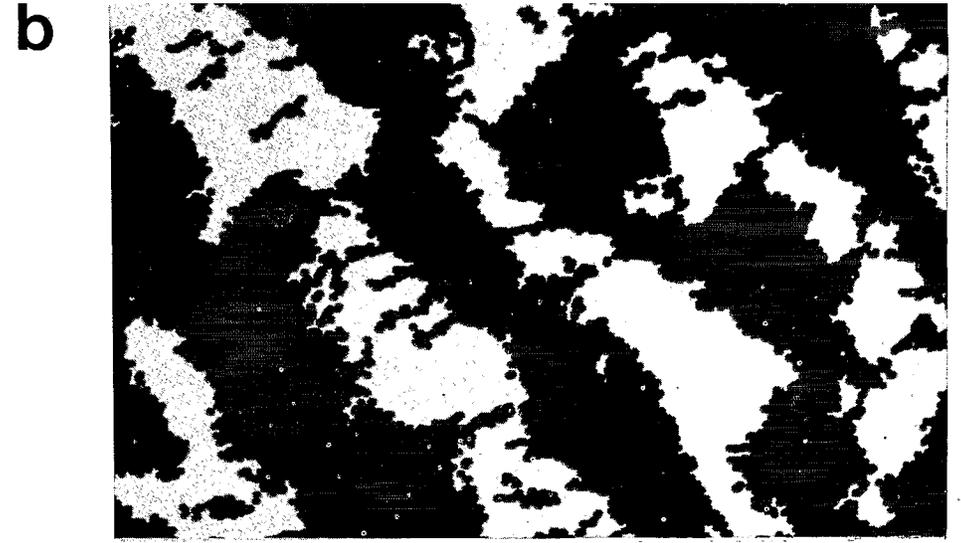


Fig. 4 - Séquence de transformations morphologiques délimitant les aires de déflation à partir d'un extrait de 256 pixels de côté mis en trame hexagonale de l'image SPOT Panchromatique du 52/287 du 23/12/1989- 4a: image originale - 4b : *Chapeau-haut-de-forme* - 4c : *Dilatation* de taille 2 - 4d : *Seuillage* - 4e : *Reconstruction* - 4f : Image finale après comblement des petits trous

Fig. 4 - Sequence of morphological transformations for delimiting deflation areas (256 by 256 pixels extract of the Panchromatic SPOT image 52/287 dated 23 December 1989 ; hexagonal grid). - 4a : Initial image - 4b : *Top hat* - 4c : *Dilation* of size 2 - 4d : *Thresholding* - 4e : *Reconstruction* - 4f : Final image after the filling of small holes.



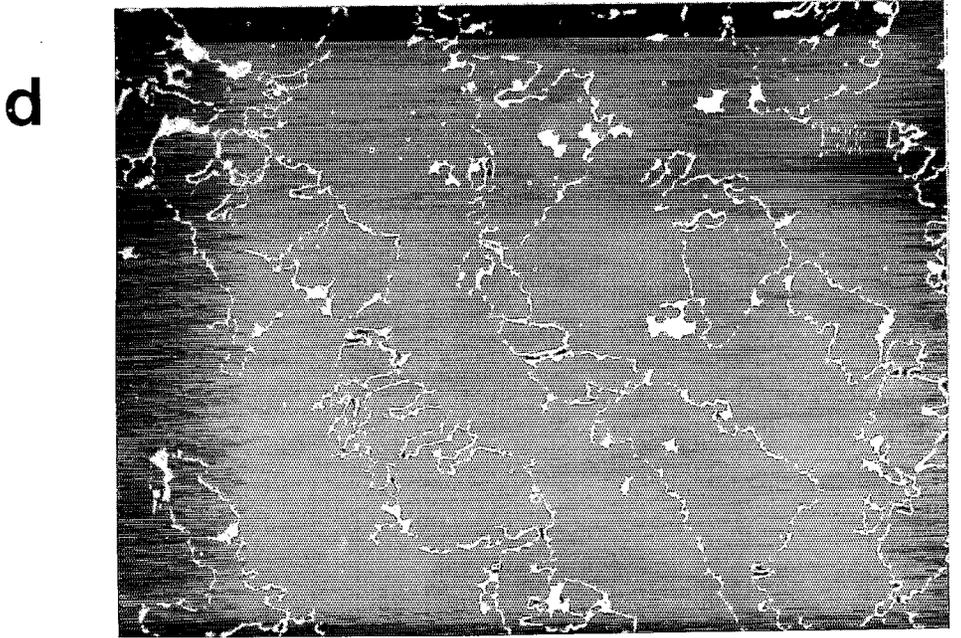
a



b



c



d

2 km

Fig. 5 - Comparaison d'un extrait de la scène SPOT Panchromatique (52/287 du 23/12/1989) et de sa cartographie par Morphologie Mathématique, et par photo-interprétation
5a : Image originale. - 5b : Cartographie automatique des aires de déflation - 5c : Aires de déflation cartées par photo-interprétation - 5d : image de la différence symétrique entre cartographie automatique et photo-interprétation.
Fig. 5 - Comparison between an extract of the Panchromatic SPOT image 52/287 dated 23 December 1989 and its cartography by Morphological Mathematics and by photo-interpretation. - 5a : Original image - 5b : Automated cartography of deflation areas - 5c : Deflation areas mapped by photo-interpretation - 5d : Symmetrical difference between automated cartography and photo-interpretation.

hexagonale (fig. 4a). Les arêtes de dunes vives face au soleil ont un niveau de gris très élevé. On a donc pu les mettre en évidence à l'aide d'un *chapeau haut de forme* (fig. 4b) à partir d'une *ouverture de taille 1*.

Avec ce traitement, on récupère en clair les arêtes des aklés et on obtient des aires "zébrées". Il reste en sombres les parties à l'ombre des dunes et les petites aires sableuses entre les sifs. Comme les aires sombres interdunaires sont étroites, on peut les faire disparaître en les recouvrant par un marqueur qui va envahir l'aire dunaire grâce à une *dilatation de taille 2* (fig. 4c).

Les teintes de gris sont alors suffisamment homogènes et différenciées pour permettre de délimiter les deux ensembles recherchés et l'image est binarisée. Par examen à l'écran, ce seuil a été fixé à une valeur de gris de 9 qui produit des aires (en noir) d'une surface proche de celle des aires de déflation définies par l'observation directe (fig. 4d).

L'ensemble ainsi obtenu est plus étendu que les aires observées sur le terrain. Une séquence de morphologie binaire a été mise au point de façon à nettoyer l'image. En effet, les zones de déflation sont des aires d'un seul tenant relativement étendues. Il faut donc supprimer les petits ensembles éparpillés, car il ne peuvent pas être assimilés à des zones de déflation mais à de petites aires interdunaires dans les zones d'aklés.

On élimine d'abord les ensembles isolés de rayon inférieur à trois pixels par une *reconstruction* (fig. 4e) à partir d'un marqueur qui est l'*érosé de taille 2* de l'ensemble précédent. Le résultat de la *reconstruction* ne conserve que les aires d'un seul tenant et de grande surface. La *reconstruction* est une transformation beaucoup moins "sévère" que l'*ouverture*, car elle conserve les limites originelles des ensembles, ne supprimant que les petites entités déconnectées des ensembles principaux.

Les petits trous subsistant à l'intérieur des grandes aires sont éliminés par une *reconstruction* de l'ensemble complémentaire après *érosion* de taille 2 de celui-ci.

L'image finale résultante (fig. 4f) correspond sensiblement à l'ensemble recherché des aires de déflation.

En figure 5 sont représentées la scène originale (fig. 5a) et la cartographie correspondante réalisée en trame carrée en suivant la séquence complète (fig. 5b).

Validation de la cartographie automatique.

Dans le domaine d'une cartographie des formes basée sur la Morphologie Mathématique, il n'existe pas de méthode standard de validation. Celle-ci doit être effectuée sur les formes dans leur globalité, donc sur la totalité d'une portion de l'image contenant assez de formes pour qu'elle soit représentative. Pour cette raison nous comparons la carte produite par calcul avec celle produite par photo-interprétation. Chaque cartographie est associée à un ensemble de l'espace euclidien et la validation repose sur la mesure de la *différence symétrique* Y entre les deux ensembles X (cartographie par télédétection) et X' (cartographie par photo-interprétation) où:

$$Y = (X \cup X') / (X \cap X')$$

Il s'agit dans notre cas de minimiser la mesure de l'ensemble Y .

Une cartographie des aires de déflation a été effectuée manuellement par zonage de la scène SPOT Panchromatique sur deux zones-tests de 900*750 pixels (9*7,5km) dont une est représentée sur la figure 6.

L'image (fig. 5d) de la *différence symétrique* entre photo-interprétation (fig. 5c) et cartographie automatique (fig. 5b) correspond à une représentation spatiale de l'erreur de la cartographie automatique des aires de déflation par rapport à la cartographie par photo-interprétation des mêmes objets. Le tableau II montre que cette erreur, variable selon les zones, n'excède pas 11%, valeur acceptable pour une procédure de cartographie automatique.

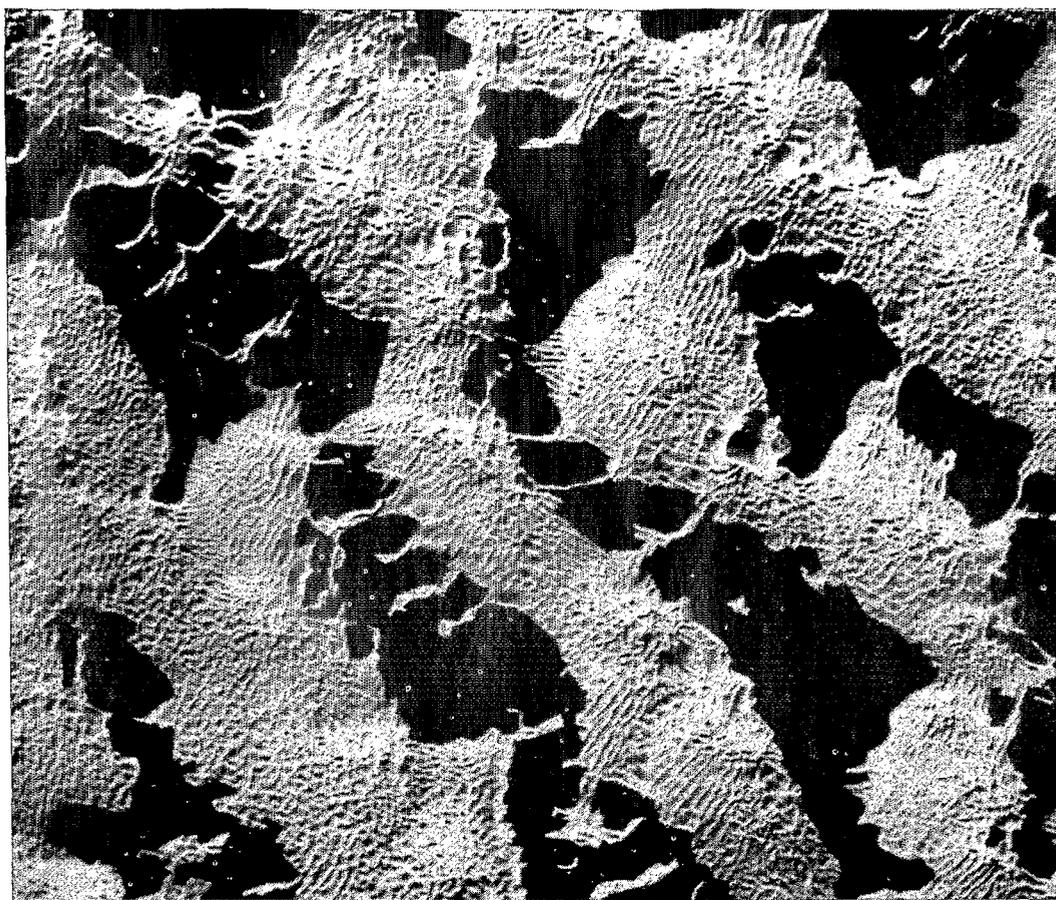


Fig. 6 - "Photo interprétation" d'une des zones-test de l'Image SPOT Panchromatique.
 Fig. 6 - "Photo-Interpretation" of a test-area of the Panchromatic SPOT image.

	Y1	Y2	ERREUR TOTALE
ERG 1	9%	2%	11%
ERG2	5%	3%	8%

Tabl. II - Différences symétriques entre photo-interprétation et cartographie automatique sur les aires de validation.
 Tabl. II - Symmetrical differences between photo-interpretation and automated cartography in the validation areas!

CONCLUSION

L'utilisation des outils de la Morphologie Mathématique pour l'analyse des images SPOT Panchromatique du Grand Erg Occidental nous paraît pertinente pour la cartographie et l'étude géomorphologique quantitative d'un tel environnement avec de faibles taux d'erreurs. La méthode utilisée peut être généralisée aux autres ergs. Les formes à arêtes vives présentant une opposition nette entre versants éclairés et versants à l'ombre se trouvent dans la totalité des massifs dunaires où elles s'opposent aux formes arrondies spécifiques des sables grossiers ou fixés par la végétation. La séquence de transformations morphologiques présentée ici permet donc de distinguer les aires d'aklés à sables fins très mobiles et immédiatement dangereux pour l'environnement, des aires plus stables moins dangereuses dans l'immédiat, mais susceptibles de se dégrader. Dans des régions plus peuplées comme la frange sahélienne du Sahara, des études similaires à celle décrite ici auraient donc des applications pratiques pour l'aménagement de ces régions.

dangereuses dans l'immédiat, mais susceptibles de se dégrader. Dans des régions plus peuplées comme la frange sahélienne du Sahara, des études similaires à celle décrite ici auraient donc des applications pratiques pour l'aménagement de ces régions.

BIBLIOGRAPHIE

- CALLOT Y. (1987)
Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas Saharien au Grand Erg Occidental : dynamique éolienne et paléo-lacs holocènes.
Th. Doct. Etat ès Sci., Univ. P. et M. Curie (Paris 6), *Mém des Sci. de la Terre*, 87-21, 412p.
- CALLOT Y. (1988)
Evolution polyphasée d'un massif dunaire subtropical : le Grand Erg Occidental (Algérie).
Bull. Soc. Géol. de France, Paris, 8ème sér., t. IV, n°6, p.1073-1079.
- CALLOT Y. (1991)
Le Grand Erg Occidental (Algérie). Histoire d'un massif de dunes.
Science et changements planétaires.Sécheresse, vol.2, n°1, p.26-39.
- CALLOT Y. (1992)
Paléo-lacs holocènes du Nord du Grand Erg Occidental (NW du Sahara algérien).
Bull. Soc. Géol. de France, mém. N.S., n°160, p.19-26.
- CALLOT Y. & FONTUGNE M. (1992)
Les étagements de nappes dans les paléolacs holocènes du nord-est du Grand Erg Occidental (Algérie).
C. R. Acad.Sci. Paris, t.315, Série II, p. 471-477.
- CLOS-ARCEDUC A. (1969)
Essai d'explication des formes dunaires sahariennes. - I.G.N., Paris,
Etudes de photo-interprétation, n°4, 66p.
- DIDAY E. (1971)
La Méthode des Nuées Dynamiques.
Rev. Stat. Appl., vol.19, n°2, p.19-34.
- ESCADAFAL R. (1981)
Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides.
Actes du 3ème Colloque de L'AIS, Traitements informatisés des données de sol, *Sols*, n°5, pp. 21-27.
- KHOLER W. (1964)
Psychologie de la forme.
Idées, Paris, p.174-175.
- MAINGUET M. et CALLOT Y. (1978)
L'Erg de Fachi-Bilma (Tchad - Niger). Contribution à la connaissance de la dynamique des ergs et des dunes des zones arides chaudes.
Mémoires et Documents du C.N.R.S., Paris, vol.18, 184 p.
- MERING C. et JACQUEMINET C. (1987)
An approach of quantitative description of sandhills shapes in the West African Sahel from remote sensing imagery.
Acta Stereologica, Ljubljana, p. 951-956.
- PRATT W. (1978)
Digital Image Processing.
Wiley and Sons, New York, 750p.
- SERRA J. (1982)
Image Analysis and Mathematical Morphology.
Academic Press, Londres, 638p.