

1

N →

### CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE DES DUNES SAHARIENNES D'APRES LES IMAGES SPOT

Yann Callot, Laboratoire de Géodynamique des Milieux Continentaux, Université P. et M. Curie, T26-36, 4  
Place Jussieu, 75252, Paris Cedex, France.  
Catherine Mering, Richard Escadafal, Unité de Télédétection, L.I.A., ORSTOM, 72 Route d'Aulnay, 93143 Bondy  
Cedex, France.  
André Simonin, IMAGEO-CNRS, 191 rue Saint Jacques, 75005 Paris, France.

**BUT.** - 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 substratum rendant difficile une approche spectrale, une cartographie des dômes et des aires de déflation a été effectuée à partir des méthodes de la Morphologie Mathématique. Les images SPOT Panchromatique ont été utilisées, car elles sont les seules à avoir un pouvoir de résolution permettant de différencier les formes. L'image d'origine a subi des transformations morphologiques en teintes de gris visant à homogénéiser les aires d'aklés. Elle a ensuite été seuillée et nettoyée. La validation a été effectuée par comparaison avec la photo-interprétation.

**PURPOSE.** - North-East of the Great Western Erg (Algerian Sahara) is an area continuously covered by coarse sands forming aligned great domes separated by interdunes corridors corresponding to deflation areas. Small dunes of fine sands (akles) are covering the domes. The homogeneity of the substratum makes spectral approach difficult. Therefore, methods of Mathematical Morphology have been used for mapping domes and deflation areas. SPOT Panchromatic images have been utilized, as their resolution power is the only one allowing discrimination of forms. Original image has been processed by grey-tone morphologic transformations in order to make the aspect of the akle areas more homogeneous. Then, it has been thresholded and cleaned out. Validation has been made comparatively to photo-interpretation mapping.

**MOTS CLES :** Cartographie, Géomorphologie, Morphologie Mathématique, Dunes vives, Photo-interprétation, Déserts, régions arides, reconnaissance de formes.

#### INTRODUCTION

L'étude géomorphologique des déserts est souvent limitée par l'absence de cartographie à une assez grande échelle et les difficultés, voire 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", utilisée depuis longtemps pour l'étude des dunes (Clos-Arceuduc, 1969, Mainguet & Callot, 1978) présente le défaut de n'être pas quantifiable et de nécessiter un lever à la main des formes. Le but recherché était donc, pour s'affranchir dès la phase "manuelle" de la photo-interprétation, de réaliser par télédétection la cartographie d'une série d'objets géomorphologiques.

#### PRESENTATION DU MILIEU

La région choisie pour l'étude est la partie NE du Grand Erg Occidental, dans le NW du Sahara algérien, autour de 31°45'N et 2°40'E sur laquelle a été utilisée une image SPOT Panchromatique (KJ 52/287 du 23/12/1989) et une image Landsat Thematic Mapper (195/038 du 25/12/1988). Elle se caractérise par une morphologie dunaire bien contrastée (Callot, 1991) où l'on observe quatre types de formes (fig.1).

- De grandes formes d'unaires, en dômes souvent allongés et alignés, à sables grossiers, qui 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. Dans la plupart des cas, l'aklé est superposé aux grandes formes dunaires.

- Des feidjs, couloirs interdunaires où la couverture de sables grossiers est épaisse (plusieurs dizaines de mètres) et continue, correspondent à des aires de déflation.

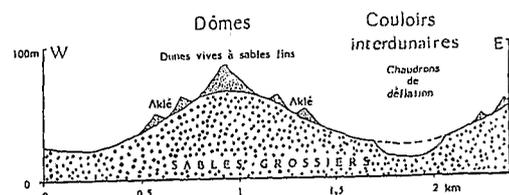


Fig.1 : Coupe des formes dunaires du NE du Grand Erg Occidental

- Des "chaudrons", dépressions fermées creusées dans les secteurs de déflation maximale dans la couverture sableuse des feidjs.

Les différences d'échelle spatiale des phénomènes permettent en fait de réduire la morphologie de l'Erg à deux types de formes: l'ensemble "dômes recouvert d'aklés" d'une part et l'ensemble "feidj perforé par des chaudrons" d'autre part. Cette dualité des formes est la conséquence de la remarquable stabilité des aires d'action éolienne dans la région: les dômes correspondent à des aires d'accumulation éolienne dont la situation est restée inchangée depuis le Pléistocène supérieur au moins (Callot, 1991).



Fonds Documentaire IRD  
Cote : Bx 25333 Ex : ungué

### CARTOGRAPHIE PAR ANALYSE SPECTRALE

Une première approche cartographique a été effectuée par l'analyse des réponses spectrales de différentes formes. Mais on observe une remarquable corrélation entre les canaux 1,2,3,4,5,7 de la scène Thematic Mapper. Seul le canal 6 n'a pas été retenu, ses caractéristiques radiométriques et de taille de pixels le différenciant nettement des autres canaux. La cause de cette corrélation importante est 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).

Suivant un procédé déjà courant pour effectuer la segmentation automatique d'une scène dans une perspective de cartographie, nous avons effectué 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. Les classes ainsi créées ont des réponses spectrales moyennes très corrélées dans tous les canaux: 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 multispectrale peut être assimilé à une compression optimale des informations multispectrales.

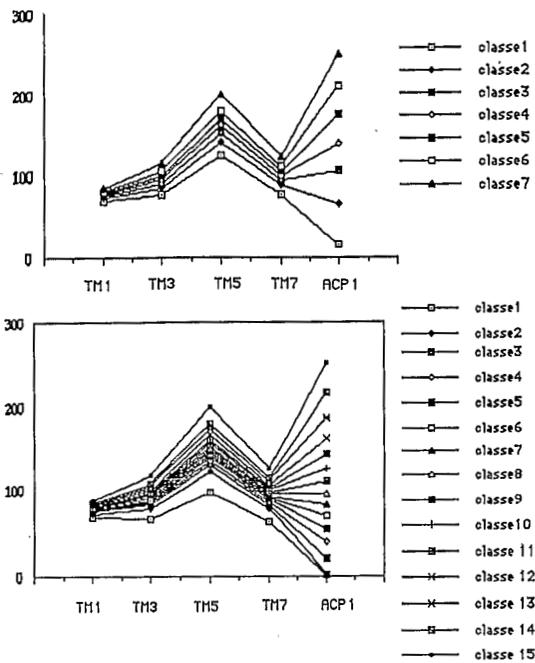


Fig. 2: Classification automatique des pixels de l'image TM par la méthode des Nuées Dynamiques en 7 et 15 classes: ordonnancement des classes selon les valeurs moyennes des canaux

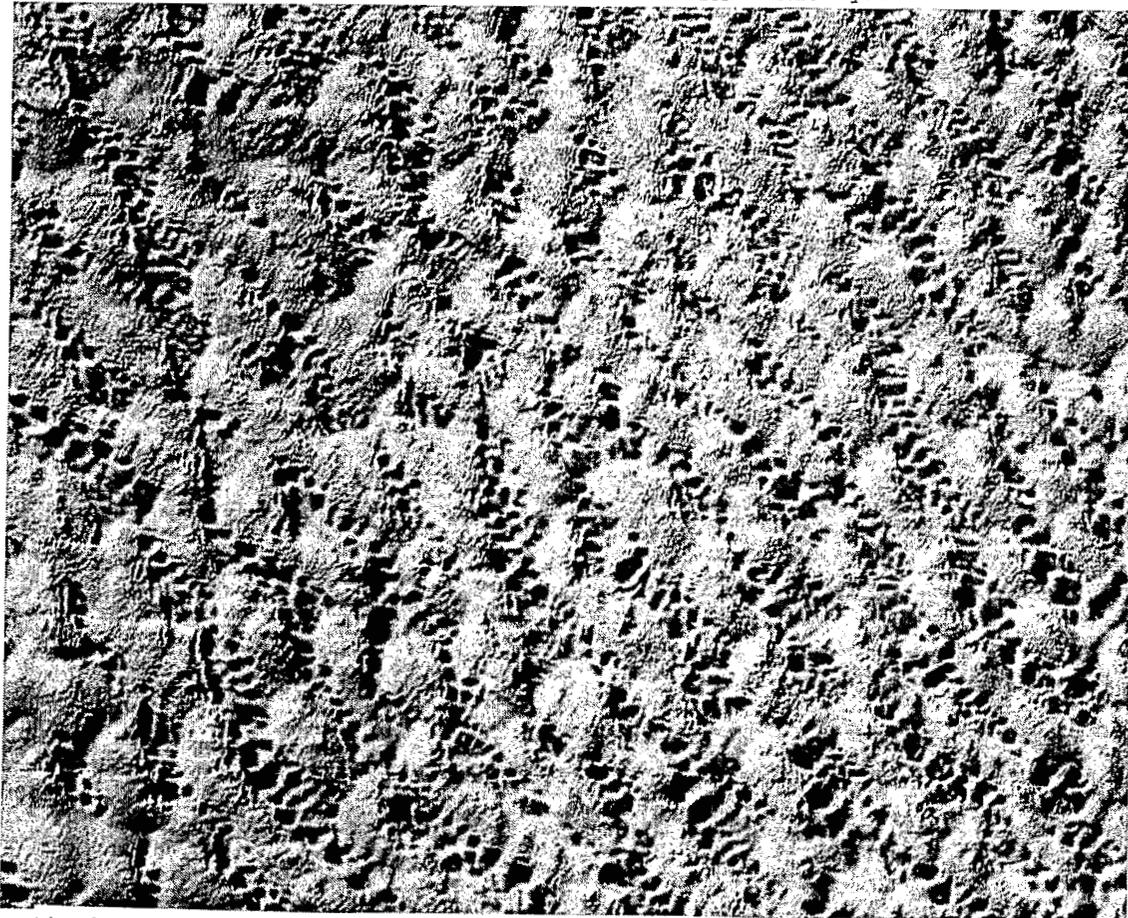


Fig. 3 : Extrait d'une image résultant d'une classification multispectrale à quinze classes de l'image Thematic Mapper.

Cependant la classification, tout en réduisant le nombre de niveaux de gris à analyser, 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 strictement identique à celle des versants ensoleillés des dômes, ne permettant pas de les distinguer dans la classification (cf fig.3) 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.

CARTOGRAPHIE PAR ANALYSE MORPHOLOGIQUE

Photo-interprétation et cartographie

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. 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. Comme l'ont montré de nombreux travaux dans le domaine de la psychologie cognitive et plus précisément ceux qui se réfèrent à la théorie de la Gestalt (Khôler, 1964), 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, 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 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.

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 teinte de gris, des entités de forme thématiquement significatives. Cette approche peut être assimilée à une "photo-interprétation assistée par ordinateur".

Principes des transformations morphologiques. Rappel sur les méthodes utilisées

Les Transformations Morphologiques sur les images binaires

L'image numérique analysée est une image binaire 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.

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 de l'ensemble X de  $R^2$  s'effectue par l'intermédiaire de transformations ensemblistes  $\Psi$  en tout ou rien

$$\begin{matrix} R^2 & \text{-----} & \rightarrow & R^2 \\ X & \text{-----} & \rightarrow & \Psi(X) \end{matrix}$$

Ces transformations opèrent à l'aide d'un élément structurant de géométrie simple tels que: le cercle, le segment, l'hexagone. On déplace l'élément structurant 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. L'ensemble des points x de l'espace pour lesquels la relation est vérifiée forme un nouvel ensemble,  $\Psi(X)$ . 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 (ie 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  $X_B$  et la fermeture  $X^B$ , de la façon suivante :

$$\begin{matrix} X_B & = & D^B(E^B X) \\ X^B & = & E^B(D^B X) \end{matrix}$$

où:

B est l'élément transposé de B, c'est à dire symétrique de B par rapport à son origine

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 a adouci les contours, coupé les isthmes étroits, supprimé 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 alors 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 idempotente. L'algorithme de la reconstruction est le suivant (fig.4) :

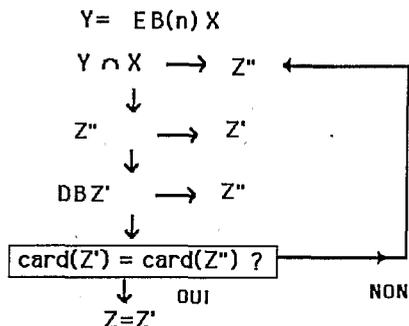


Fig.4 : Algorithme de la Reconstruction

Cette procédure est également 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 au cas des images en teintes de gris de la façon suivante: On considère une fonction  $f(x)$  dans  $R^2$ . 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, 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:

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

Considérons, pour en simplifier l'illustration, une fonction de gris  $f(x)$  d'une image définie dans  $R^1$ , où  $f(x)$  est positif puisque  $f(x)$  correspond à un niveau d'éclairément. Cette fonction peut être considérée comme appartenant à l'espace  $R^2$  dont chaque point serait défini par  $x$  et par  $t$ . On a donc l'ensemble  $X_f$  défini par:

$$X_f = \{ x, t : t=f(x) \}$$

qui 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  $f(x)$  :

$$U_f = \{ x, t : t \leq f(x) \}$$

Si l'on assimile le sous graphe  $U_f$  de  $f$  à un relief (cf figure 5), 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 et la fermeture morphologique d'une fonction  $f$ .

Si l'on se reporte au paragraphe précédent, on peut définir 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:

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

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

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  $U_f$ , comme on l'a illustré sur la figure 5.

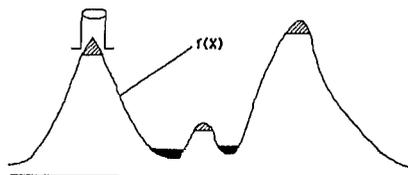


Fig 5 : le sous-graphe  $U_f$  de  $f$  assimilé à un relief

On utilisera les propriétés de ces transformations 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:

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

CARTOGRAPHIE DES FORMES EOLIENNES

Méthodologie

Les images SPOT Panchromatique de l'Erg sont constituées d'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. 6a). Notre démarche visant à individualiser chacun de ces deux ensembles, nous avons utilisé la grande différence texturale existant entre les aires de 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 a conduit à privilégier les images Spot Panchromatique car leur résolution spatiale (10\*10m) est la seule à permettre de détecter les sifs pris individuellement. Des essais effectués à partir des canaux correspondant à la bande "visible" des images Landsat TM n'ont pas permis d'aboutir à cette différenciation : les édifices des 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 nette diminution de l'opposition entre les aires d'aklés et les aires de déflation rendant inefficaces les traitements utilisés.

Ces traitements passent par deux phases: la première est une homogénéisation des teintes de gris 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. Ces traitements s'effectuent par des séquences de transformations morphologiques en teinte de gris pour réaliser la première phase et binaires pour réaliser la seconde. Une 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.

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.

Transformations morphologiques pour l'extraction des aires de déflation

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.

Toutes les transformations ont été effectuées soit à l'aide d'un élément structurant octogonal en trame carrée (cf fig 6) soit à l'aide d'un élément structurant hexagonal en trame hexagonale (cf fig.7). Dans les deux cas, on évite de privilégier une orientation particulière des objets.

Sur la figure 7, nous représentons certaines 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 hexagonale (fig 7a). 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. 7b) à partir d'une ouverture de taille 1.

Avec ce traitement, on ne récupère que les arêtes des aklés et on obtient des aires "zébrées" où il reste les aires sombres des parties à l'ombre des dunes et des 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 7c).

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. 7d).

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. 7e) à partir d'un marqueur qui est l'érodé 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

505 517

reconstruction de l'ensemble complémentaire après érosion de taille 2 de celui-ci.

L'image finale résultante (fig.7f) correspond sensiblement à l'ensemble recherché des aires de déflation.

En figure 6 sont représentées la scène originale (fig 6a) et la cartographie correspondante réalisée en suivant la séquence complète (fig. 6b).

OUVERTURE DE TAILLE 1	Mise en
CHAPEAU HAUT DE FORME	évidence des sifs
DILATATION DE TAILLE 2	Identification
BINARISATION AVEC SEUIL A 9	des akles
EROSION DE TAILLE 2	Identification
RECONSTRUCTION	des zones de déflation
COMPLEMENTATION	élimination
EROSION DE TAILLE 2	des
RECONSTRUCTION	petits
COMPLEMENTATION	trous

Figure 8 : Séquence de cartographie des aires de déflation

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, comme c'est le cas lorsqu'on utilise des méthodes de classification multispectrale. Dans ce dernier cas, on produit les matrices de confusion indiquant le nombre de pixels bien ou mal classés à partir de zones test de petites dimensions. La petite taille des zones peut se justifier pour la classification des états de surface. Dans le cas d'une cartographie des formes, la validation 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 utilisons une méthode de validation par comparaison de 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 et X' où:

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

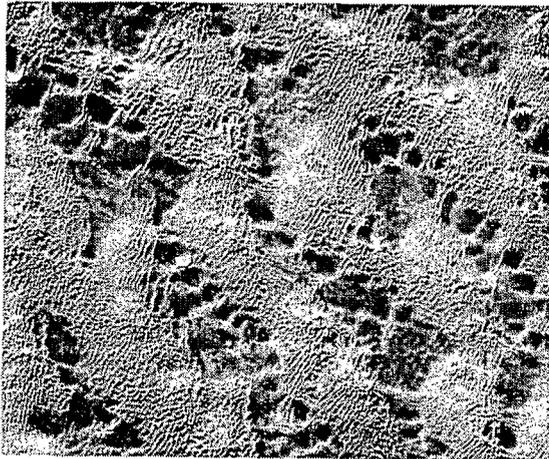


Fig. 6a : Image originale.

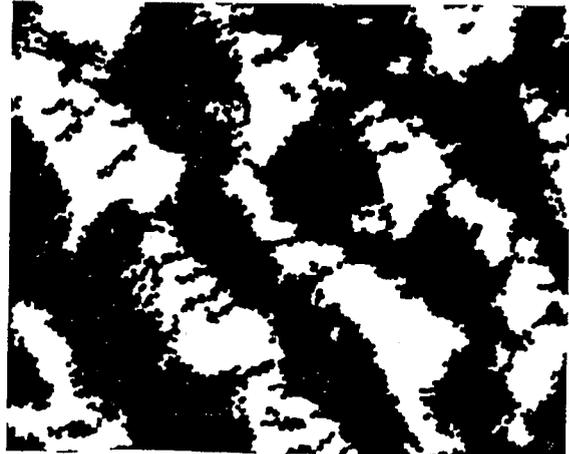


Fig. 6b : Cartographie automatique des aires de déflation

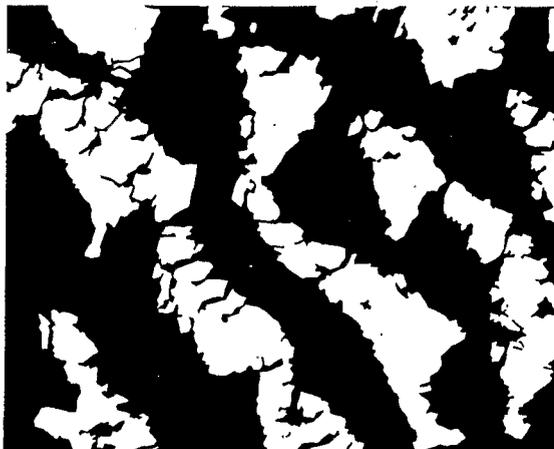


fig. 6c : photo-interprétation des aires de déflation

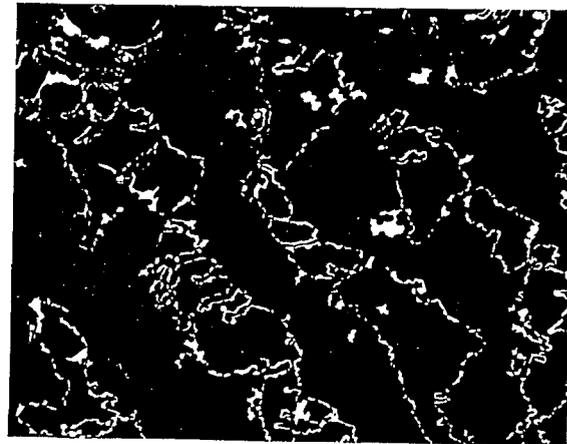
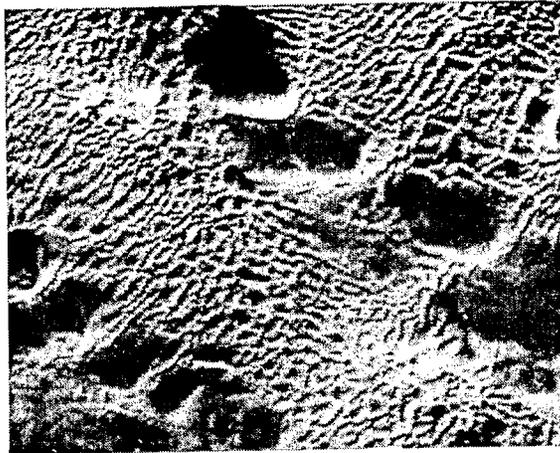


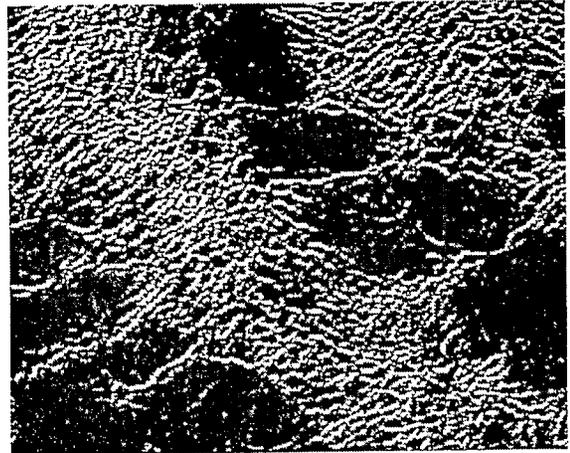
fig. 6d : image de la différence symétrique entre cartographie automatique et photo-interprétation.

Fig.6 : 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

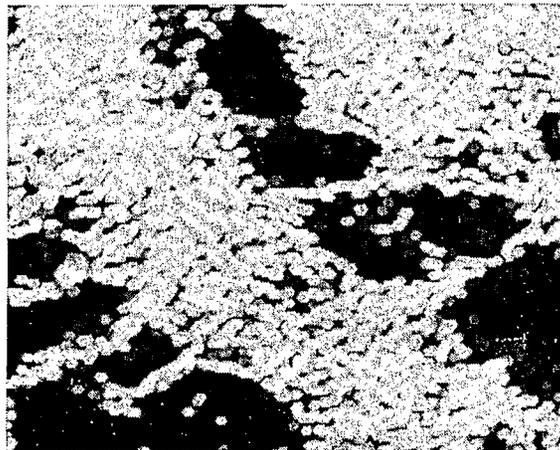
13.3 cm



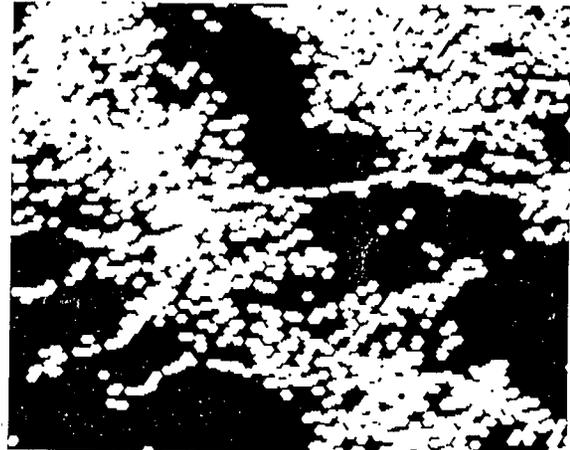
7a : image originale



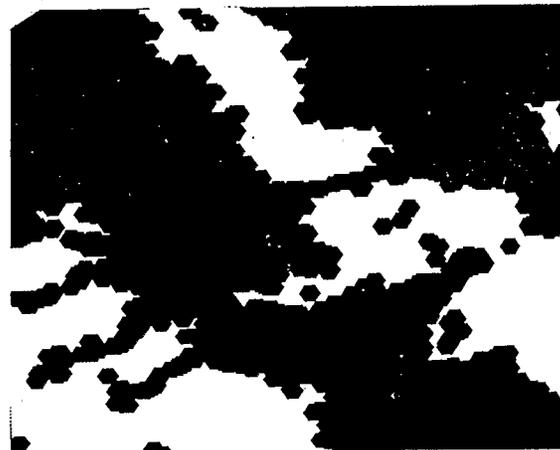
7b : Chapeau-haut-de-forme



7d : Seuillage



7c : Dilatation de taille 2



7e : Reconstruction



7f : Image finale après comblement des petits trous

Fig. 7 : 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

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 la zone-test de 900\*750 pixels (9\*7,5km) représentée sur la figure 6.

L'image (fig. 6d) de la différence symétrique entre photo-interprétation (fig. 6c) et cartographie automatique (fig. 6b) 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.:

5% de la surface totale a été pris en compte comme aire de déflation par photointerprétation et non par cartographie automatique

3% de la surface totale a été pris en compte comme aire de déflation par cartographie automatique et non par photointerprétation

Sur cette zone, l'erreur relative est donc de 8%.

#### CONCLUSION

L'utilisation des outils de la Morphologie Mathématique pour l'analyse des images SPOT Panchromatique du Grand Erg Occidental nous paraît pertinente pour l'étude géomorphologique 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.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Callot Y., 1987 Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas Saharien au Grand Erg Occidental : dynamique éolienne et paléo-lacs holocènes. - Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), *Mémoires des Sciences de la Terre*, 87-21, 412 p.

Callot Y. 1991 Le Grand Erg Occidental (Algérie). Histoire d'un massif de dunes. *Science et changements planétaires. Sécheresse*, vol. 2, n°1, pp. 26-39.

Clos-Arceud A. 1969 Essai d'explication des formes dunaires sahariennes. Institut Géographique National, Paris, *Etudes de photo-interprétation*, n°4, 66p.

Diday E. 1971 La Méthode des Nuées Dynamiques. *Rev. Stat. Appl.* 19(2): 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, Traitement informatisés des données de sol, (sols n°5), pp 21-27.

Khöler W. 1964 Psychologie de la forme. Idées, Paris, pp 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, pp951-956.

Pratt W. 1978 *Digital Image Processing*, Wiley and Sons, New York, 750p.

Serra J. 1982 *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, Londres, 638p.