

COSPAR
TOULOUSE Juin - Juillet 1986
X.1.6.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : 23467, ex 1
Cpte : B
20.IV.1987

DESCRIPTION QUANTITATIVE DES FORMES DE DENUDATION AU SAHEL OUEST-AFRICAIN

Catherine Méring *, Yveline Poncet **, Christine Jacqueminet
*** et Mamy Rakoto-Ravalontsalama #

* Institut Français de Recherche Scientifique pour le
Développement en Coopération (ORSTOM)
** ORSTOM
*** Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, étudiante;
Université Paris VII, étudiant

RESUME

Au Sahel ouest-africain, la dénudation prolongée des sols met leur potentiel productif en danger, d'autant plus que les sols meubles dénudés correspondent le plus souvent aux aires les plus exploitées par l'agriculture et le pastoralisme. Ces espaces sont donc menacés de dégradation, accrue par l'irrégularité des conditions climatiques. A partir d'images satellitaires, nous étudions quelques indicateurs de menaces de désertification.

Nous expérimentons des procédures répétables qui permettent d'identifier et de mesurer les paramètres concernant ces indicateurs, quelle que soit la source des images. Ces procédures sont appliquées ici à des images Landsat MSS, et présentées sous deux exemples:

- la description d'aires que la mise en culture dénude en saison sèche, par le calcul de leur superficie et de différents paramètres de forme;
- la description de structures dunaires, par le calcul de leur orientation et de leur répétitivité.

Les algorithmes employés mettent en jeu des transformations d'image et des mesures d'objet sur l'image. Leur niveau de généralisation permet donc leur adaptation à des images diverses, issues de scènes et de senseurs différents.

1. LES OBJECTIFS

Par description quantitative, nous entendons la définition et l'évaluation de paramètres significatifs, mesurant les formes que prennent, sur les images de télédétection, certains phénomènes de dégradation des milieux en climat semi-aride.

L'analyse des milieux naturels et des actions humaines au moyen du seul signal radiométrique pose, en milieu semi-aride, un certain nombre de problèmes, dont la solution systématique est encore mal maîtrisée. Ces problèmes sont liés à la nature des milieux et aux modes d'interprétation: la dynamique des milieux, liée aux changements

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : 23467, ex 1
Cpte : B

météorologiques et climatiques, est très rapide, mal connue dans les détails paysagiques; les diverses bandes spectrales sont fortement corrélées; les différentes unités de paysages sont séparées par des gradients radiométriques faibles, les contrastes amortis entre réponses spectrales sont encore diminués, au Sahel, par des voiles atmosphériques fréquents; il est délicat d'extrapoler les résultats radiométriques d'une image à une autre (autres dates, autres senseurs, autres échelles, autres secteurs géographiques...).

Afin d'étudier en détail des "objets thématiques" nous avons donc ajouté, à la notion de réponse spectrale, celle de la forme prise par ces objets en vue azimuthale, le caractère spectral constituant l'interface entre l'objet et sa forme.

À la surface de la Terre, déterminismes naturels (pentes, éléments de climat, nature de la surface du sol...) et déterminismes anthropiques (modes d'occupation de l'espace par l'homme, facteurs de production, éléments de la relation homme - milieu...) modèlent le paysage: les unités de paysage voisines se structurent réciproquement en dessinant des formes, régulières ou non. Dans les cas systématisables, la forme peut devenir l'indicatif de l'unité de paysage visible: parcellaires orthogonaux des vieux pays agricoles, réseaux hydrographiques dendritiques caractéristiques de certaines érosions, formes précises issues de certains procédés d'irrigation par exemple...

Au Sahel, certaines de ces formes correspondent à des unités en danger de dégradation. C'est le cas des deux exemples qui sont présentés ci-après. Ils ont été choisis pour deux raisons:

- parce que significatifs de phénomènes réels, mesurables, observables dans de nombreuses régions du Sahel et du monde semi-aride: la forme est significative d'une évolution liée à l'aridité; dès lors, il est utile d'y pratiquer des mesures;
- parce qu'à travers la forme apparemment simple de phénomènes complexes, une modélisation peut être réalisée aisément et spécifiquement.

Chacun des deux exemples présentés aborde la mesure sous deux types différents de paramètres: d'une part des mesures de superficie, ou liées à la superficie; d'autre part, des mesures d'orientation. Considérant qu'est identifié par le thématicien le rapport entre les objets géographiques sur le terrain et leur forme sur vue azimuthale, nous allons nous attacher à résoudre les problèmes de l'extraction des formes à partir de l'image spatiale et du paramétrage de ces formes.

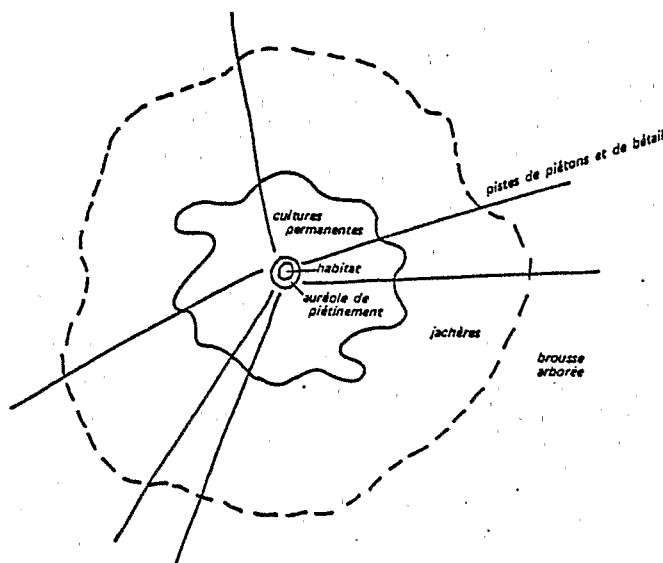
Dans les deux cas, on a utilisé les méthodes d'analyse quantitative d'image: filtrage par convolution, analyse texturale, et surtout Morphologie Mathématique. Les objets sont extraits au moyen d'algorithmes précis, parfaitement reproductibles. Les paramètres de mesure (superficies, orientations) sont définis par des formules mathématiques, également reproductibles. Ce caractère de reproductibilité présente deux intérêts: d'une part, la validation des résultats est objective; d'autre part, l'étude des évolutions temporelles peut être mise en routine.

2. MESURES DE SUPERFICIES DES TERROIRS VILLAGEOIS DENUDES (Plaine du Gondo, République du Mali)

L'occupation agricole s'exerce également dans toutes les directions autour de chaque village, constituant des auréoles concentriques organisées comme suit:

- au centre, le village: grands arbres, ombres des murs, toitures plates en argile; radiométries faibles;
- une mince auréole de piétinement (passage de bétail) au sol sableux complètement dénudé: radiométrie très élevée;
- l'auréole compacte des champs jointifs, cultivés chaque année et dénudés en saison sèche, à couverture ligneuse faible: les radiométries sont élevées;
- enfin, une zone externe, plus ou moins structurée, d'espaces non cultivés, de jachères, de champs discontinus, où la couverture herbacée est notable et les ligneux abondants; les radiométries sont variées, généralement plus faibles que dans l'auréole précédente.

Le schéma ci-dessous donne une idée de l'organisation morphologique de ces territoires, dont l'ensemble constitue le terroir de chaque village.



L'auréole des champs jointifs cultivés en permanence est très menacée de dégradation (reprise des éléments fins, organiques, par le vent pendant toute la saison sèche); et il est utile de surveiller l'évolution de la zone périphérique, dont on présume qu'elle se dégrade par sa bordure interne.

Sur la vue présentée en exemple (Landsat MSS 211-050 du 31 Mars 1976) et sur les autres vues examinées, le thème "champs cultivés en permanence", quoique repérable a priori (hautes valeurs de réflectance, structuration circulaire) ne présente pas, par rapport à ses voisins, de seuils uniques manifestes. L'évaluation de sa superficie exige donc une analyse spécifique de l'organisation spatiale des valeurs des pixels du thème. Cette analyse est fondée sur les outils de la Morphologie Mathématique. L'algorithme suivant résume la succession des procédures qui conduisent à une description quantitative et à une

Le dodécagone courant est de la forme $D_i = nH \oplus n^* H^*$
où

$$H = \begin{matrix} * & * \\ * & * & * \\ * & * \end{matrix}$$

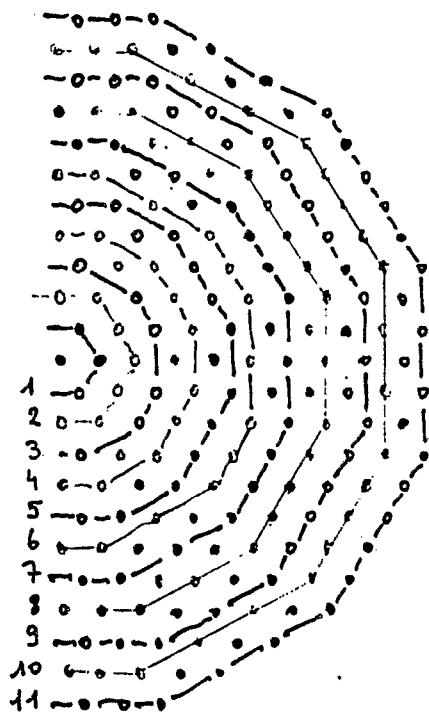
$$H^* = \begin{matrix} * & & T'_1 & & * & T'_2 \\ * & * & \oplus & * & * \\ * & & & * & \end{matrix} = \begin{matrix} * \\ * & * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * & * \\ * \end{matrix}$$

Pour obtenir le dodécagone suivant, on calcule:

$$\alpha = \frac{(n+1)(n-1)}{3 n^* (n^* + 1)}$$

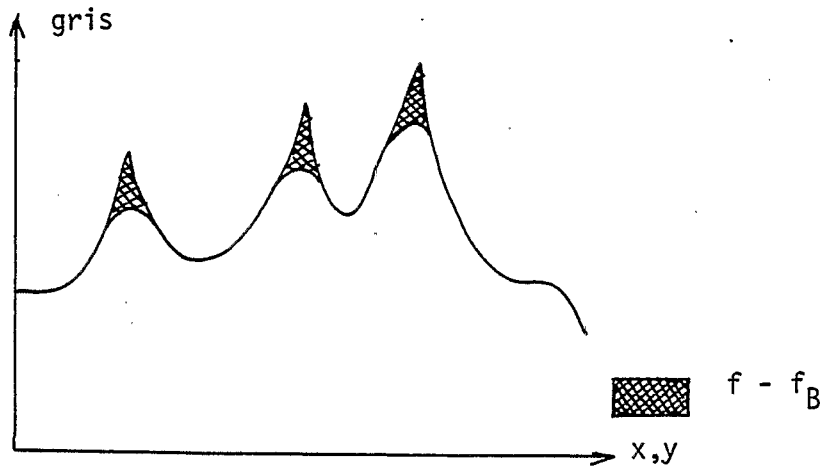
Si $\alpha \leq 1$, alors $D_{i+1} = (n+1) H \oplus n^* H^*$
sinon, $D_{i+1} = (n-1) H + (n^* + 1)H^*$

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	1	2	1	2	3	2	3	4	5	4
n*	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3
S	7	19	31	55	85	109	151	199	253	295 etc.

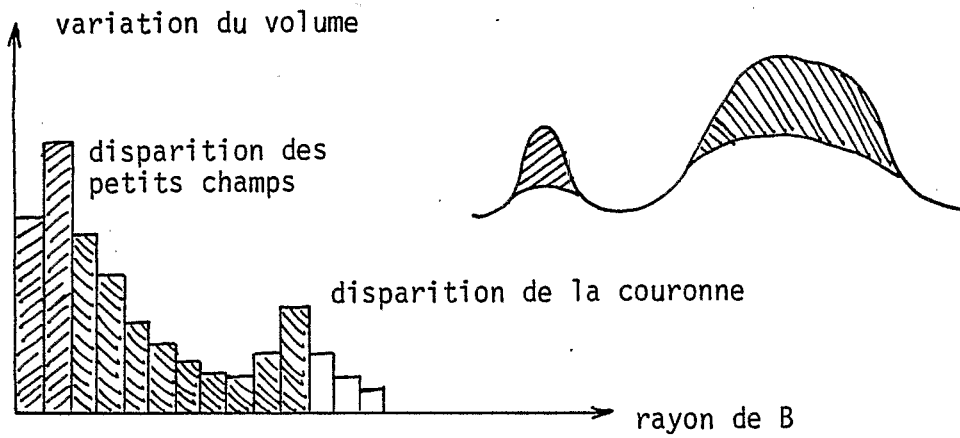



Cette suite ne peut pas être utilisée pour une granulométrie.
Ex. D_6 n'est pas ouvert par D_5 .
Il faut prendre un dodécagone sur deux à partir de $i = 4$.


Figure 1.- Suite de dodécagones



f_B : Ouverture de f par une boule de rayon B



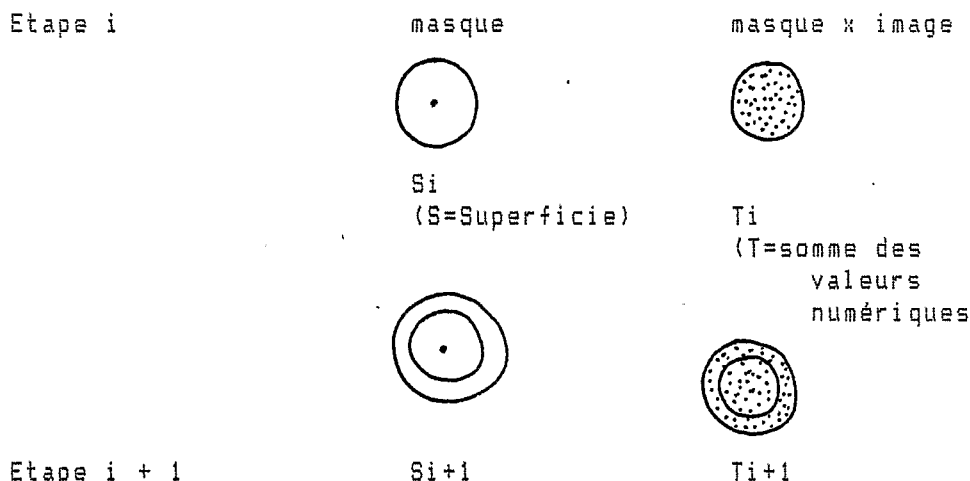
v = "volume des petits champs" 

V = "volume de la couronne" 

Indice d'émiettement = $e = \frac{v}{V}$

Figure 2.— Granulométrie en teintes de gris

3. Calcul de la moyenne dans chaque anneau de dilatation:



$$M(i+1) = \frac{Ti+1 - Ti}{Si+1 - Si}$$

On obtient pour chaque village une courbe de 40 points.

4. Arbre de classification hiérarchique:

On calcule la matrice de corrélation entre toutes les courbes. Après classification hiérarchique ascendante, on remarque une discrimination Nord-Sud: les couronnes des villages du Nord sont plus minces et plus réfléchantes que celles du Sud.

5. Mesures directes sur les courbes:

- abscisse et ordonnée du maximum,
- largeur du lobe à une hauteur donnée,
- pente à partir d'une certaine distance.

L'ensemble de cette procédure est fondée sur le principe de l'éloignement à un centre: elle est spécifique de la description d'un système circulaire concentrique simple. Nous avons expérimenté deux autres procédures, non décrites ici dans le détail, utilisables pour la description de systèmes géométriquement plus complexes.

L'une de ces procédures est fondée sur la discontinuité dimensionnelle entre l'auréole des champs cultivés, compacte, et les petites aires de champs cultivés isolées de la périphérie (fig. 2). L'autre procédure est fondée sur la compacité des plages de valeurs: pour chaque valeur en teintes de gris on calcule un indice de compacité de l'image binaire correspondante (surface de l'Ouvert / surface du Fermé): la fonction présente un maximum relatif unique, qui indique le périmètre "espaces cultivés continus".

La mise au point de modèles d'évaluation de la dénudation des terroirs et leur application à des images chronologiquement successives peut ainsi donner des indications utiles pour la surveillance et la conservation du potentiel de production, aux échelles locales ou régionales.

3. MESURES D'ORIENTATION DE STRUCTURES DUNAIRES (Nord du lac Faguibine, République du Mali)

L'objectif est d'évaluer les modifications des orientations dans les structures dunaires de la région située immédiatement au nord du lac, afin de mettre les différences de structure en rapport avec des hypothèses sur leur genèse.

Au nord-est de la région étudiée, les dunes sont constituées en longs cordons très réguliers, orientés approximativement NE-SW, couverts de végétation herbacée avec quelques ligneux dans les bas-fonds et les traces d'une érosion hydrique non actuelle. Vers le sud-ouest, cette structure se transforme en une organisation orientée approximativement E-W, moins régulière et où les ravins d'érosion sont plus marqués.

L'image d'origine est une vue Landsat MSS, 212-048 du 10 Mai 1982. Pour suivre la transformation de la structure dunaire, on a extrait huit échantillons de même taille (300 pixels sur 300), régulièrement disposés le long d'un axe NE-SW, et sur lesquels on a effectué une chaîne de traitements numériques. L'image traitée est, dans chaque cas, l'image des huit directions obtenues par un filtrage de type Gabarit sur la première composante principale calculée à partir des quatre canaux Landsat (fig.1): c'est une image à huit niveaux de gris, chacun étant précisément le code de la direction du plus fort gradient local calculé à l'intérieur d'une maille 3 x 3 par la méthode de convolution Gabarit (Rob.1977).

On a effectué deux types de traitement:

- des traitements statistiques sur les huit directions de chaque échantillon;
- des traitements de Morphologie Mathématique.

Ces deux familles de traitements ont pour but d'estimer les directions principales et les directions secondaires afin de comparer ces paramètres dans tous les échantillons (intitulés A,B,C....I).

3.1. L'analyse statistique

Le premier traitement élémentaire consiste à calculer les distributions des huit directions dans chaque échantillon (fig. 4, échantillons A et B).

Cette analyse est complétée par deux traitements qui permettent d'évaluer la régularité des directions au sein de chaque échantillon. Ils ont consisté à comparer des statistiques sur deux fenêtres concentriques successives:

- calcul de la distance du Khi 2 entre deux fenêtres successives F_n et F_{n+1} décrites par la variable "direction" à huit modalités déterminée par le filtre Gabarit:

$$\text{Khi 2}(F_n, F_{n+1}) = \sum_{j=1}^8 \frac{1}{f_{j.}} \left[\frac{f_{nj}}{f_n.} - \frac{f_{n+1j}}{f_{n+1.}} \right]^2$$

$$f_{j.} = \sum_{n=1}^{NF} f_{nj}$$

$$f_n. = \sum_{n=1}^8 f_{nj}$$

(NF = nombre total de fenêtres)

- calcul du nombre des permutations dans l'ordre des directions entre F_n et F_{n+1} .

Les paramètres décrivant les échantillons correspondent au total cumulé sur 150 fenêtres concentriques des deux variables dénommées Khi 2 et Permutation.

Les résultats concernant les huit échantillons sont résumés dans le tableau ci-après, mais nous ne commenterons ensuite que les deux premiers échantillons A et B.

	Khi 2	Nombre de permutations /
Image A	0,0001324	133
Image B	0,0001055	241
Image C	0,0001245	170
Image D	0,0003169	102
Image E	0,0002144	120
Image F	0,0001858	127
Image G	0,0004412	167

Indices de régularité des directions

La lecture du tableau nous confirme que les deux variables Khi 2 et Permutation, mesurées sur les échantillons, ne sont pas corrélées. Les résultats de l'échantillon B sont typiques (la plus faible valeur du Khi 2 et la plus forte valeur pour le nombre de permutations) et s'expliquent à la fois par le nombre élevé de changements dans les directions du gradient local dans la partie Sud de l'image (fig. 3) et par la régularité de la fréquence de ces changements dans cette même partie. Les valeurs des deux variables Khi 2 et Permutation traduisent à la fois le grand nombre de permutations dans l'ordre des directions entre deux fenêtres consécutives et la faible amplitude de variation entre les deux distributions de ces deux mêmes fenêtres.

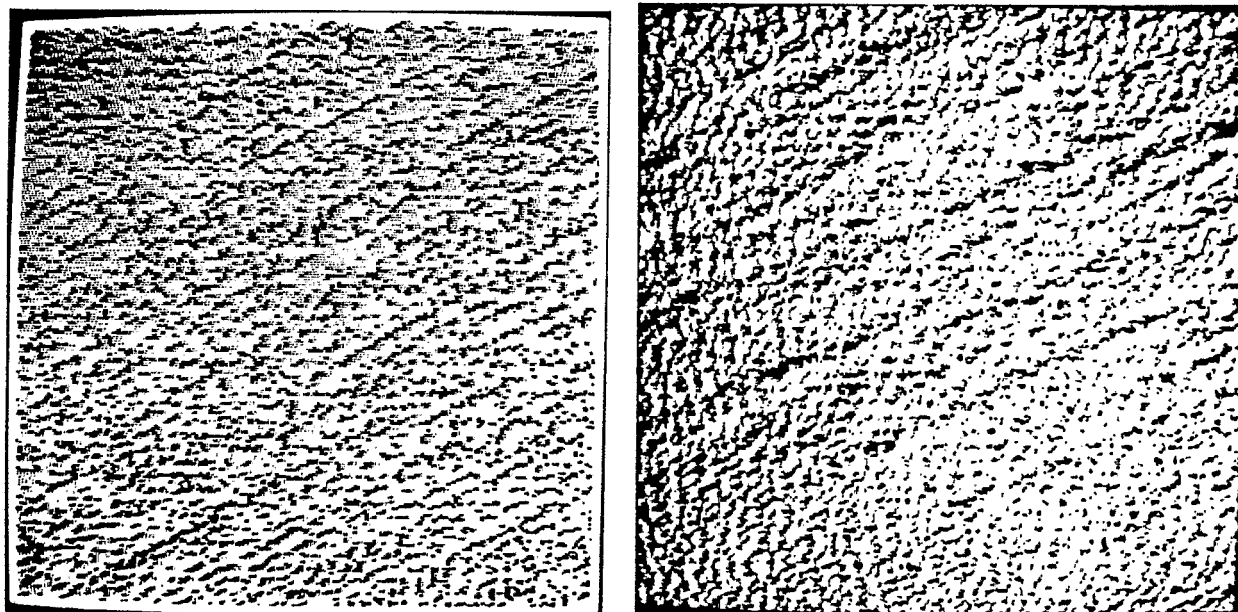


Fig. 3 – Deux images Gabarit-Direction: échantillons A et B

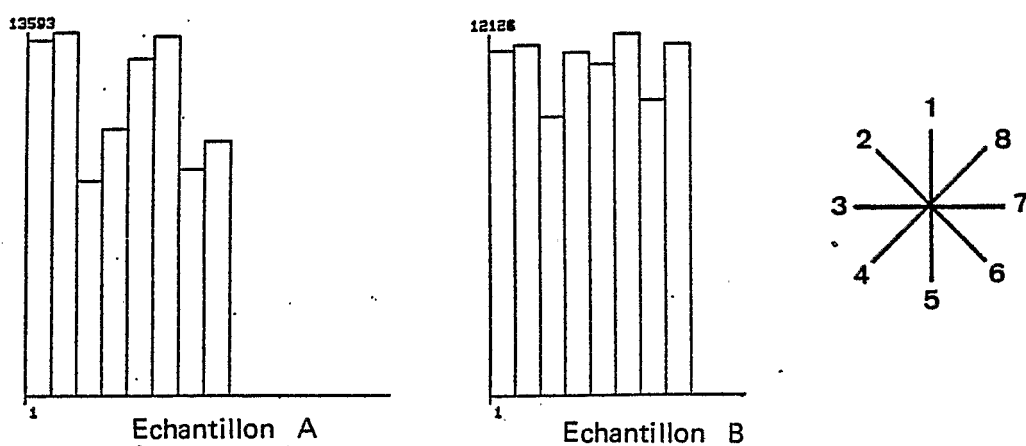


Fig. 4 – Histogrammes des directions, échantillons A et B

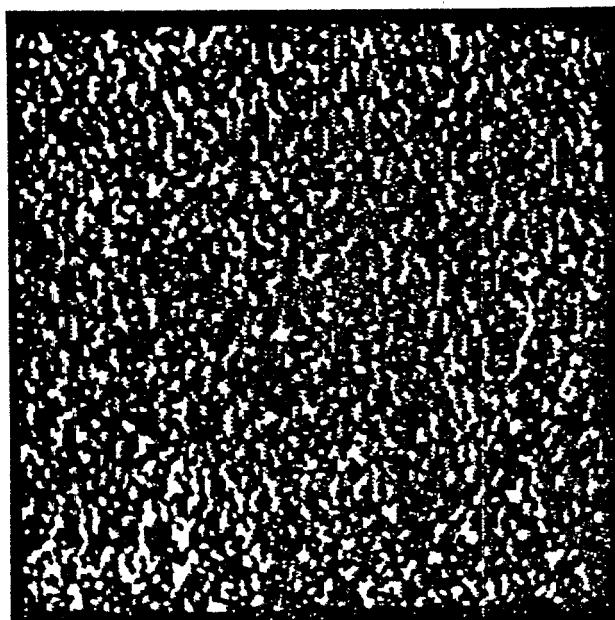


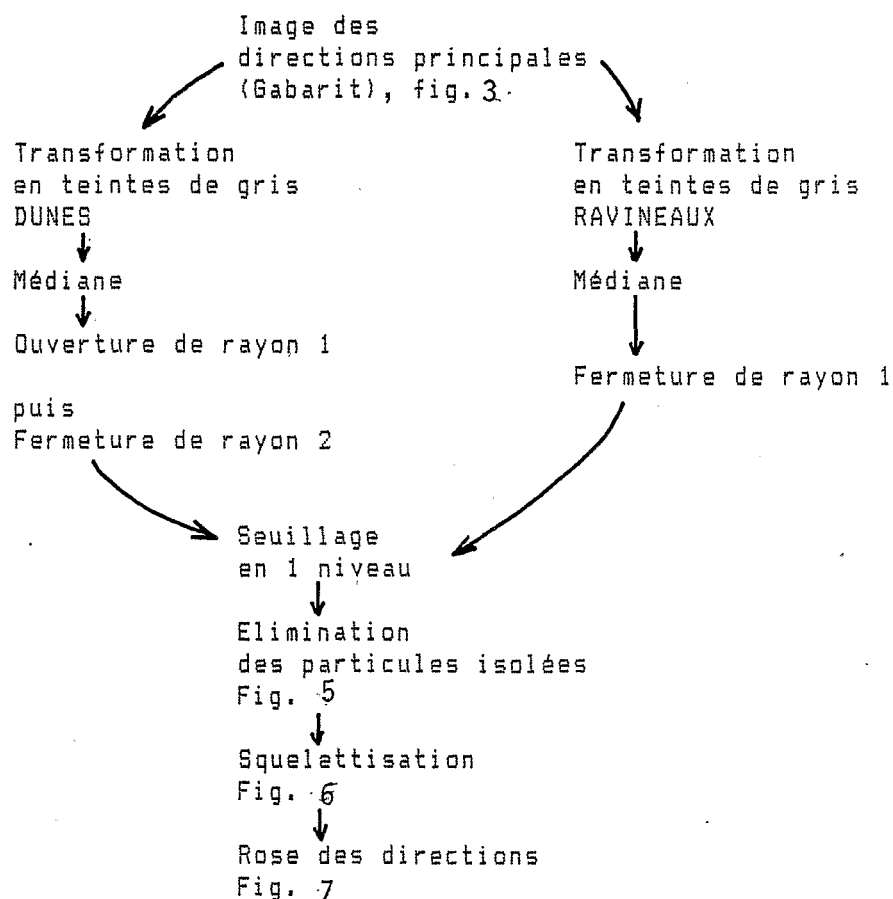
Fig. 5 –
Image binarisée et nettoyée:
B ravineaux

Bien que dans l'image A, les objets structurés soient apparemment plus réguliers et plus continus, le KHI 2 est plus élevé que sur l'image B. La régularité des formes n'est pas traduite par une aussi grande régularité dans les changements des gradients locaux. Le nombre de permutations, qui est très nettement inférieur à celui de B, s'explique par la prédominance d'une même orientation sur l'ensemble de l'image (fig. 4).

L'étude analytique de la répartition des gradients directionnels au sein des fenêtres fournit des paramètres unidimensionnels; en revanche, elle ne permet pas d'estimer la localisation dans l'image des perturbations de directions (ceci est l'objet de recherches en cours); d'autre part, la forme n'est ici appréhendée qu'à travers une orientation locale (le gradient local) à l'échelle du pixel. C'est pourquoi nous avons effectué des mesures à partir de l'extraction des formes (cordons dunaires, ravineaux) obtenues par des transformations morphologiques.

3.2. Les transformations morphologiques

Les algorithmes sont appliqués à la même image des huit directions que précédemment. Nous avons filtré séparément la structure principale et les ravineaux afin de mesurer l'importance des directions dans les deux cas et de comparer les échantillons entre eux: l'utilisation de deux algorithmes différents pour extraire et mesurer d'une part les cordons dunaires, d'autre part les ravineaux, s'explique ici par la différence du niveau de gris significatif de l'un et l'autre thème.



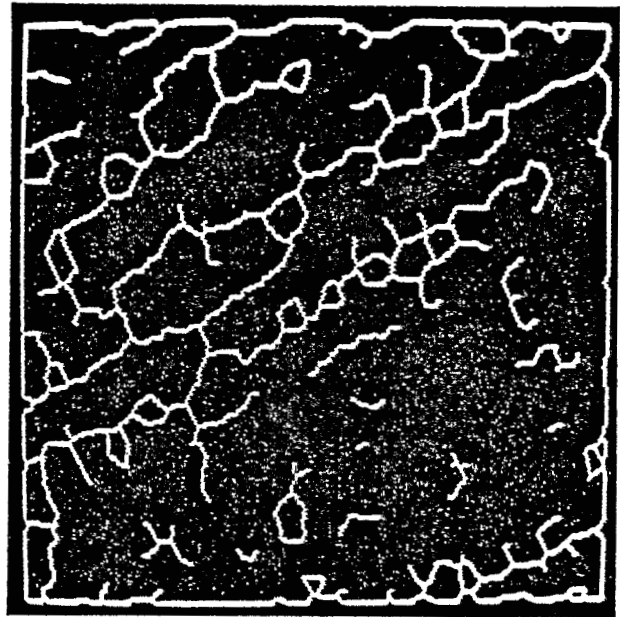
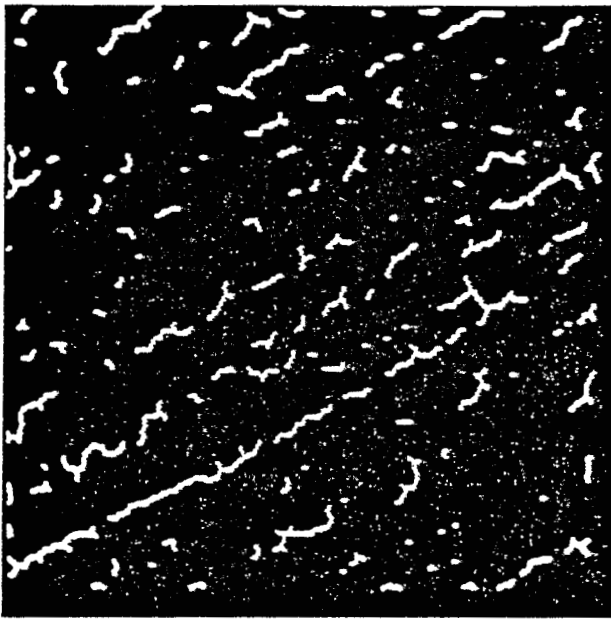
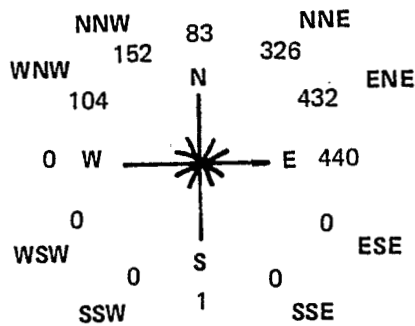
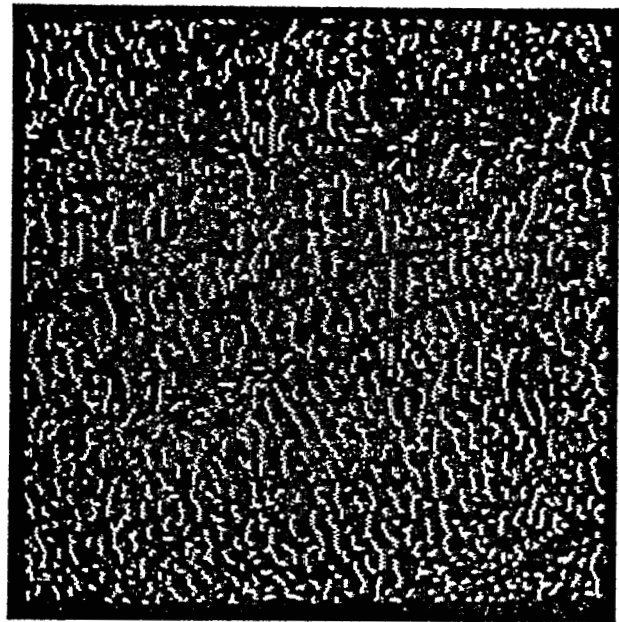
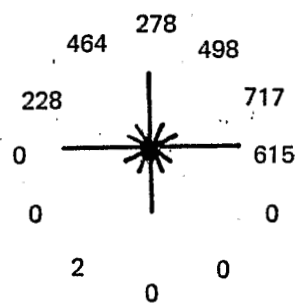


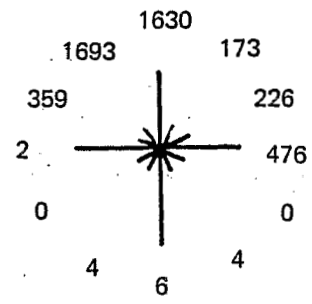
Fig. 6 -
Squelettisation:
A dunes, B dunes et B ravineaux



A Dunes



B Dunes



B Ravineaux

Fig. 7 - Trois roses des directions: A dunes, B dunes et B ravineaux

On a choisi l'élément structurant isotrope afin de ne pas imposer d'a priori sur l'anisotropie existant dans l'image puisque l'évaluation de l'ordre des directions est précisément l'objet de notre recherche. Avec la méthode de calcul de la rose des directions (COS, 1985) nous paramétrons 12 directions au lieu de 8.

Dans l'échantillon B, grâce au filtrage par Gabarit et aux techniques de Morphologie Mathématique en teintes de gris, on a pu schématiser une forme représentée par un ensemble de niveaux consécutifs de teintes de gris et on a pu étudier séparément les deux structures de directions différentes.

Pour les trois cas représentés figure 7 (A dunes, B dunes, B ravineaux), les directions à composante Sud (ESE, SSE, S, SSW, WSW) sont toutes nulles; le tri des directions est donc plus évident qu'avec la méthode statistique décrite plus haut.

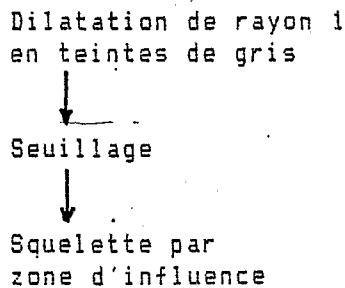
On comparera les deux roses A dunes et B dunes. La rose des directions de B ravineaux sera comparée à celles du même thème sur les autres échantillons.

Pour A dunes et B dunes, les mêmes directions (E et ENE) sont les plus fréquentes. En ce qui concerne les ravineaux, ce sont les directions NNE, NNW et N qui sont les plus fréquentes.

On a ainsi créé une variable à 12 niveaux qui permet de caractériser quantitativement l'anisotropie de la structure extraite, caractérisation que nous considérons comme une signature de la structure extraite.

A l'issue de l'application de cet algorithme aux huit échantillons, nous obtenons des mesures comparables sur les directions des formes que nous avons extraites de l'image. Les seules transformations sur lesquelles il conviendrait de revenir sont les transformations en teintes de gris et leur seuillage final, qui supposent une décision de l'opérateur dans chaque cas. En revanche, l'opération "élimination de particules" suivie de "squelettisation" a l'avantage de ne pas faire intervenir de choix de la part de l'opérateur.

Parallèlement, nous avons expérimenté une technique utilisée en sciences des matériaux (COS, 1985) consistant à isoler des particules sur l'image et à calculer le Squelette par Zone d'Influence. L'image de base utilisée a été dans ce cas l'image des contours obtenue par le filtre Gabarit (et non pas l'image des directions citée plus haut). L'algorithme utilisé est le suivant:



Cette procédure présente l'avantage d'être plus courte et ne fait pas intervenir la décision de l'opérateur; cependant, son automatisation, visant à rendre comparable les résultats sur l'ensemble des échantillons, nous paraît dépendre du choix d'un nombre fixe de

particules obtenues à l'étape du seuillage; l'expérimentation reste à faire.

Des méthodes de traitement du signal telles que la Transformée de Fourier bi-dimensionnelle ont été pratiquées par notre équipe (MER. 1985) pour l'étude de structures dunaires et la quantification des directions. Dans le cas présenté ici, le calcul des directions implique une interprétation de l'image par l'opérateur, contrairement à la Transformée de Fourier bi-dimensionnelle qui, elle, n'exige pas de choix en cours d'opération. En revanche, si les spectres d'énergie maximaux résultant d'une Transformée de Fourier sur des images ne comprenant qu'une seule structure sub-linéaire peuvent facilement être assimilés à des directions principales, il nous semble plus délicat de les interpréter dans le cas des structures multiples présenté ici. Il faudra en outre effectuer d'autres recherches sur l'unicité des transformations en teintes de gris et du seuillage permettant d'extraire les objets: cordons dunaires, bas-fonds, ravineaux.

Les procédures qui sont décrites ci-dessus permettent de faire des mesures fines sur les structures et les formes paysagiques: des comparaisons très précises et très détaillées sont ainsi rendues possibles afin de mettre en relation des structures de type réellement semblable dans des régions différentes ou bien d'évaluer, pour une même structure, ses transformations à terme, même légères. En outre, les paramètres obtenus, fondés sur des images de la terre, peuvent être directement mis en rapport avec d'autres mesures analytiques sur les mêmes objets, les mêmes phénomènes.

REFERENCES CITEES:

COS.1985: COSTER M. et CHERMANT J.L. 1985, Précis d'analyse d'images, Editions du CNRS, Paris.

MER.1985: MERING C., PONCET Y. et RAKOTO-RAVALONTSALAMA M. 1985, Traitements numériques d'image spatiale appliqués aux dunes du Sahel, Programmation et Sciences de l'Homme, n°4, pp.2-26.

ROB.1977: ROBINSON G. 1977, Edge detection by compass gradient mask, CGIPG, pp.492-501.