

**PROGRAMMATION
ET
SCIENCES DE L'HOMME**

PSH



Fonds Documentaire ORSTOM
Cote: *B * 9975* Ex: *1*

**Laboratoire d'Informatique
pour les sciences de l'homme
n° 4**

Fonds Documentaire ORSTOM



010009975

Pour une nouvelle description de la terre

**Catherine MERING
Yveline PONCET
Mamy RAKOTO-RAVALONTSALAMA**

Fonds Documentaire ORSTOM
Cote : **B*9975** Ex : **1**

POUR UNE NOUVELLE DESCRIPTION DE LA TERRE

TRAITEMENTS NUMERIQUES D'IMAGE SPATIALE APPLIQUES AUX DUNES DU SAHEL

Catherine MERING, Yveline PONCET, Mamy RAKOTO-RAVALONTSALAMA

**INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (Orstom)**

Les images des satellites d'observation de la Terre (Landsat et, prochainement, Spot) nous montrent la Terre, depuis les années soixante-dix, d'une autre façon que celle à laquelle nous étions habitués.

Par ailleurs, les méthodes de traitement d'image, qui sont actuellement en rapide évolution grâce aux recherches mathématiques et informatiques, donnent la possibilité d'améliorer la lisibilité des images et d'en extraire des mesures.

Ces deux domaines sont réunis dans les études de télédétection spatiale, lesquelles s'attachent à traduire toutes les informations possibles sur la surface de la Terre: traitement d'image et données stellitaires ouvrent donc la voie à des mesures jusqu'ici non praticables.

Une connaissance quantitative des milieux est désormais rendue possible, aux diverses échelles d'espace et de temps; est ainsi proposée aux analystes une ouverture vers des concepts et des méthodes orientés vers l'exploitation des mesures.

POUR UNE NOUVELLE DESCRIPTION DE LA TERRE

TRAITEMENTS NUMERIQUES D'IMAGE SPATIALE APPLIQUES AUX DUNES DU SAHEL

RESUME

A partir d'une image brute monospectrale Landsat, une structure dunaire est étudiée par filtrages. Des traitements de type Sobel et Gabarit ont permis d'obtenir des images aréolaires interprétables en termes thématiques; des traitements de type Gabarit et Transformée de Fourier ont permis d'obtenir, de façon simple ou plus complexe, des mesures adaptées à la description de la structure. Les indicateurs: orientation, régularité, rythme, permettent de comparer des échantillons entre eux de façon très détaillée et d'obtenir des nomenclatures et des mesures de diversité. Compte-tenu des vastes dimensions des ensembles dunaires structurés du Sahel et du Sahara et de l'extension générale des organisations dunaires, les images Landsat filtrées semblent apporter une aide appréciable à leur typologie fine.

L' étude présentée ici a été entreprise conjointement par trois chercheurs appartenant à des disciplines différentes: mathématiques (traitements statistiques et informatiques), physique (nature et traitement du signal), géographie (thèmes paysagiques et exploitation thématique). La vocation tropicaliste de l' Orstom et les préoccupations scientifiques liées depuis plusieurs années aux problèmes de sécheresse et de désertification en zone sahélienne de l' Afrique de l' Ouest ont orienté cette étude vers un but thématique et une perspective de validation ultérieure dans le cadre d'opérations de recherche en géographie et en télédétection appliqués aux milieux encore mal connus et peu cartographiés (1).

Le thème de cette étude a été choisi parce qu'il se traduit par des formes présentes sur une grande partie des espaces arides chauds du monde, bien connues dans leurs aspects généraux, nettement moins bien connues dans le détail: les *formes* dunaires, les *ensembles* dunaires. Ces formes présentent l'avantage d'être répétitives, c'est à dire que les résultats obtenus sur une petite surface d'image sont extrapolables ou sont comparables à de plus vastes espaces situés géographiquement à de grandes distances.

Les résultats de l'étude générale des formes dunaires par télédétection spatiale, dont les lignes qui suivent sont les prémisses, sont donc susceptibles d'être utilisables sur de nombreux territoires à des fins pratiques: calculs de surfaces sableuses, classifications de pentes et de reliefs, types de végétation... Identification de formes dunaires récentes (remise en mouvement des sables, revivification de dunes anciennes, fragilisation du milieu); utilisation pour les études de paléogéographie en cours ou en projet dans la zone saharo-sahélienne: formes, orientations et dynamiques des ergs anciens, entre autres.

La recherche qui est exposée ici dans le détail a été entreprise dans le but de remplir plusieurs objectifs méthodologiques:

- exploiter les données Landsat MSS dont les résolutions spatiale et spectrale et la disponibilité paraissent bien adaptées à notre propos;
- améliorer la mise en évidence des unités géomorphologiques afin d'analyser chacune d'elles et d'analyser leurs rapports morphologiques;
- rechercher des signatures d'un autre ordre que les signatures spectrales, qui sont des identifiants radiométriques seulement;
- quantifier les paramètres des structures morphologiques (répétitivité, orientation...) afin de les comparer entre elles avec précision.

(1) Peu cartographié en ce qui concerne l'inventaire du milieu naturel et la dynamique des phénomènes écologiques en anthropiques.

La réalisation de ces trois objectifs doit concourir à accroître l'information sur les milieux encore insuffisamment décrits et peu accessibles: en effet, la signature spectrale ne suffit pas à identifier avec certitude les thèmes et leurs nuances; la netteté de certains éléments de l'image occulte parfois des éléments décisifs pour leur interprétation; enfin, la quantification des paramètres descriptifs permet de s'affranchir des différences de calage radiométrique et temporel pour des comparaisons rigoureuses.

Les pages qui suivent restituent les démarches suivies et en analysent les résultats après avoir présenté la région et l'image sur lesquelles ont été pratiqués les traitements. On trouvera en annexe le détail des logiciels et des moyens informatiques utilisés.

1. LE CADRE GEOGRAPHIQUE

1.1. Présentation générale

La zone qui sert de support à cette étude est située en milieu sahar-sahélien, entre les 16° et 17° parallèles Nord, entre les 4° et 5° méridiens Est, sur la frontière nigéro-malienne.

La région reçoit de 100 à 200 millimètres de pluie par an, selon les années, ce qui permet une occupation importante par les nomades pasteurs et leurs troupeaux. Cette modeste pluviométrie alimente une couverture végétale non négligeable, discontinue et contractée sur la plupart des surfaces, dense et très couvrante dans les endroits favorables, constituée d'espèces herbacées et d'espèces arbustives et arborées.

La région toute entière porte le nom d'Azawagh. L'Azawagh constitue la partie centrale d'un vaste bassin sédimentaire, le *Bassin des Iullemmeden*, constitué de terrains à dominante gréseuse, l'ensemble appartenant aux périodes du Continental intercalaire et du Continental terminal.

Le bassin tout entier porte la marque des événements climatiques contrastés qui se sont déroulés depuis le début du Quaternaire et notamment des alternances d'humidité et d'aridité survenues dans les quarante derniers millénaires. Les épisodes très humides et humides ont vu se creuser puis se remblayer des vallées larges et bien marquées (Azawagh, Azar, Amashkalo...), se former des lacs et des marécages partout où les écoulements étaient entravés par les accumulations sableuses: accumulations constituées au cours des épisodes secs précédents et cordons et massifs dunaires.

Actuellement, l'Azawagh central présente de grandes étendues sableuses, planes ou organisées en ergs, coupées de bas-fonds argileux de taille variable, de l'ordre de la centaine de mètres au kilomètre. Par endroits, les ergs laissent la place aux larges vallées mortes, aux alluvions elles-mêmes remaniées par le vent. Ces ensembles constituent des paysages réputés uniformes, uniformes parce que l'observateur au sol dispose rarement de points d'observation dominants et parce que chaque unité est de vaste extension. C'est l'intérêt des images spatiales que d'avoir mis en évidence la variété des réflectances et des structures que l'on y trouve (1). Même superficiellement examinées, elles montrent des différences d'orientation, de fréquence des structures parallèles, de forme des édifices.

Ces différences de faciès actuel, nous les considérons comme significatives de différences — ou de nuances — dans le processus de formation, dans la nature des matériaux, dans la chronologie de mise en place et dans l'évolution ultérieure.

(1) Y. Poncet, 1984.

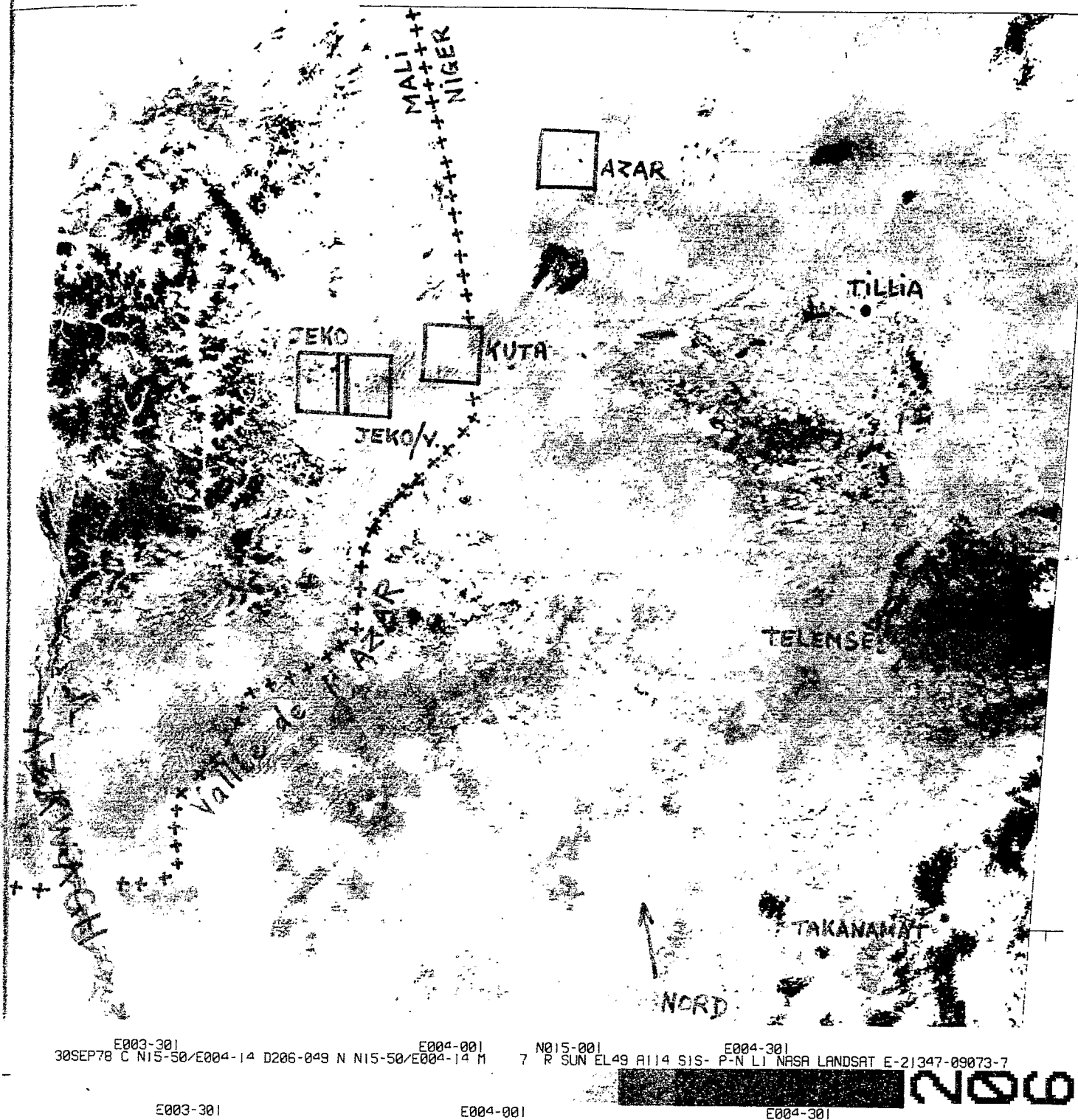


Figure 1. Scène 206-049 du 30 septembre 1978
tirage noir et blanc du canal 5.

1.2. L'échantillonnage

Nous nous sommes bornés à utiliser les données spatiales immédiatement disponibles sur l'Azawagh central à la téléthèque de l'Orstom à Bondy. L'image étudiée est une vue Landsat en date du 30 septembre 1978, scène 206-049; les données photographiques montrent, à l'échelle 1/500 000, plusieurs organisations linéaires, orientées et répétitives de type dunaire.

Afin de ne pas travailler d'emblée sur des faciès trop complexes ou des ensembles structuraux peu distincts, nous avons choisi quatre zones-échantillons considérées comme représentatives de types apparemment simples et permettant en même temps des comparaisons. Leur localisation est indiquée sur la figure 1.

Pour la facilité de calcul, chaque zone-échantillon a été choisie d'une dimension de 128 x 128 pixels, soit environ sur le terrain 7 kilomètres sur 10.

a) *Zones Tin Jekoda et Tin Jekoda avec la vallée* (en abrégé JEKO et JEKO/Vallée); ces deux échantillons ont été choisis parce qu'ils se trouvent l'un à proximité et l'autre sur la vallée d'Amashkalo dont la présence peut introduire, par la différence de structure, des données de comparaison intéressantes et aussi parce qu'une petite portion de territoire très voisin a été étudiée sur clichés aériens (Poncet, 1984).

b) *Zone In Kutayan* (en abrégé KUTA) cette zone, distante de trente kilomètres environ du groupe précédent, présente des caractères apparemment très voisins: il est intéressant de vérifier cette similarité et de rechercher s'il existe des éléments distinctifs entre les deux JEKO et KUTA.

c) *La zone Azar* (AZAR), située à vingt kilomètres au nord de la précédente, a été choisie pour ses différences apparentes avec JEKO et KUTA: l'orientation générale est moins nette et la structure est plus lâche.

Les trois zones JEKO, KUTA et AZAR peuvent être comparées entre elles car elles présentent des caractères apparemment semblables, caractères que l'on cherche précisément à quantifier et à comparer avec précision. La zone JEKO/Vallée, dans laquelle est introduite volontairement un élément étranger, ne peut être valablement comparée qu'à JEKO.

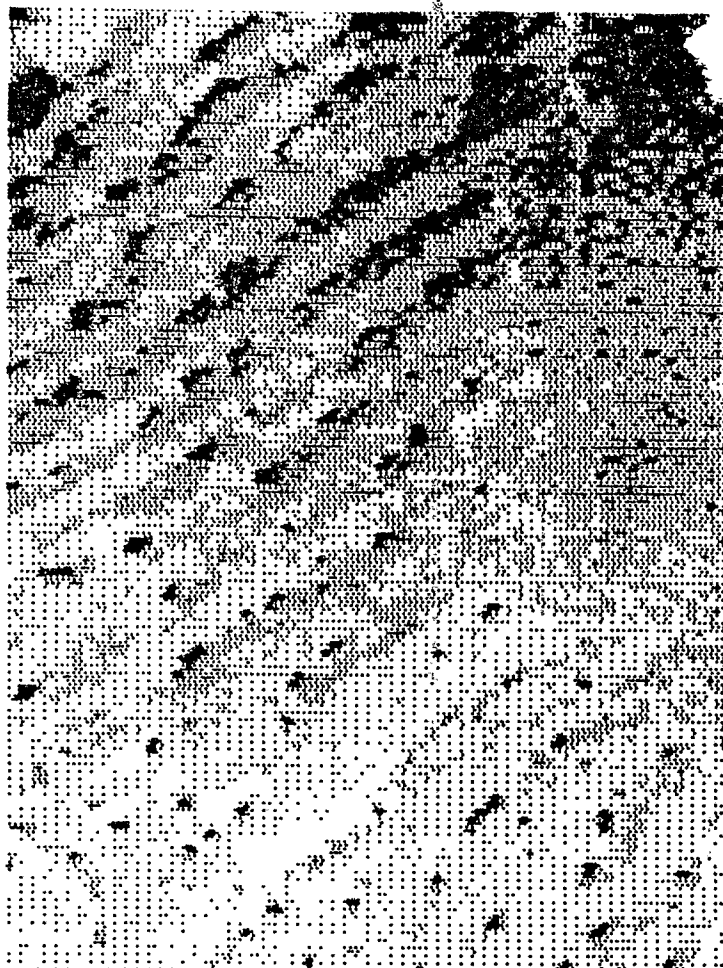
Les quatre zones-échantillons paraissent bien appartenir au même ensemble dunaire, traversé par les vallées apparemment surimposées d'Amashkalo et d'Azar: la zone AZAR est cependant "perturbée" par de grands bas-fonds et se situe au contact de deux orientations différentes.

2. LA STRUCTURE VISIBLE

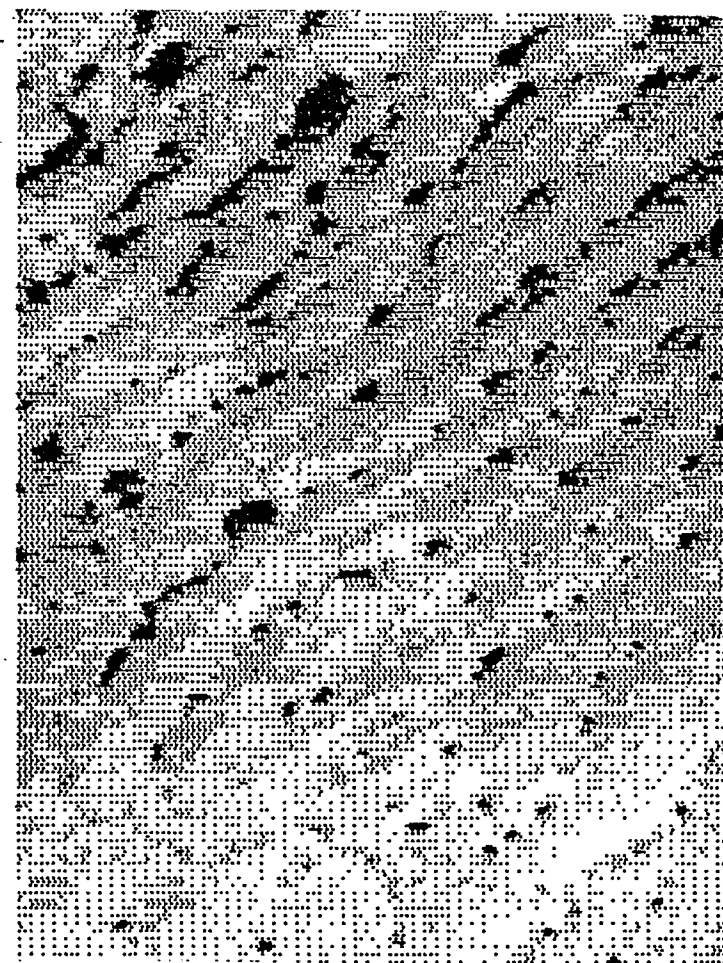
Les aires étudiées présentent sur l'image Landsat un même type de structure, avec des variantes. Cette structure est constituée par l'alternance de bandes claires et de bandes sombres, plus ou moins sinusoïdales, parallèles, régulièrement disposées et orientées approximativement nord-est sud-ouest. Une telle structure est permanente: elle présente le même aspect à l'examen des données photographiques successivement enregistrées.

2.1. Les informations préalables

Les études thématiques effectuées sur l'ensemble de l'Azawagh central et publiées sous forme cartographique sont peu nombreuses et à des échelles très petites: carte géologique à 1/2 000 000, relevés hydro-géologiques, relevés botaniques aux fins d'inventaire de la qualité des pâturages à 1/2 000 000... Les seules sources à grande échelle sont les photographies aériennes à 1/50 000 qui datent des années 1954 à 1958 et leur exploitation systématique sous forme des cartes topographiques à 1/200 000 (Institut Géographique National français). Ces documents ont l'inconvénient de leur ancienneté (le milieu n'a-t-il pas changé depuis presque trente ans ?) et de défauts de précision: les cartes topographiques sont le produit d'une généralisation cartographique et d'une classification de l'information qui réduisent le document d'origine; elles peuvent apporter des éléments d'interprétation et de comparaison, mais aucune information qui soit en même temps complète, fiable, exacte et précise.

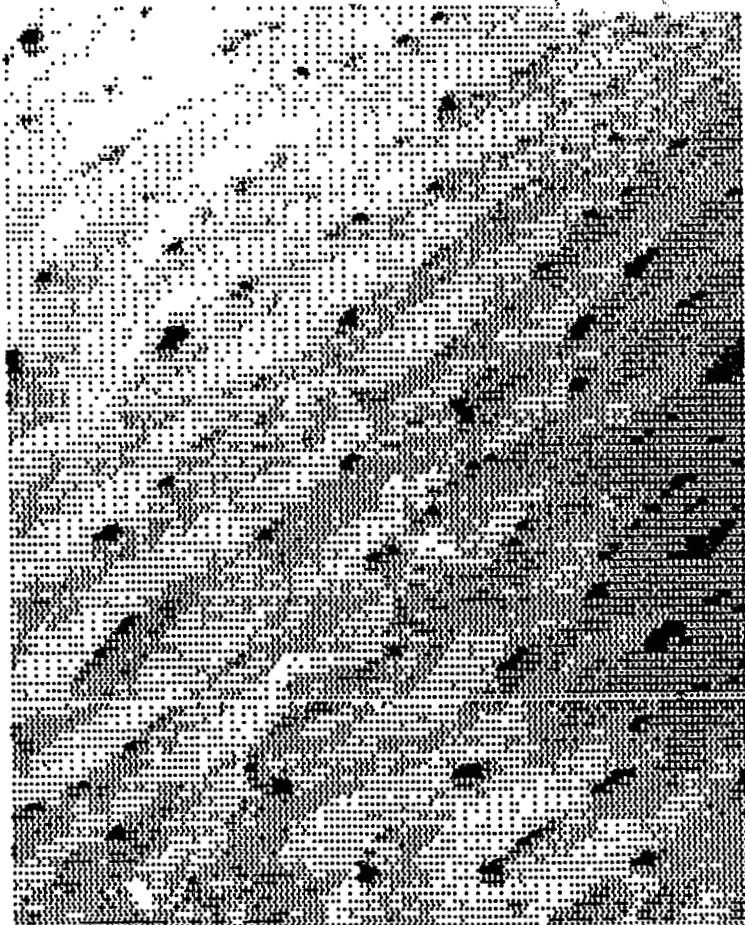


a. JEKO/Vallée



b. JEKO

Figure 2. Images brutes, canal 5, original Colorplot increment 2



c. KUTA



d. AZAR

Figure 2. Images brutes, canal 5, original Colorplot increment 2

Aucune étude de terrain n'a été effectuée spécifiquement pour la présente étude sur les structures dunaires, ni sur les zones-échantillons, ni sur des espaces comparables: nous ne disposons donc, avant de l'effectuer, d'aucun point d'appui thématique assuré. Notre intention étant précisément de travailler dans les conditions d'un milieu "mal connu, peu cartographié et peu accessible," cette absence de connaissance des détails du terrain n'a pas paru absolument gênante. Elle viendra éventuellement plus tard, comme validation des hypothèses formulées et comme complément sur des points géographiques ou thématiques précis.

2.2. Une structure dunaire

Dès l'entrée de ces pages, nous avons qualifié la structure étudiée de "dunaire": en l'absence d'observations directes sur le terrain et en présence d'une documentation aussi mince que celle qui vient d'être évoquée, disposons-nous d'éléments suffisants pour affirmer qu'il s'agit bien d'une structure dunaire et pour l'étudier comme telle? Les éléments positifs sont de trois ordres: géographiques et morphologiques (la localisation régionale, les formes confirmées par la carte topographique) et radiométriques. Nous allons regarder de plus près ces derniers.

Même examinée de façon superficielle sur image photographique multispectrale (sous forme de composition colorée par exemple), des contrastes radiométriques apparaissent, bien que peu accentués: ce sont ces contrastes entre les aires réfléchissantes et les aires absorbantes qui font apparaître la structure en bandes parallèles et son orientation.

Si on compare les données radiométriques des quatre canaux MSS Landsat pour la date étudiée (30 septembre 1979), on constate:

- a) que les aires réfléchissantes dans un canal sont réfléchissantes dans tous les canaux et que les aires absorbantes dans le même canal sont absorbantes dans tous les autres canaux;
- b) que les aires les plus absorbantes sont tout particulièrement absorbantes dans le canal 7 et dans le canal 5;
- c) que les aires les moins absorbantes sont un peu plus absorbantes dans le canal 4 et dans le canal 5.

L'expérience que nous avons des signatures spectrales dans ce milieu et sous ces latitudes, et les documents dont nous disposons sur le territoire, nous conduisent à une interprétation rudimentaire en termes de types de végétation et de formations de surface. Les aires les plus absorbantes sont des bas-fonds argileux et argilo-sableux, occupés en tout ou en partie par une végétation ligneuse (arborée ou arbustive) dense et couvrante; les aires réfléchissantes sont probablement les aires sableuses (pentes et sommets des dunes) occupées principalement par une végétation herbacée ou plus ou moins dénudées.

2.3. Une structure permanente

La structure en bandes alternées étudiée ici présente comme caractère remarquable d'être stable dans le temps, plus précisément de ne pas présenter de différences apparentes à l'examen des cinq images photographiques qui ont été comparées, vues des:

9 novembre 1972
8 mai 1973
28 décembre 1973
19 février 1976
30 septembre 1978

Parmi ces cinq vues, quatre ont été enregistrées en pleine saison sèche et, en ce qui concerne les deux premières, au cours d'années particulièrement sèches. La cinquième, celle qui a été étudiée le plus attentivement et qui a fait l'objet de traitement des données numériques, a été enregistrée au cours de la saison des pluies d'une année que l'on peut qualifier de "normale" (ou autant qu'il y aie des années normales au Sahel...) sur le plan pluviométrique. Apparemment, toutes les vues présentent cependant la même structure avec seulement des variantes de contrastes radiométriques.

Ces variantes tiennent-elles à la nature du terrain au moment de la prise de vue ?

Il est indéniable que la dynamique du comportement du terrain influence fortement la nature du contraste entre aires absorbantes et aires réfléchissantes. Les bas-fonds portent une végétation dense, de type arboré ou arbustif, absorbante dans tous les canaux en toutes saisons. Les dunes portent une végétation plus clairsemée de graminées qui jaunissent — donc deviennent de plus en plus réfléchissantes — au fur et à mesure de l'avancée de la saison sèche, ou même disparaissent complètement, laissant à nu des sables encore plus réfléchissants: il est donc probable que le contraste radiométrique sera plus élevé en saison sèche et moins élevé en saison des pluies; travaillant sur une vue numérique du 30 septembre (saison des pluies), nous ne disposons donc pas des données les plus favorables pour une étude morphologique.

Enfin, on peut penser que des nuances radiométriques liées directement à la topographie soient imputables à l'heure de l'enregistrement. Celui-ci a lieu à 9 h 45 environ T.U. c'est à dire que l'incidence des rayons solaires peut n'être pas la même sur toutes les pentes. Ici, nous étudions une vue du 30 septembre sous une latitude de $16^{\circ}30'$; l'élévation du soleil est de 49° ; il est probable que l'incidence des rayons lumineux sur les pentes faibles n'est pas essentielle dans l'interprétation d'éventuelles nuances radiométriques, néanmoins l'azimut du soleil est de 114° , c'est à dire très proche de la perpendiculaire à la direction principale visible de la structure: un effet d'incidence des rayons solaires "éclaircissant" les pentes exposées et "assombri-ssant" les revers, ne doit pas être écarté.

Les caractéristiques du milieu en saison des pluies sont susceptibles d'introduire des nuances radiométriques conjoncturelles: les espèces végétales, leur densité, le mode de répartition sont plus nuancés en saison des pluies qu'en saison sèche. Nous avons ici un relief, une lithologie et une granulométrie différenciés ce qui implique (entre autres conséquences écologiques) une capacité variable de rétention de l'eau de pluie; les formes d'érosion locale (ravinements sur les pentes des dunes, cônes d'accumulation à leur pied) ne manquent pas d'intervenir en saison des pluies sur la disposition et la densité relative des couverts herbacés et arborés, ce qui peut se traduire par des nuances radiométriques. Ces différences restent liées à la structure dunaire mais peuvent aussi intervenir, en saison des pluies tout particulièrement, des nuances indépendantes de la structure; c'est le cas sur la zone-échantillon KUTA qui présente une absorption radiométrique générale faible dans tout le secteur sud, élevée dans tout le secteur nord; cette différence ne masque pas totalement la structure mais elle amortit les contrastes qui la mettent en évidence. Cette différence peut être imputée à des pluies plus abondantes et mieux réparties dans le temps (1) tombées sur le secteur nord, pluies qui auraient favorisé la croissance végétale et l'activité chlorophyllienne sur les aires sableuses, atténuant ainsi le contraste avec les bas-fonds.

3. LES TRAITEMENTS: RECHERCHE DE CONTOURS ET DE DIRECTIONS

Dans notre cas, les traitements multispectraux ne restreignent guère l'éventail des hypothèses d'interprétation, ils restituent la structure principale sans acquisitions supplémentaires.

En revanche, la mise en évidence des unités texturales, c'est à dire de l'agencement des pixels et des ensembles de pixels de valeur différente peut révéler l'organisation réciproque des espaces géographiquement distincts et par ce biais, préciser les hypothèses d'interprétation. Cette mise en évidence réalise un tri de l'information sans rien en aliéner.

Par ailleurs, dans le milieu hétérogène qui est le nôtre, c'est à dire où la réflectance de chaque pixel est la résultante des brillances d'objets multiples et différents (sable nu, touffes d'herbes, ombre de ces touffes en proportions variables, par exemple...) nous avons considéré

(1) Rappelons qu'en zone sahélienne, les pluies tombent sous forme d'averses très localisées et que des secteurs géographiques très voisins (distants de quelques kilomètres seulement) peuvent ne pas bénéficier des mêmes conditions pluviométriques.

que la notion de voisinage nous est plus utile que celle de réflectance directement. Dans la mesure où l'on peut considérer en effet l'image Landsat comme une synthèse (Foin 1981), la visualisation des éléments de texture et de structure constitue un pas vers son analyse.

Ce qui nous intéresse ici, c'est d'étudier et de comparer des structures et non pas d'étudier les thèmes géographiques correspondants:

- parce que les thèmes généraux (alternance dunes—bas-fonds) nous sont déjà connus;
- parce que la résolution radiométrique et spatiale Landsat ne nous permet pas d'entrer dans le détail des thèmes géographiques (nature du couvert végétal, pentes, formations de surface)'

Par contre, l'alternance dunes—bas-fonds, révélée par les contrastes radiométriques *quelle que soit la longueur d'ondes*, nous permet d'étudier la structure; elle est parfaitement mise en évidence par des traitements de texture et de recherche de directions.

L'image numérique exploitée présente, comme c'est le cas général, des défauts et des anomalies. Le canal 4 est ligné, les canaux 6 et 7 sont fortement striés (*strippage*). Le seul canal à présenter un minimum de défauts est le canal 5: il est certes strié aussi mais pas suffisamment pour gêner l'analyse, pour autant qu'on tienne compte de l'existence de ce striage. Les différents traitements décrits plus loin ont donc tous été pratiqués sur le seul canal 5, qui présente par ailleurs les contrastes radiométriques les plus accentués.

Certains types de traitements monocanaux vont nous permettre d'améliorer la description de la structure étudiée et de quantifier les paramètres qui nous intéressent.

Ces traitements sont de deux ordres: d'une part l'application de filtres locaux (filtre différentiel et filtre de type Gabarit) qui a pour but d'améliorer la lisibilité de la structure étudiée à l'échelle du pixel; d'autre part l'application de Transformée de Fourier à deux dimensions qui permet théoriquement de quantifier deux paramètres de la structure: l'orientation et la répétitivité.

Parmi les filtres locaux sur la maille 3 x 3 (qui est la maille élémentaire en traitement numérique d'image) nous avons sélectionné ceux qui nous ont paru à la fois les plus efficaces et les plus simples pour mettre en évidence les contours sur une image (Pratt 1978). Ils sont constitués de combinaisons de filtres gradients fondés sur le modèle simple de la dérivée directionnelle. Nous n'avons cependant pas choisi cette dernière car nous voulions obtenir une synthèse multidirectionnelle sur la même image.

Le filtre Sobel est un filtre de recherche multidirectionnelle fondé sur un modèle différentiel du premier degré. Le filtre Gabarit est la recherche locale du plus grand gradient directionnel; outre le contour, il calcule celle des directions (au nombre de huit) où le gradient est le plus élevé.

3. 1. Les filtres locaux

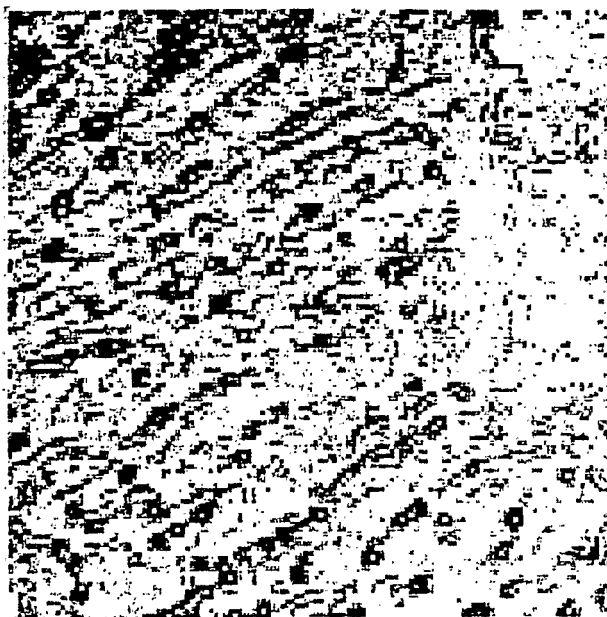
3. 1. 1. Le filtre différentiel Sobel

Le filtre de Sobel est, parmi les filtres locaux calculant les contours sur une image, l'un des plus pratiques lors d'une recherche multidirectionnelle. Le modèle sur lequel est basé son calcul est le produit scalaire de deux gradients de directions orthogonales. Nous avons choisi ici les directions horizontale et verticale.

Partiellement, l'image résultante est obtenue en calculant la racine carrée de chaque convolution de l'image brute avec les deux filtres gradients horizontal et vertical correspondant aux deux masques suivants:

$$\begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{array} \qquad \begin{array}{ccc} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{array}$$

La discrétisation de grandeurs fonctionnelles connues telles que gradient sur les petites mailles carrées 3 x 3 avec lesquelles nous travaillons a pour effet de schématiser ces notions, et les résultats par la même occasion. Les masques gradients sont proches de la définition du gradient directionnel, aussi n'est-il pas étonnant que sur une image aussi peu contrastée que celle de l'Azawagh, le filtre de Sobel hiérarchise les contours de façon subtile.



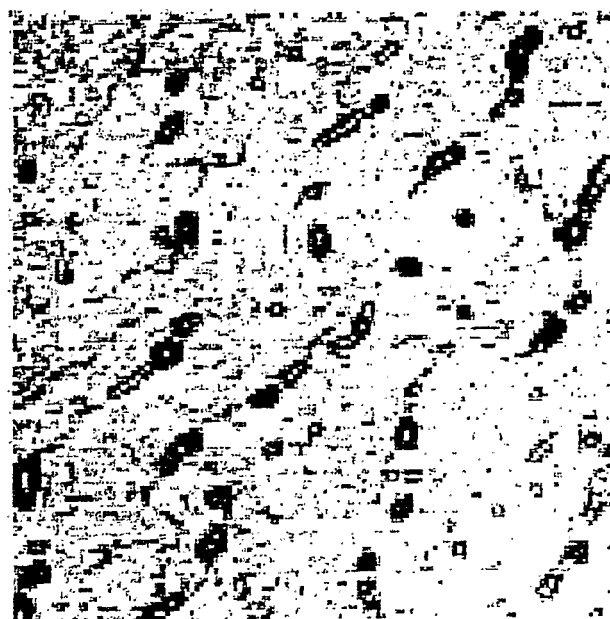
a. JEKO/Vallée



b. JEKO



c. KUTA



d. AZAR

Figure 3. Résultat de filtrage Sobel, original Versatec increment 1, réduction x 2.

Dans leur ensemble, les filtres différentiels semblent opérer de façon satisfaisante sur notre image où l'échelle des gris est continue et où les frontières entre zones homogènes n'envahissent pas la surface de l'image.

Les images résultantes mettent en valeur les contrastes d'énergie: elles matérialisent visuellement les structures, les directions et les espaces sur lesquels s'exercent ces directions.

La schématisation, résultat du traitement, met la structure en évidence de deux manières:

- en matérialisant la continuité des alignements;
- en matérialisant des éléments secondaires de la structure, peu perceptibles sur l'image brute.

C'est le cas sur l'échantillon JEKO / Vallée (figure 3a).

La structure dunaire est très visible en direction et en alignements et elle contraste nettement avec le secteur amorphe de la vallée. Dans cette dernière, une direction méridienne est amorcée, elle reste peu visible; dans sa partie sud, une ébauche de la direction dunaire coupe la vallée; enfin, on remarque que le contact entre l'erg et la vallée n'apparaît pas comme une linéarité structurale mais simplement comme la limite entre une structure orientée et une structure indifférenciée.

Sur JEKO/Vallée et JEKO (figures 3a et 3b), on remarque que chaque axe reliant les bas-fonds alignés, axes qui sont les éléments structurants principaux, est "doublé" parallèlement par une ligne de même nature, passant "au large" des bas-fonds: cet alignement secondaire, qui crée une dissymétrie, participe à la structure principale et la renforce.

L'échantillon KUTA (figure 3c) présente des caractères très voisins: les directions des structures principales peuvent être directement comparées sans que des différences significatives apparaissent. La taille et la répartition des bas-fonds sont sensiblement les mêmes mais on remarque que la dissymétrie citée ci-dessus sur JEKO n'apparaît pas de la même façon sur KUTA: la structure secondaire, conforme à la structure principale, que l'on observe sur JEKO est sur KUTA plus éloignée de l'axe des bas-fonds et organisée en éléments plus courts.

Sur les deux échantillons, un élément étranger à la direction principale apparaît nettement: un axe courbe à tendance perpendiculaire à la direction principale dans le secteur JEKO (secteur f de JEKO/Vallée), une continuité étrangère à la structure principale mais greffée sur elle dans les secteurs e et h de KUTA (1).

Le traitement met en valeur la rectilinéarité et la continuité de la structure de JEKO et de KUTA par rapport aux tracés sinueux, interrompus et espacés de AZAR (figure 3d); sur cette dernière image, les bas-fonds sont plus vastes, la structure est plus lâche: une direction principale est reconnaissable, très légèrement différente de la direction principale des autres échantillons; mais surtout elle est peu nette, "noyée" dans des "annexes" curvilignes sur lesquelles, à l'échelle de l'échantillon, aucun parallélisme ne peut être distinctement relevé.

Ces différences nettes (entre le couple JEKO-KUTA et AZAR) et ces nuances (entre JEKO et KUTA) sont considérées comme significatives, sur le plan thématique. Même en l'absence de certitudes qui en permettent l'interprétation, elles peuvent donner lieu à des hypothèses de travail qui orienteront les recherches ultérieures.

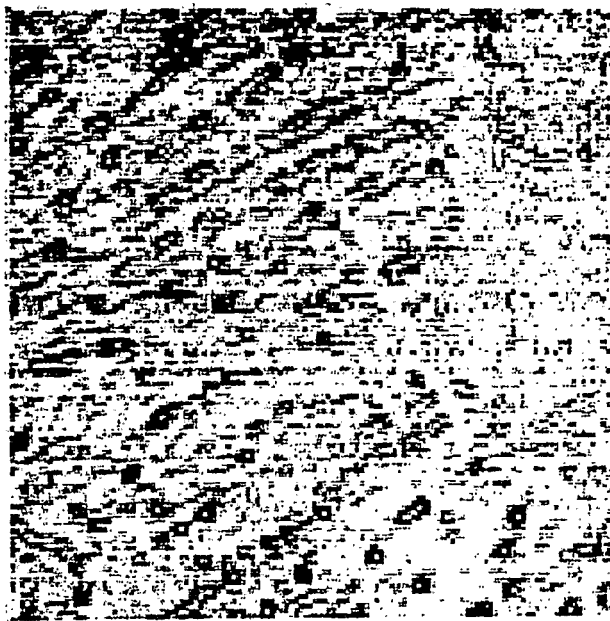
Le corpus comparatif entre les échantillons va être confirmé et augmenté par les traitements de type Gabarit.

3. 1. 2. Un filtre de type Gabarit: le filtre Robinson

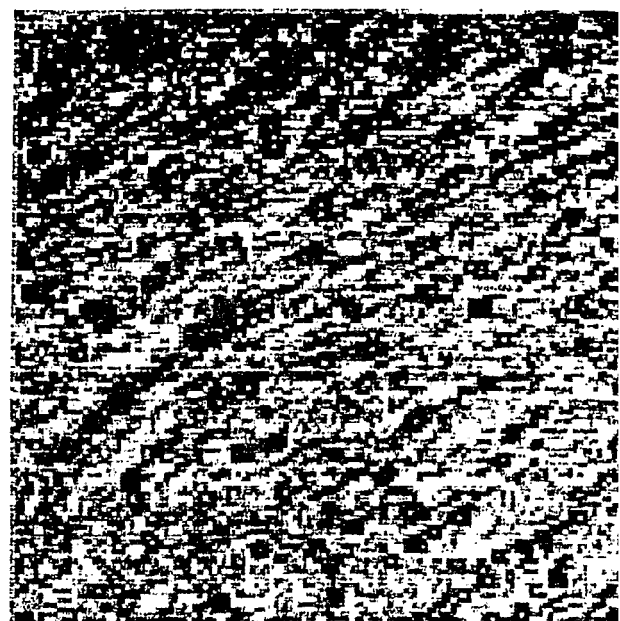
Les filtres de type Gabarit sont de simples gradients, mais optimisés localement: en chaque point de l'image, on remplace le pixel au centre d'une maille carrée 3 x 3 par le résultat de la convolution avec celui des sept masques directionnels qui fournit le plus fort gradient. On obtient

(1.) Ces repères géométriques correspondent à une division de l'image en 9 carrés (secteurs) codés:

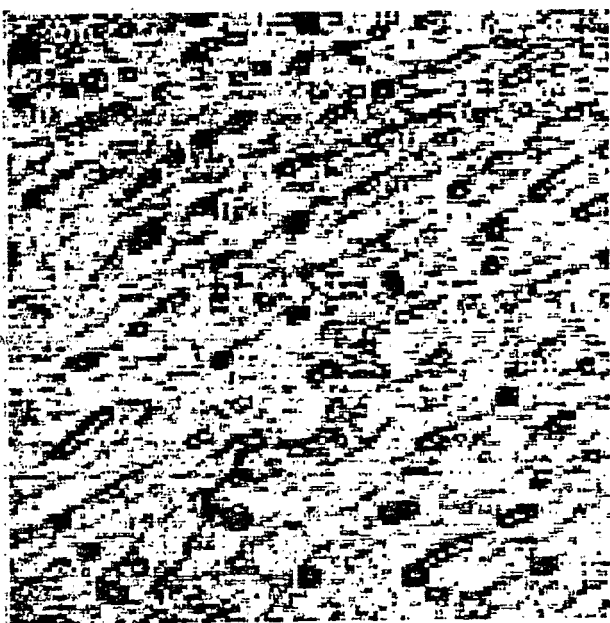
a	b	c
d	e	f
g	h	i



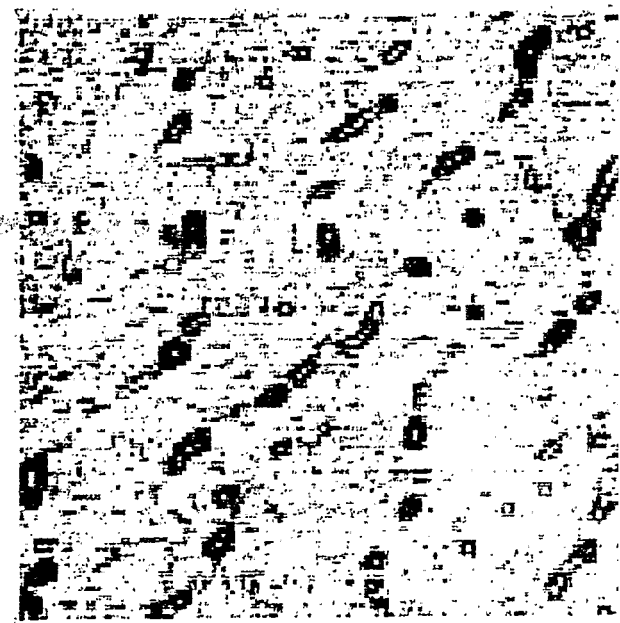
a. JEKO/Vallée



b. JEKO



c. KUTA



d. AZAR

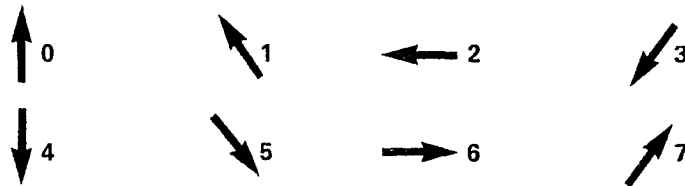
Figure 4. Résultat aréolaire de filtrage Robinson, original Versatec incrément 1, réduction x 2.

donc à la fois un contour (résultat de la convolution) et une direction, identifiée par le numéro du masque sélectionné.

Le filtre de Robinson opère six rotations du masque suivant:

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

et les directions ont les numéros suivants:



Ces directions sont évidemment simplifiées mais elles permettent d'effectuer un tri préliminaire sur l'image ou une première comparaison quantitative entre les directions de deux images différentes, par simple comptage sur une fenêtre d'une taille spécifiée. Nous obtenons en même temps une image à 7 niveaux de gris qui un schéma des directions des frontières et intéressant à ce titre.

Sur les quatre échantillons, les résultats sont très voisins des résultats Sobel: les contours (hautes valeurs de l'image résultante) sont cependant moins fréquentes ; inversement, les teintes de gris intermédiaires sont plus fréquentes, ce qui a pour effet d'atténuer les contrastes (figure 4).

Dans notre cas, où les directions des contours sont peu variées, c'est l'image Sobel qui est la plus lisible. Ces résultats sont compréhensibles dans la mesure où l'image issue du traitement de Robinson est finalement le résultat d'un gradient directionnel; sur une image brute aux directions moins ordonnées, il est probable que le filtre de Robinson hiérarchise mieux les directions; ce qui en faciliterait l'interprétation.

Si, en ce qui concerne la lisibilité de nos images, le filtre Robinson paraît moins satisfaisant que le Sobel, il fournit en revanche, pour chaque pixel de l'image, celle des 8 directions où le gradient est le plus fort, ce qui nous permet d'étudier les directions en tant que telles sur le plan quantitatif.

Les distributions de la variable *direction* (prenant des valeurs de 0 à 7) calculées sur les quatre échantillons, sont comparées qualitativement (comparaison de l'*ordre* des directions) et quantitativement (comparaison des *valeurs absolues* de ces distributions).

Les histogrammes ci-dessous montrent la distribution des directions, pour les quatre échantillons, sur les fenêtres de 128 x 128 pixels.

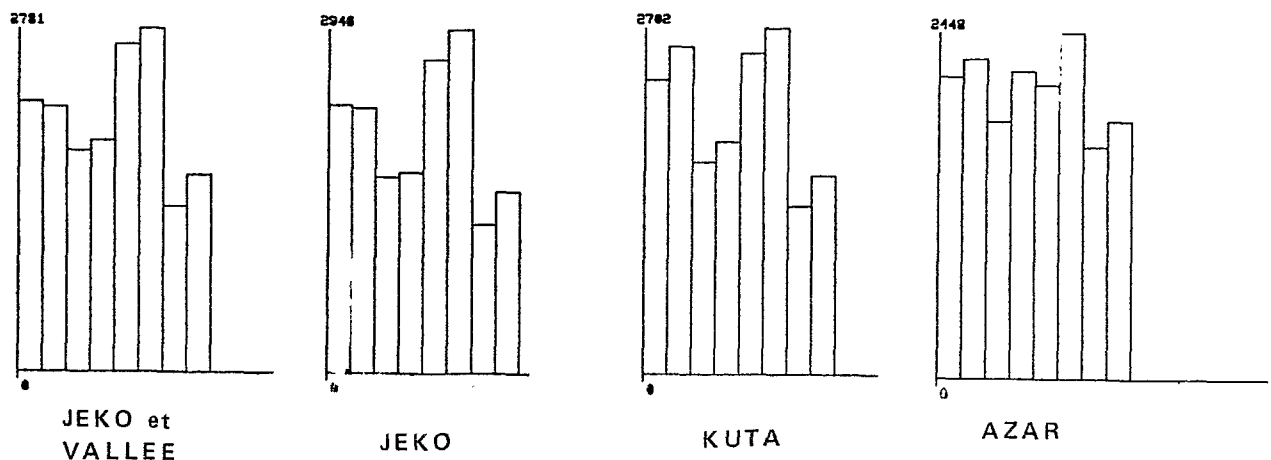


Figure 5. Filtre de Robinson, histogramme de distribution des directions.

Les deux échantillons JEKO et JEKO/Vallée présentent la même hiérarchie de directions malgré la présence de l'aire non orientée (la vallée): les directions 5, 4, 0 et 1 dominent les autres directions dans les mêmes proportions.

Tout en présentant une allure générale semblable (importance de 5 et de 4), KUTA présente des différences notables: la hiérarchie des directions s'y inscrit 5, 1, 4 et 0, les deux dernières directions suivant de près les deux premières.

AZAR présente des caractères assez nettement différents des précédents: sur la fenêtre 128 x 128, les 8 directions présentent des occurrences groupées, la direction 5 domine suivie de très près par les directions 1, 3 et 0; la direction 4 qui vient ensuite est très proche de la direction 0. L'histogramme AZAR est plus aplati que les trois autres, ce qui indique une moindre rectilinéarité de la direction principale.

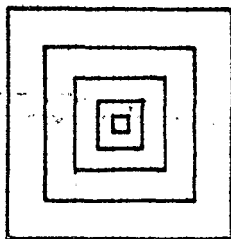
On retrouve donc, sur AZAR comme sur JEKO, JEKO/Vallée et KUTA, les constantes et les variantes déjà entrevues précédemment. Mais nous disposons désormais de quantifications qui permettent de traiter statistiquement les données à l'aide de l'indicateur "direction" que nous venons de décrire.

Le calcul de l'occurrence des directions pose le problème de la *régularité* des directions sur l'ensemble de l'image. En effet, cet élément géométrique n'apparaît pas dans le simple calcul de la distribution des directions.

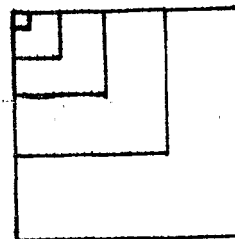
Nous avons donc examiné la *variation* de la distribution des directions en fonction de la taille et de la position de la fenêtre.

Nous avons fait varier, dans chacun des quatre échantillons:

- la taille de la fenêtre: 20 pixels sur 20; 40 pixels sur 40; 100 pixels sur 100, sans oublier les dimensions "standard" de chacun des échantillons: 128 sur 128 pixels;
- la position du pixel d'origine à partir duquel s'organisent les carrés ci-dessus: pixel central de l'image 128 x 128 d'une part (configuration a), premier pixel en haut à gauche d'autre part (configuration b).



a. fenêtrée centrée



b. origine haut gauche

L'examen comparatif des histogrammes (résumé dans le tableau 1), dans chaque échantillon et d'un échantillon à l'autre, montre que JEKO et JEKO/Vallée sont semblables: la position de la vallée n'influence guère les directions dans la configuration a non plus que dans la configuration b; les directions 5, 1, 4 et 0 dominent systématiquement avec une prépondérance de 5 sur les fenêtres de plus de 40 pixels quel que soit le point origine. Les fenêtres de 20 pixels sur 20 pixels en configuration a et en configuration b présentent une hiérarchie un peu différente, respectivement 4, 0, 5, 1 et 2, 1, 0, 6; cette dernière hiérarchie est la plus éloignée de celle de l'échantillon 128 x 128 ce qui est compréhensible: les petites fenêtres sont plus sensibles aux nuances géographiques. Sur l'échantillon JEKO (avec ou sans vallée) une fenêtre de 20 sur 20 pixels peut donc être considérée comme trop petite pour donner des résultats significatifs sur le plan de la structure.

Dimensions		20 x 20	40 x 40	100 x 100	128x 128	128 x 128 HFC	
		histogrammes simples					
Echantillons fenêtres	JEKO/ Vallée	fenêtres centrées	1	5	5	5 4 0 1	5 4 0 1
			4	4	4		
			5	1	0		
			0	0	1		
	origine haut-gauche	5	5	5	5 4 0 1	5 4 0 1	
0		0	4				
1		1	0				
2		4	1				
JEKO		fenêtres centrées	4	4	5	5 4 0 1	5 4 0 1
			0	0	4		
			5	5	0		
			1	1	1		
	origine haut-gauche	2	5	5	5 4 0 1	5 4 0 1	
1		1	4				
0		4	0				
6		0	1				
KUTA		fenêtres centrées	1	5	5	5 1 4 0	5 1 4 0
			5	1	1		
			4	4	4		
			3	0	0		
	origine haut-gauche	5	1	5	5 1 4 0	5 1 4 0	
5		1	1				
4		4	4				
3		0	0				
AZAR		fenêtres centrées	5	5	5	5 1 0 3	5 3 1 4
			3	7	3		
			7	0 1	4		
			0	3 4	1		
	origine haut-gauche	2	5	5	5 1 0 3	5 3 1 4	
3		4	3				
4		3	4				
1		0	1				

Tableau 1. Les quatre directions les plus fréquentes dans l'ordre, selon la taille des fenêtres et le point origine.

L'échantillon KUTA se comporte sensiblement de la même manière, avec davantage de régularité encore: l'ordre 5, 1, 4 et 0 est plus systématique.

Dans l'échantillon AZAR, l'ensemble de la hiérarchie directionnelle est nettement moins régulier: seule la direction 5 apparaît presque systématiquement, les autres directions sont dérangées.

La notion de *régularité géométrique* des directions sur une image à l'intérieur d'une fenêtre carrée de n pixels de côté peut être évaluée de façon statistique. Une façon de faire est de calculer, pour chaque échantillon, la somme des occurrences sur l'ensemble des fenêtres carrées consécutives contenues à l'intérieur de la fenêtre n (de 128 sur 128 pixels dans notre cas).

Si cet histogramme — que nous appellerons *histogramme sur les fenêtres consécutives* (HFC du tableau 1) — et l'histogramme simple sur la fenêtre n ordonnent l'ensemble des huit directions de façon identique, ces directions vérifient une régularité statistique et géométrique sur l'ensemble de la fenêtre. Si ce n'est pas le cas, l'histogramme simple des directions ne traduira qu'un résultat statistique, non *régulier* géométriquement.

Le tableau 2 expose les résultats des histogrammes sur fenêtres consécutives obtenus sur les quatre échantillons pour les huit directions.

directions	JEKO/Vallée	JEKO	KUTA	AZAR
0	47825	50823	49989	45220
1	46206	50029	57174	48479
2	28745	25788	25206	28253
3	41334	37356	39202	49407
4	61083	61650	56205	46747
5	62251	66041	60508	55386
6	28539	25203	27915	35604
7	33511	32604	33295	40398
total	349494	349494	349494	349494

Tableau 2. Les chiffres en italiques marquent la direction principale.

Les trois échantillons JEKO/Vallée, JEKO et KUTA présentent une régularité géométrique indéniable: les quatre premières directions sont ordonnées de la même manière sur l'histogramme simple et sur l'histogramme sur fenêtre consécutives (tableau 1). L'échantillon AZAR est dans le cas contraire.

Si l'on choisit de décrire chaque échantillon par les quatre directions les plus fréquentes, on peut alors compléter la description par un terme positif ou négatif suivant l'adéquation ou la non-adéquation entre l'histogramme simple et l'histogramme sur fenêtres consécutives: une série de cinq termes suffirait alors pour décrire les quatre orientations principales et leur régularité géométrique.

L'histogramme des directions sur les fenêtres consécutives met en évidence le désordre d'une structure à travers des directions bien que celles-ci soient schématiques; il matérialise un critère de stabilité de la structure et présente un grand intérêt potentiel, notamment dans les comparaisons multitemporelles d'une même structure: on en voit immédiatement une application dans la surveillance de milieux dunaires mobiles ou en cours de remobilisation.

3. 2. La Transformée de Fourier à deux dimensions

Nous souhaitons expérimenter d'autres descripteurs de la structure que ceux issus de la convolution avec des filtres locaux de dimension 3 x 3; les filtres de type Transformée de Fourier ont l'avantage de posséder des propriétés valables pour l'ensemble de l'image sur laquelle on les calcule: les résultats s'interprètent donc quel que soit le point de l'image considérée, en comparaison avec tous les autres points. En outre, et c'est tout aussi important, la Transformée de Fourier paraît spécifiquement adaptée à la résolution d'une problématique de *mesure directionnelle* et à sa quantification.

Les propriétés de la Transformée de Fourier nous ont paru intéressantes dans la mesure où le plan de Fourier fournit les directions principales du spectre de puissance. On peut ainsi interpréter une région de l'image en hautes fréquences comme une région où les niveaux de gris varient rapidement dans l'espace alors que la présence de taches uniformes caractérise les basses fréquences. Ceci permet d'effectuer une recherche systématique, dans le plan de la Transformée de Fourier, des directions principales et secondaires des structures dunaires de nos différents échantillons.

L'application de la Transformée de Fourier bi-dimensionnelle optique nous permet de centrer le flux d'énergie au milieu du cadre 128 x 128 et de comparer directement l'image d'origine à sa Transformée.

La formule de la Transformée de Fourier F en un point (m1,m2) d'une image de taille M x N est la suivante:

$$F(m_1, m_2) = \frac{1}{\sqrt{M, N}} \sum_{k_1 = -M/2}^{M/2-1} \sum_{k_2 = -N/2}^{N/2-1} f(k_1, k_2) W_1^{k_1 m_1} W_2^{k_2 m_2}$$

où: $m_1 = -M/2, \dots, M/2-1$
 $m_2 = -N/2, \dots, N/2-1$

et $W_1 = e^{-2i \pi / M}$

$W_2 = e^{-2i \pi / N}$

Dans le cas où M et N sont des puissances de 2, ce qui est le cas ici, nos échantillons ayant une taille de 128 x 128 pixels, le calcul est considérablement accéléré car on peut utiliser l'algorithme de Transformée de Fourier rapide à base 2 dit *algorithme de Tukey*.

Le résultat fournit une image adaptée à celle que l'on obtiendrait par diffraction, la composante continue, proportionnelle à la moyenne des niveaux de l'image se trouvant en son centre au point de coordonnées M/2, N/2.

Avant le calcul de la Transformée de Fourier, nous avons centré les valeurs brutes autour de la moyenne, obtenant ainsi une composante continue nulle après le calcul; pour des raisons de lisibilité de l'image résultante, nous avons utilisé l'échelle logarithmique suivante:

Niveau de sortie = Niveau maximum Constante x log (module / module maximum).

Ce type de restitution est devenu classique parmi les utilisateurs de la Transformée de Fourier bi-dimensionnelle, nous n'y insisterons donc pas; ici, la constante a été fixée à 48, compte-tenu du mode de restitution utilisé et des résultats obtenus; le niveau maximum a pour valeur 255.

La présence d'événements dans l'une des directions de l'image originale se traduira par une composante remarquable du spectre dans cette direction. Les événements sont les variantes de niveaux de gris dans l'image, en amplitude et en fréquence. L'amplitude de la variation du signal dans une direction se traduira par un niveau de gris d'autant plus élevé que l'amplitude sera plus forte. On appelle *pics* les maxima du spectre de puissance. La fréquence spatiale nous est donnée par la distance d'un point à la composante continue; elle peut être traduite comme la rapidité dans la variation des niveaux de gris dans la direction où elle est mesurée. Ce qui constituera une direction remarquable, de notre point de vue, sera une direction où l'on observe des pics éloignés de la composante continue.

Pour nous appuyer sur des résultats chiffrés, à côté de la restitution elle-même, nous avons calculé les intégrales du spectre de puissance par secteur angulaire. Pour cela, il a suffi de tracer un cercle inscrit dans le carré de notre image, centré sur la composante continue et de le découper en 90 secteurs angulaires de 4° chacun; ceci permet de sélectionner les secteurs angulaires où la variation du signal est la plus importante, en moyenne.

Si nous avions voulu développer une étude quantitative sur l'ensemble des composantes, il aurait été alors indispensable de chercher les composantes les plus significatives sur le plan statistique, mais tel n'était pas notre propos ici. Nous nous sommes limités à une comparaison entre les quatre échantillons, ne prenant en compte que l'image du spectre et l'intégrale des 90 secteurs de chaque image, reportée graphiquement sur un demi-cercle de 4° en 4° (figure 6). Chaque zone échantillon possède ainsi son éventail caractéristique, signature en quelque sorte, de la structure qu'elle contient.

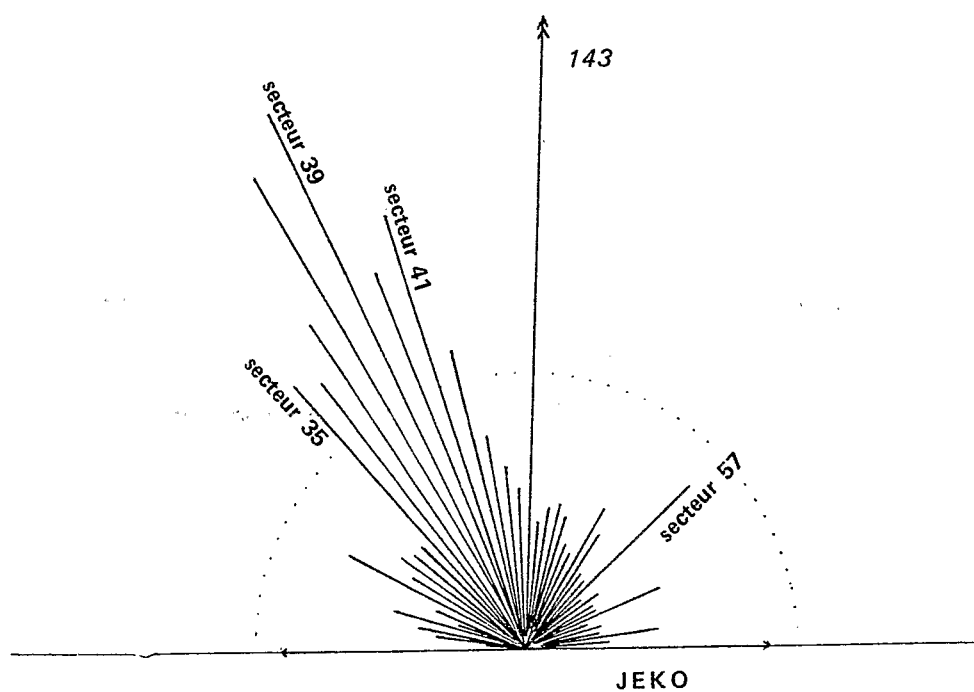
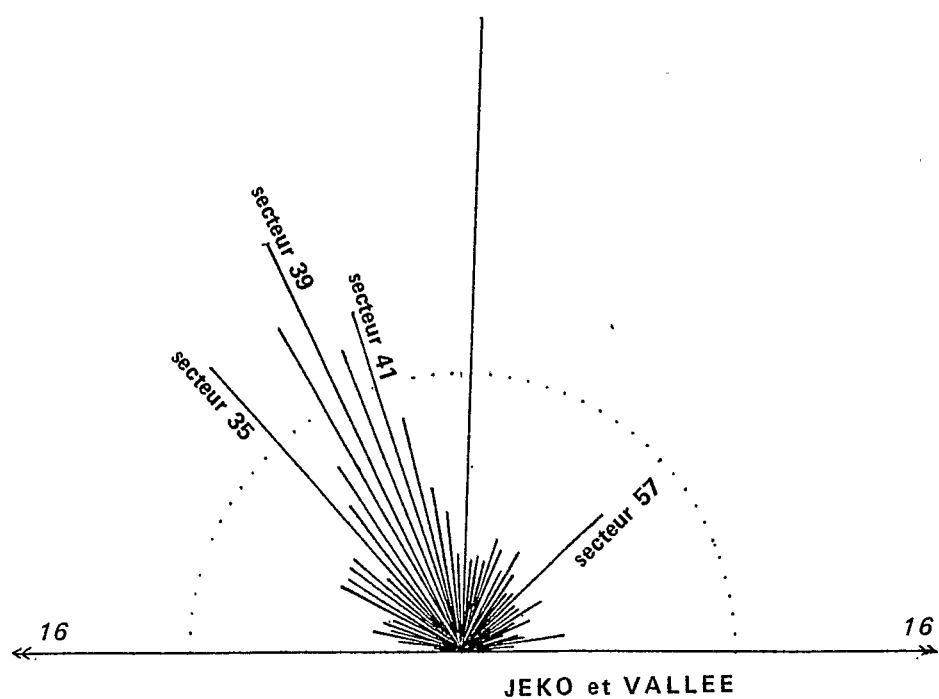
Nos structures dunaires alignées ne sont pas bruitées par d'autres structures, ce qui nous permet une interprétation immédiate des résultats de la Transformée de Fourier sans nous préoccuper de l'élimination des bruits, ce qui aurait exigé l'utilisation d'un filtre avant ou après la Transformée. On considère que la ou les composantes correspondant à la vallée de Tin Jekoda (JEKO/Vallée) n'est pas un bruit mais une autre structure, volontairement introduite. Par ailleurs, il existe un artefact, aisément repérable et interprétable sur la Transformée: c'est celui introduit par le lignage de l'image d'origine, structure horizontale régulière peu intense dans le détail mais répartie sur toute l'image. elle correspond, sur les éventails, à la direction 92° (92° c'est à dire en fait 90° aux 2° près d'approximation du secteur angulaire).

L'intérêt de la comparaison entre JEKO et JEKO/Vallée est de mesurer la perturbation introduite par le décalage de l'image vers l'Est en lui adjoignant une structure indifférenciée, la vallée. Nous constatons que l'ordre des maxima reste inchangé autour du secteur 39 qui demeure le secteur où l'intégrale atteint le maximum absolu; par contre, les directions 36 et 37 qui correspondent à des maxima relatifs sur JEKO ont disparu lorsqu'on y adjoint la vallée. De plus, globalement, les valeurs par secteurs ont diminué car on a introduit un élément qui perturbe de nombreuses directions à la fois.

Si on examine JEKO et KUTA, on constate que la direction où la réflectance change le plus significativement en amplitude et en vitesse correspond au secteur 39 et ceci pour les deux images. L'intégrale est cependant deux fois plus élevée pour KUTA et les directions secondaires sont plus nettes. Il existe un pic non négligeable correspondant au secteur 57; cette même direction est moins nette sur JEKO: la direction 39 de JEKO correspond à un maximum local peu éloigné des maxima que constituent les secteurs 35 à 41 pris dans leur ensemble; les variations sont donc globalement plus importantes et plus rapides le long de la direction principale sur l'image KUTA; les variations secondaires y sont également plus marquées que sur JEKO.

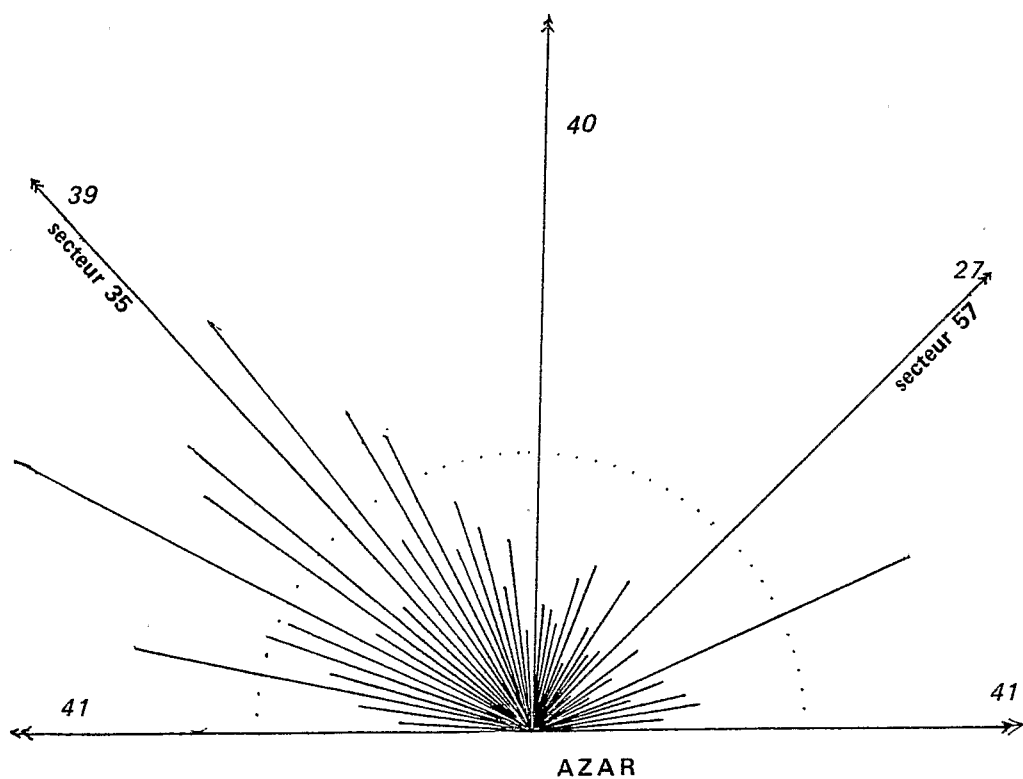
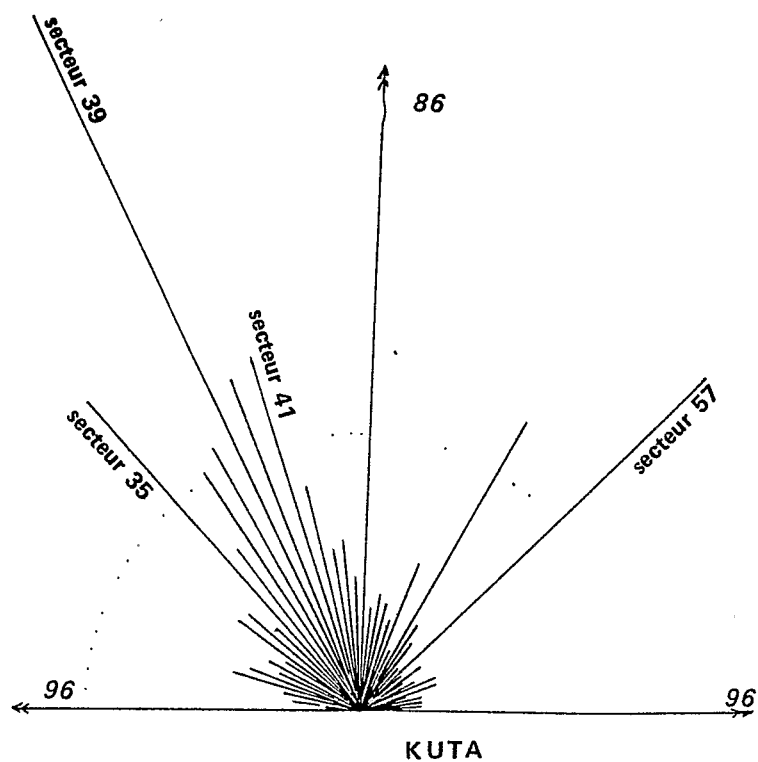
Sur l'image AZAR, la direction principale est déplacée de 16° environ puisque l'intégrale maximale correspond au secteur 35; la direction secondaire correspond toujours au secteur 57 mais cette fois le rapport entre les intégrales de la direction principale et les intégrales de la direction secondaire vaut $3/4$ pour AZAR alors qu'il vaut environ $1/2$ pour JEKO et KUTA; autrement dit, l'importance des variations de la réflectance dans la direction secondaire tend à être comparable à celle observée dans la direction principale.

Dans le cas présent, où il s'agit d'élaborer des systèmes comparatifs de structures semblables, les résultats bruts de la Transformée de Fourier sont de bons quantificateurs des deux paramètres *direction* et *répétitivité*.



Intégrale des 96 secteurs, reportée graphiquement.
 Un cm représente une énergie de 1000 sauf
 indication précisée: 43 égale 43000 par exemple.
 Echantillons JEKO et VALLEE et JEKO

Figure 6 a et b.



Intégrale des 90 secteurs, reportée graphiquement.
 Un cm représente une énergie de 1000 sauf
 indication précisée: 43 égale 43000 par exemple.
 Echantillons KUTA et AZAR

Figure 6 c et d.

Nous venons de voir, avec quatre échantillons voisins géographiquement et contenant les mêmes thèmes, à quel point la Transformée de Fourier est sensible aux variations de ces deux paramètres. Cette sensibilité, qui est un obstacle à l'utilisation de la Transformée de Fourier dans la plupart des cas où l'image est géométriquement complexe, représente ici, où nos images se rapprochent de figures simples, un gain d'information.

4. LES RESULTATS

Les traitements par filtres apportent une information différenciée selon les types de filtres. Cette information est de deux ordres:

- mise en valeur des contours sur image aréolaire;
- quantification de paramètres descriptifs.

4. 1. Les figurations de contours: Sobel et Gabarit (Robinson)

Les procédures de filtrage de type Sobel et de type Gabarit (ici, filtre Robinson) nous fournissent toutes deux des images en nuances de gris qui représentent le territoire traité en coordonnées orthogonales géométriques: sans tri intempestif et sans perte d'information, les filtrages mettent en évidence les *contours* faisant apparaître les éléments principaux de l'image et aussi les détails et les nuances. Ces détails ne sont guère perceptibles sur image brute monospectrale non plus que sur traitements simples multispectraux (du type "indices de végétation" par exemple; on ne leur avait pas prêté attention parce qu'ils n'étaient pas très visibles auprès de la structure principale; comme nous travaillons sur des territoires qui, rappelons-le sont mal connus sur les plans de la nature, de l'extension géographique et de la dynamique de nombreux thèmes présents sur l'image, il n'est pas négligeable que les nuances radiométriques fines soient ainsi révélées. Sur les échantillons traités (les deux JEKO, KUTA et AZAR), les contours font apparaître clairement la structure principale sous forme schématisée par rapport à l'image brute; sur JEKO et KUTA, ils révèlent en outre des structures secondaires qui, à notre niveau d'étude, sont aussi importants pour l'interprétation et l'exploitation thématique, que la structure principale; ces structures "secondaires", conformes à la structure principale, peuvent être interprétées comme des nuances radiométriques liées à la structure principale: l'hypothèse est qu'il s'agit d'un effet de pente: nuances végétales sur les flancs des dunes liées à une capacité différente de rétention de l'eau sur les pentes et les sommets, avec ou sans effet d'éclairement sur les versants exposés à l'ensoleillement direct. Cette structure secondaire, moins contrastée que la structure principale, ne se présente pas tout à fait de la même manière sur JEKO et sur KUTA: sur le premier, elle se présente sous forme plutôt dédoublée, c'est à dire par deux alignements parallèles à la structure principale et souvent dans le prolongement des axes des bas-fonds; sur KUTA, les alignements secondaires se présentent plutôt isolément, séparés les uns des autres par les alignements de la structure principale; on peut donc présumer qu'il y a là un arrangement des dunes et des bas-fonds assez différent dans les deux cas.

La schématisation introduite par les filtres donne donc une idée des arrangements de la structure (ou des structures) à l'intérieur de l'image échantillon: c'est ainsi que KUTA présente un faisceau structural légèrement resserré vers le coin haut-droite (approximativement Nord-Est); que sont pressenties les deux directions principales de AZAR qui présente une structure de forme sinusoïdale. Les différences radiométriques entre nord et sud de KUTA, liées à une différence probable de pluviosité, n'apparaissent plus sur image filtrée et l'évidence de la structure dunaire n'est plus masquée par cet événement vraisemblablement occasionnel. Des différences géométriques entre JEKO et KUTA sont restituées par la mise en valeur de la forme des bas-fonds, globulaires dans JEKO, plus allongés dans KUTA, et par leur continuité linéaire. Ces différences morphologiques entre deux types très voisins d'une structure sont mises en évidence sur les figurations aréolaires alors qu'elles sont escamotées sur les résultats quantitatifs qui présentent, comme on l'a vu, JEKO et KUTA sous des paramètres quasiment identiques.

La schématisation aréolaire est tout aussi révélatrice quand il s'agit de comparer des structures plus différentes, sur des échantillons différents (KUTA et AZAR par exemple) ou sur la même image (JEKO et la vallée): on voit sur JEKO/Vallée que le contact entre l'ensemble dunaire structuré et la vallée est une simple disparition de la structure orientée sans solution de continuité mais que des alignements méridiens sans rapport avec la structure principale apparaissent au coeur de la vallée.

Enfin, les filtrages ont conservé les anomalies structurales telles ces axes d'écoulement anciens (présumés) qui se surimposent, sur JEKO et sur KUTA, à la structure dunaire.

Sur les échantillons que nous avons traités et dans la perspective thématique et méthodologique qui est la nôtre, il importe donc que la schématisation ne soit pas poussée au point que des détails, peut-être importants, soient occultés.

4. 2. Les mesures: Gabarit (Robinson) et Transformée de Fourier

Lors qu'un phénomène est couramment représenté à la surface de la Terre (1) sous des formes semblables, il devient utile de comparer avec précision les divers aspects qu'il présente (formes, structures...) et leurs nuances afin de mettre ces aspects en relation avec les taxonomies existantes, éventuellement avec les processus génétiques correspondants s'ils sont identifiés. Une quantification apporte à la comparaison l'élément précis et irréfutable qui permet la classification, surtout quand les éléments à comparer sont morphologiquement voisins: notre objectif ne sera pas nécessairement de comparer des structures dunaires très différentes les unes des autres mais plutôt de mettre en évidence des nuances "mineures" dans un ensemble apparemment homogène, des transformations dans le temps, voire les caractères communs de plusieurs ensembles différents...

Les traitements par filtres ont permis de quantifier des paramètres spécifiques aux structures présentes dans les échantillons traités: orientation, répétitivité, orientation dans la fenêtre.

Les quantifications issues de la procédure Gabarit présentent le grand intérêt d'être extrêmement simples et rapides à mettre en oeuvre: les expériences que nous avons faites à leur propos nous ont fourni des mesures multiples; les résultats sont faciles à déchiffrer grâce à leur simplicité. En effet, les directions sont mesurées sous huit termes seulement ce qui permet des comparaisons visuelles instantanées (comparaison des histogrammes par exemple) et des traitements statistiques complémentaires très simples. L'évaluation de la régularité dans l'échantillon est un apport important: on peut évaluer cette régularité sur des sous-fenêtres choisies à l'avance à l'intérieur de l'échantillon; on peut aussi l'évaluer sur la totalité de l'image en éprouvant la résistance des résultats au fur et à mesure de l'accroissement de la sous-fenêtre: choix géographique et fiabilité restent maîtrisés et leurs résultats sont interprétables.

Ces procédures donnent une aisance utile pour l'exploration de secteurs géographiques voisins.

Cependant, la recherche de directions par filtres Gabarit et les mesures qui en sont issues sont obérées par l'imprécision des résultats: les huit directions donnent des orientations approchées à 22°30' près, qui ne peuvent guère être mises en relation avec la boussole du géographe! L'interprétation thématique ne peut se traduire en termes d'*orientation géographique* au sens strict et les informations ne peuvent être comparées dans l'absolu: on a perdu en précision ce qu'on avait gagné en simplicité.

Par ailleurs, cette imprécision aliénerait complètement les résultats si nos images n'avaient pas présenté une structure aussi uniforme et aussi simple: les résultats directionnels des filtres de type Gabarit sont évidemment inutilisables quand l'image présente un faisceau étroit de directions variées.

Néanmoins, les filtres Gabarit peuvent proposer des indications préliminaires, un premier schéma schéma en quelque sorte, sur les structures d'un territoire, aussi bien sous forme aréolaire que sous forme statistique en fournissant des termes descriptifs élémentaires. Ces termes peuvent servir ensuite à localiser et délimiter des échantillons significatifs représentatifs de l'ensemble à étudier ou bien, si nécessaire, de ses "anomalies". Nous leur voyons une application intéressante dans des mesures de déviations dues aux obstacles topographiques.

(1) et même à la surface d'autres planètes connues: voir les études de M. Mainguet sur les champs de dunes de la planète Mars (Mainguet et al. 1984).

En revanche, la matérialisation du spectre de puissance de la Transformée de Fourier nous donne des indications d'orientation d'une très grande précision: nous l'avons choisie ici à 2^0 près. Quelles que soient les directions présentes sur l'image, les résultats sont directement interprétables géographiquement et ils ont alors d'autant plus d'intérêt que les directions principales sont proches les unes des autres grâce à la grande sensibilité à la variation de direction de la Transformée de Fourier.

Par ailleurs, l'amplitude de la variation du signal, dans la direction principale et dans les directions secondaires éventuellement, est un indicateur caractéristique du rythme de la structure; à l'évidence, celui-ci est un paramètre descriptif essentiel dans les ensembles structurés répétitifs qui sont l'objet de notre étude.

4.3. Une description des ensembles dunaires

Notre propos n'est pas de proposer ici le détail d'indices et de formules permettant de décrire et de classer toutes les structures dunaires: disons seulement, à cette étape de notre recherche, que l'*orientation*, le *rythme* et la *régularité* nous paraissent des éléments pertinents pour qualifier une structure (c'est à dire un ensemble) dunaire, en termes simplement morphologiques. Dans le cas des structures "simples" et plutôt homogènes des échantillons traités ici, les procédures de filtrage sont particulièrement efficaces à la fois pour révéler des éléments nouveaux et pour fournir des termes de description.

Le but plus lointain de cette opération est d'une part de mettre ces éléments de description morphologique en relation avec les facteurs de la genèse (le vent, la granulométrie des sables, l'évolution éolienne et hydrique postérieure à la phase d'édification, le couvert végétal...) des ensembles dunaires tels que nous les voyons aujourd'hui; d'autre part de mettre ces éléments de description morphologique en rapport avec des opérateurs mathématiques qui traitent des *surfaces* (formes et mesures) inscrites à l'intérieur des contours (1).

Ce sont les *directions* et la *régularité* des structures simples qui peuvent le plus efficacement être mises en relation avec les directions des vents qui les ont engendrées: les structures vives actuelles avec les vents actuels; les structures "fixées" (ou "mortes") avec les paléo-vents. Le rythme, lui, peut être mis en relation avec la régularité de construction de l'ensemble: régularité des vents, obstacles topographiques, diversité granulométriques du matériau...

Ces relations seraient à effectuer à plusieurs niveaux:

- au niveau de l'observation et de la mesure dans l'espace naturel: grands édifices ou micro-formes, observations de terrain et travaux à partir du terrain "restitué" par les images spatiales et aériennes;
- au niveau de l'observation et de la mesure expérimentales, en soufflerie par exemple, susceptibles de donner les éléments d'une modélisation (2);
- aux échelles temporelles à long terme, par exemple: comparaison entre ensembles "morts" du Sahel sud-saharien et ensembles "vifs" du Sahara, qui correspondent à des phases d'évolution différentes;
- aux échelles temporelles à court terme enfin, étude des états successifs d'un même ensemble: les enregistrements Landsat couvrent désormais une période de douze années; cette période contient, pour le Sahel ouest-africain, deux paroxysmes secs (1972-1974 et 1984-1985) séparés par une rémission relative; ces conditions sont certes favorables à l'observation et à la mesure de la dynamique actuelle des ensembles dunaires.

Mars 1985

(1) Cet objectif est poursuivi dans une étude des surfaces dunaires par morphologie mathématique, actuellement à ses débuts par les mêmes auteurs.

(2) Modélisation qui est un mode d'approche utile à (entre autres) la lutte contre l'ensablement actif.

ANNEXE

Les traitements ont été effectués au CIRCE et à l'Atelier de Télédétection de l'Orstom à Bondy (ATOB).

Au CIRCE, nous avons utilisé des programmes du Logiciel SPIDER, implanté depuis novembre 1982: filtre de Robinson EGRS 1, EGRS 2, EGRS 3; filtre de Sobel EGSB 1, EGSB 2; Transformée de Fourier rapide bi-dimensionnelle à base 2 FFTS 2.

Nous avons également utilisé les possibilités de restitution d'images à teintes de gris sur le support VERSATEC à l'aide du logiciel UNIRAS.

L'ATOB dispose d'un MINI 6 16 bits et de plusieurs périphériques dont une tektronix 4014, un péricolor 1000 et une imprimante permettant la restitution d'images en teintes de gris. La restitution d'images non traitées y a été faite, ainsi que les calculs statistiques sur les images résultant du traitement *filtre de Robinson*.

BIBLIOGRAPHIE ET OUVRAGES CITES

BAURES Y. et DUVERNOY J. 1978: Statistical spatial filtering; application to aerial photographs, *Applied Optics* USA, vol. 17, n° 21, 1° nov. 1978.

BRIGHAM E.O. 1974: *The fast Fourier transform*, Prentice-Hall.

DUDA R.O. et HART P.E. 1971: *Pattern classification and scene analysis*, Wiley and Sons, N.Y.

FOIN P. 1981: Textures et signatures spectrales, deux aspects complémentaires et indissociables pour l'interprétation des images satellite, *Signatures spectrales d'objets en télédétection*, Colloque de l'INRA 1981, INRA-CNES, 371-377.

MAINGUET M. 1976: Propositions pour une nouvelle classification des édifices sableux éoliens d'après les images des satellites Landsat 1, Gemini, NOAA 3, *Zeitschrift Für Geomorphologie*, Berlin, 275-296.

MAINGUET M., MESNIER R., MOREAU C. 1984: Mécanismes anémométriques et morphologie éolienne de la planète Mars, *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 504, juin 1984, 271-278.

PONCET Y. 1984; *Etude du milieu naturel en zone sahélienne par télédétection spatiale*, multigraphié, à paraître Orstom 1985.

PRATT W. 1978: *Digital image processing*, Wiley and Sons, New-York.

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