

13

Des indicateurs morphologiques pour mesurer le changement des milieux sahéliens à partir des images satellitaires à haute résolution

CHRISTINE JACQUEMINET

Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex, France, téléphone : 48-47-31-95

Résumé

Dans l'optique d'une évaluation qualitative et surtout quantitative des transformations à moyen terme des milieux physiques au Sahel, deux indicateurs morphologiques sont analysés.

1) Les modelés dunaires et leurs orientations (au nord du lac Faguibine au Mali) : est explorée ici une méthode pour modéliser les formes dunaires et mesurer leurs orientations à l'aide des principes de la morphologie mathématique. Le calcul des orientations met ainsi en évidence l'évolution spatiale selon un gradient E-O des modelés de l'erg Assouarirt, de l'erg Azawad et de leur aire de transition.

2) L'organisation spatiale du couvert ligneux (à l'extrême nord du Burkina Faso) : l'identification des aires de ligneux à l'aide d'une classification multispectrale et la caractérisation des formes du couvert par morphologie mathématique permettent d'élaborer une typologie de la texture du couvert ligneux. Les variations de l'organisation spatiale des groupements de ligneux se révèlent étroitement liées aux unités géomorphologiques (dune/plaine interdunaire) et à la plus ou moins forte pression humaine.

1 Comment déterminer des indicateurs morphologiques sur images satellitaires

En milieu sahélien, les mécanismes morphogénétiques (éoliens et hydriques) modèlent dans le paysage des formes caractéristiques (dunes, ravinements, etc.). L'apparition et les modifications de ces formes sont alors considérées comme significatives de processus

dynamiques affectant le milieu. L'organisation de ces formes, en liaison avec la topographie et les caractéristiques pédologiques et géologiques des milieux, a une influence directe sur l'état de la végétation et sur sa répartition spatiale.

Au cours des dernières décennies, les régions sahéliennes ont été marquées par la persistance de conditions pluviométriques défavorables qui, conjuguées à une pression anthropique croissante, ont entraîné des modifications de l'organisation spatiale des ligneux. D'un mode de distribution diffus, la couverture ligneuse tend à devenir de plus en plus discontinue et à se concentrer dans les microdépressions favorables à la concentration des eaux. Ces modifications s'opèrent différemment selon les conditions topo-édaphiques des milieux considérés (Courel, 1984). Seuls les arbres et les arbustes sont ici étudiés car leur sensibilité d'ordre pluri-annuel reflète bien les évolutions à moyen terme, par opposition aux herbacées qui ont une sensibilité d'ordre annuel.

Sur les images satellitaires, le contraste radiométrique entre les aires dénudées et les aires couvertes met en évidence des formes ou encore des textures et des structures (Girard et Girard, 1989, p. 95), que nous analysons en tant qu'indicateurs morphologiques.

Deux indicateurs morphologiques liés à la répartition spatiale de la végétation ligneuse ont été déterminés :

1) L'orientation des modelés dunaires : la morphologie dunaire est perceptible sur les images satellitaires grâce aux contrastes radiométriques entre les crêtes couvertes d'herbacées sèches ou à nu, très réfléchissantes, et les couloirs interdunaires où se concentrent les ligneux, plus sombres. Nous utilisons le contraste radiométrique pour modéliser le contact entre les deux unités dune/couloir interdunaire, dont le tracé indique l'orientation des dunes. Cette étude est expérimentée sur le secteur dunaire situé au nord du lac Faguibine au Mali à partir d'une image Landsat MSS.

2) L'organisation spatiale du couvert ligneux ou comment la texture du couvert ligneux perçue en vue nadirale sur image satellitaire peut-elle nous renseigner sur les caractéristiques des milieux et sur leur évolution? Nous tentons d'élaborer une typologie des différentes textures végétales présentes sur l'image au moyen de descripteurs quantitatifs et d'évaluer dans quelle mesure les paramètres utilisés nous permettent de les différencier entre elles. L'étude est menée sur la région d'Oursi au nord du Burkina Faso avec une image SPOT multispectrale.

Actuellement, les variations des indicateurs morphologiques étudiés ont été caractérisées de façon quantitative d'un espace à un autre. La comparaison temporelle est envisagée dans la phase ultérieure.

Le traitement des données satellitaires comporte trois phases :

- extraction des traces des indicateurs aboutissant à la formation d'une image binaire;
- quantification des indicateurs par des paramètres d'orientation, de surface et d'espacement; l'originalité de cette recherche repose sur la quantification des indicateurs à l'aide des principes de la morphologie mathématique (Serra, 1982);
- comparaison des résultats obtenus.

2 L'orientation des modelés dunaires

2.1 Description des modelés dunaires de la région située au nord du lac Faguibine (Mali)

Le secteur dunaire situé au nord du lac Faguibine au Mali (entre 16° et 18° N, et 3° et 4° O) se situe à l'extrême nord du domaine sahélien où les précipitations sont de 200 mm/an en moyenne. On distingue deux ensembles dunaires au modelé différent :

- à l'est, l'Azaouad : cet ensemble se caractérise par un système de cordons rectilignes et de couloirs orientés ENE-OSO (système elb-tayaret);

- à l'ouest, l'Assouarirt : un ensemble dunaire dont le modelé ressemble à une gigantesque tôle ondulée partiellement nivelée; des dépressions et des croupes massives d'axe NNO-SSE se succèdent régulièrement.

Entre ces deux ergs s'étend une aire de transition où les deux types de modelés dunaires s'interpénètrent et disparaissent pour laisser place à des formes réticulées.

La végétation colonise ces ensembles dunaires, à l'exception de quelques surfaces de croupes où les sables non protégés sont remaniés par le vent. Dans les dépressions et les cuvettes, la steppe est plus épaisse et les groupements arbustifs sont denses (Courel, 1984).

Sur l'image Landsat 3 du 10 mars 1982 (fig. 1), sept échantillons jointifs ont été délimités d'est en ouest, entre 16° 30' et 17° 30' de latitude N et 3° 00' et 4° 30' de longitude O. Ces échantillons, appelés *A, B, C, D, E, F, I*, situés au nord du lac Faguibine, sont répartis sur une partie de l'erg Azaouad, l'aire de transition et de contact avec l'erg Assouarirt et une partie de celui-ci. Leur taille est de 300 par 300 pixels, soit 18,5 par 26 km environ sur le terrain. Les traitements numériques ont été effectués sur la fenêtre de chaque échantillon.

2.2 La modélisation des formes dunaires

La modélisation des formes du paysage dunaire consiste à transformer l'image de base en teintes de gris à l'aide d'opérations successives, jusqu'à l'obtention d'une image binaire ne contenant plus que la trame de la structure recherchée. L'image de base utilisée est la première composante d'une analyse en composantes principales calculée à partir des quatre canaux Landsat, qui offre une première amélioration des contrastes de brillance (fig. 2 et 6).

L'hétérogénéité de la couverture végétale et de la surface du sol génère une multitude de gradients qui dessinent le contact dune/couloir interdunaire, mais qui interrompent aussi localement la continuité des cordons. Pour renforcer la continuité des cordons et homogénéiser la texture de l'imagé, nous avons préalablement recours au filtre multidirectionnel Gabarit (Robinson, 1976). Ce filtre calcule sur une fenêtre de 3 par 3 pixels la valeur de gradient la plus élevée et attribue au pixel central une valeur de 1 à 8 en fonction de son orientation. La création d'une nouvelle image (fig. 3), où les valeurs radiométriques sont hiérarchisées en huit niveaux, a pour effet de renforcer et de schématiser les gradients. Chaque contact dune/couloir interdunaire apparaît dans une teinte de gris spécifique liée à l'orientation de ses gradients. Cependant, dans le cas de formes dunaires courbes comme celles de l'Assouarirt, le filtre Gabarit, en classant les gradients dominants en fonction de leur orientation, tend à hétérogénéiser les valeurs des contours des formes dunaires et à créer d'autres structures linéaires indépendantes de la structure dunaire, par simple juxtaposition de gradients de même valeur et de même orientation, et qui seront prises en compte dans les opérations ultérieures. Ce filtre n'a pas été utilisé dans le cas de l'échantillon *I* (fig. 6).

La modélisation des formes dunaires est obtenue en combinant les filtres morphologiques suivants : la médiane, l'ouverture et la fermeture (Mering et Jacqueminet, 1988a). Les filtres morphologiques en teintes de gris, non linéaires, opèrent sur le voisinage de chaque point. Ils tendent à épaissir ou à amincir les pics et les vallées de la fonction en teintes de gris, selon l'opération demandée (Coster et Chermant, 1985). L'ouverture a pour effet de lisser les valeurs élevées; la fermeture lisse les basses valeurs (fig. 4). L'image résultante des transformations en teintes de gris a été seuillée, de manière à ne conserver que la trame des structures dunaires analysées. Sur l'image seuillée, nous avons calculé le squelette (la ligne de points passant au centre de la forme) à partir duquel nous pouvons procéder à des mesures (fig. 5 et 7).

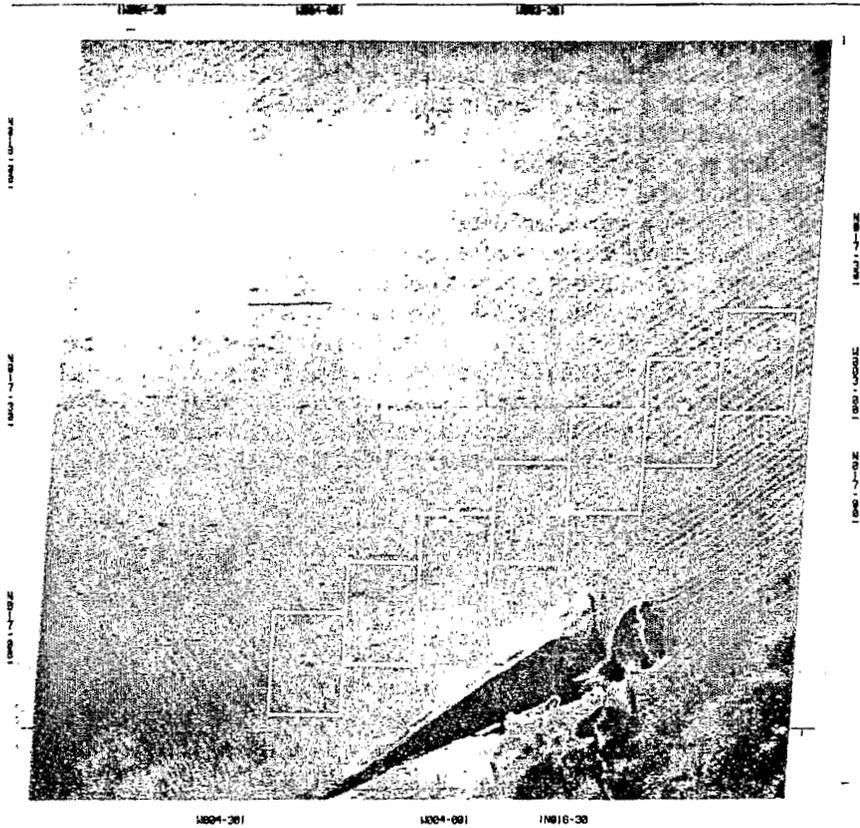


Figure 1. Localisation des échantillons sur l'image Landsat MSS du 10 mars 1982, canal MSS4

2.3 Le calcul des orientations des structures dunaires

Les orientations des structures dunaires ont été calculées à l'aide de la «rose des directions» qui teste n configurations de pixels par degré d'orientation (12 axes espacés de 30°). Chaque fois qu'elle rencontre des segments dont la configuration correspond à l'une de ces directions, elle incrémente d'autant le degré d'orientation correspondant. Les graphes des roses des directions sont présentés à la figure 8.

La rose des directions de l'échantillon A a pour orientation dominante celle des cordons de l'Azaouad : NE-SO. Celle de l'échantillon I souligne à son tour l'orientation NO-SE des cordons de l'Assouarirt, bien qu'elle ne soit pas prédominante. Les squelettes calculés sur les images des échantillons contiennent de nombreux petits éléments d'orientation perpendiculaire aux cordons et des formes alvéolaires dont les directions sont prises en compte dans le calcul de la rose des directions. Ce qui explique l'allure plus ou moins isotrope des roses des directions. De l'échantillon A à l'échantillon I, les roses des directions se transforment, mais on ne détecte pas de continuité dans le passage d'une anisotropie à une autre. On ne détecte pas non plus de seuil. La direction E-O est fortement représentée sur les roses de l'ensemble des échantillons, la prédominance de cette direction pourrait être due au lignage des images.



Figure 2. Échantillon A, première composante principale

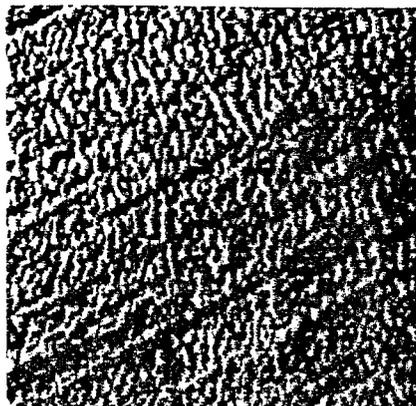


Figure 3. Échantillon A, filtre Gabarit «direction»

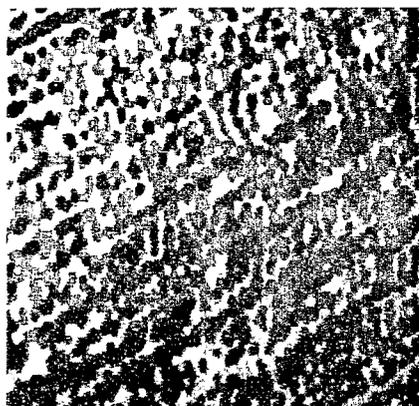


Figure 4. Échantillon A, fermeture de rayon 2

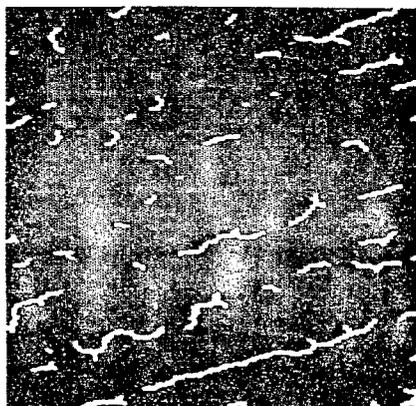


Figure 5. Échantillon A, squelette



Figure 6. Échantillon I, première composante principale

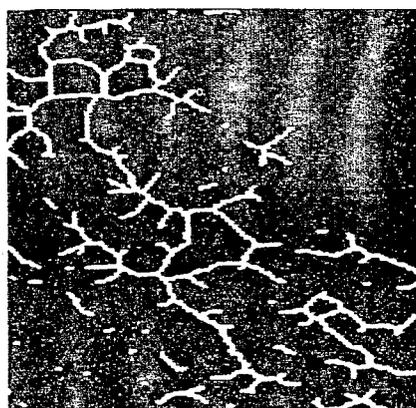


Figure 7. Échantillon I, squelette

Cette étude de l'orientation des dunes de l'Azaouad, de l'Assouarirt et de l'aire de transition entre ces deux ensembles met en évidence l'évolution spatiale des orientations des modelés dunaires : sur les images des squelettes, nous visualisons clairement les éléments de la structure dunaire et leur orientation. Les cordons dunaires extraits par les squelettes ne coïncident probablement pas avec ceux du terrain. Cependant, les directions des squelettes extraits d'après la répartition spatiale de la végétation au sol, elle-même liée à la morphologie dunaire, ont un lien direct avec les directions des cordons dunaires.

3 L'organisation spatiale du couvert ligneux

3.1 La région d'Oursi et les textures végétales rencontrées

L'étude a pour terrain d'expérimentation le secteur dunaire situé au nord du village d'Oursi, dans la province de l'Oudalan au nord du Burkina Faso. Cette région, située entre les latitudes 14° 40' et 14° 50' N et les longitudes 0° 60' et 0° 40' O, appartient au domaine sahélien et le total des pluies y est d'environ 350 mm/an. Le paysage d'Oursi (fig. 10) est composé du nord au sud d'une succession de cordons dunaires séparés par de larges plaines interdunaires où localement des formations cuirassées affleurent. Le réseau hydrographique de nature intermittent draine les eaux du sud vers le nord. Au sud du cordon le plus méridional s'échelonnent, d'est en ouest, un chapelet de mares sub-pérennes, dont la plus importante est la mare d'Oursi. Cette région est avant tout à vocation pastorale, quelques villages sont implantés sur le cordon méridional à proximité des mares. Des conditions climatiques défavorables conjuguées à une forte pression anthropique, surtout à proximité des villages, se sont traduites sur ce petit espace par une dégradation du couvert végétal de type steppe arborée et arbustive. Cette dégradation s'accompagne d'une différenciation des modes d'organisation spatiale des ligneux entre et au sein des mêmes unités topo-édaphiques.

Quatre types d'organisation spatiale ou de texture des aires de ligneux ont été distingués sur l'image SPOT (fig. 9).

- Sur les cordons dunaires, la végétation ligneuse s'organise en bosquets arborés et arbustifs dans les creux intradunaires ou sur les flancs des ondulations dunaires. Ces bosquets apparaissent sur l'image satellitaire sous la forme de petites taches subcirculaires (cette texture est notée BD).

- Dans les plaines interdunaires, les sols cuirassés sont colonisés par la brousse tigrée. Cette formation végétale s'organise en bandes successives de végétation dense et de sol dénudé. Actuellement, les mécanismes de sa genèse sont encore mal connus, mais la largeur relative des bandes est un bon indicateur de l'adaptation de cette formation végétale aux conditions climatiques : un élargissement des bandes nues reflète une baisse de la pluviométrie et inversement (Ambouta, 1984). On distingue différents faciès de brousse tigrée en fonction de leur texture sur l'image satellitaire : la brousse tigrée à bandes (que l'on note TB), la brousse tigrée à lanières (TL), la brousse tigrée mouchetée (TM), la brousse tigrée piquetée (TP), ce dernier faciès comporte les fourrés les plus petits.

- Dans les plaines interdunaires encore, les accumulations sableuses sont occupées par une steppe arborée et arbustive sans organisation spatiale spécifique (SI). Sa répartition est souvent liée à la microtopographie des plaines interdunaires. Certains alignements de ligneux d'orientation E-O se sont constitués sur des chenaux d'écoulement temporaire.

- Répartis sur l'ensemble du secteur, des agrégats de ligneux de forme linéaire (AC) occupent les chenaux d'écoulement temporaire qui traversent toutes les unités

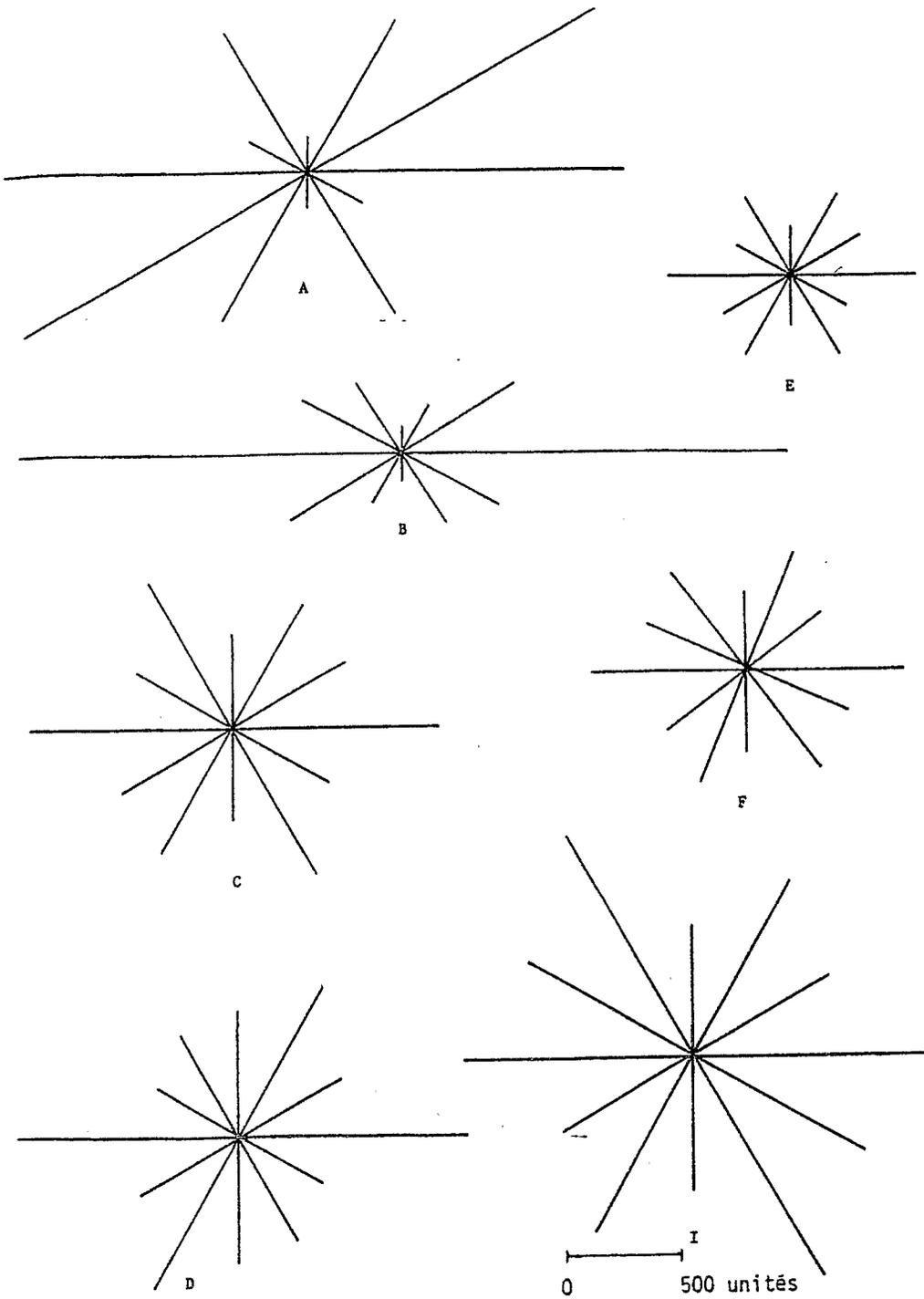


Figure 8. Roses des directions calculées sur les squelettes des cordons dunaires

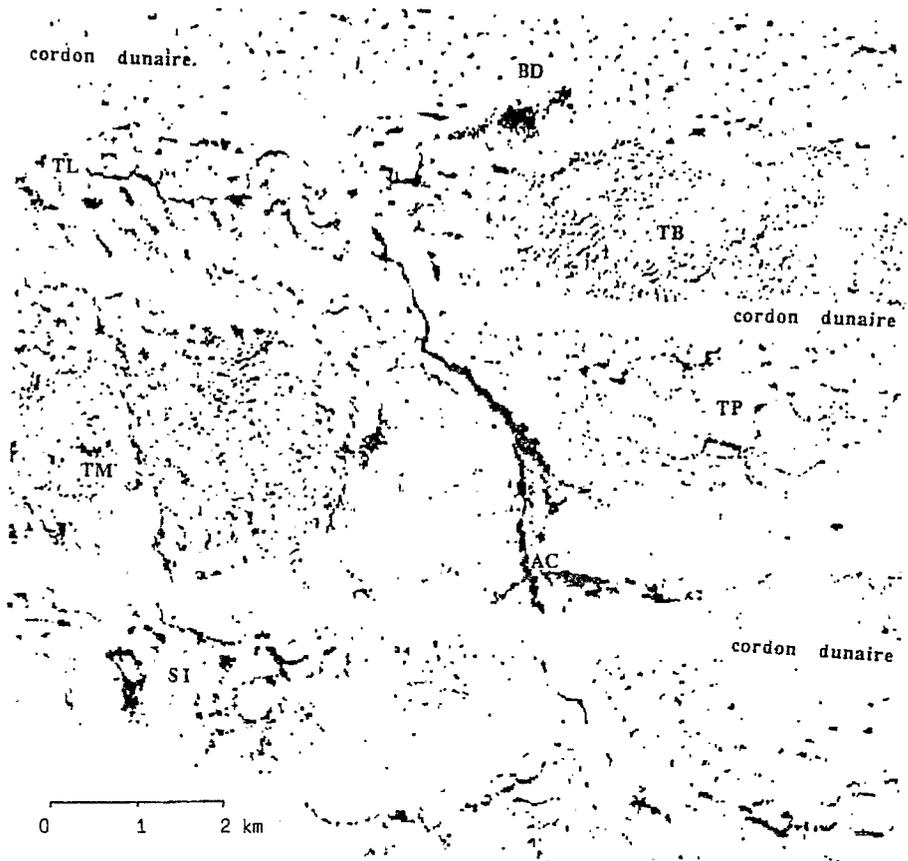


Figure 9. Les textures végétales sur l'image de la classe «végétation ligneuse» (BD: bosquets sur cordons dunaires, TB: brousse tigrée à bandes, TL: brousse tigrée à lanières, TM: brousse tigrée mouchetée, TP: brousse tigrée piquetée, SI: steppe des espaces interdunaires, AC: agrégats sur chenaux d'écoulement temporaire)

topographiques, selon une orientation sud-nord. Dans l'espace interdunaire situé au nord du premier cordon, des petits bois plus ou moins épais de formes variées (AM) se sont développés sur des mares temporaires.

3.2 Identification des aires de ligneux et caractérisation de leur organisation spatiale à l'aide de paramètres morphologiques

Pour analyser la répartition spatiale des ligneux sur l'image SPOT, nous avons choisi d'utiliser une image de saison sèche du 17/12/86 où les ligneux encore en activité chlorophyllienne se discriminent bien spectralement des herbacées sèches.

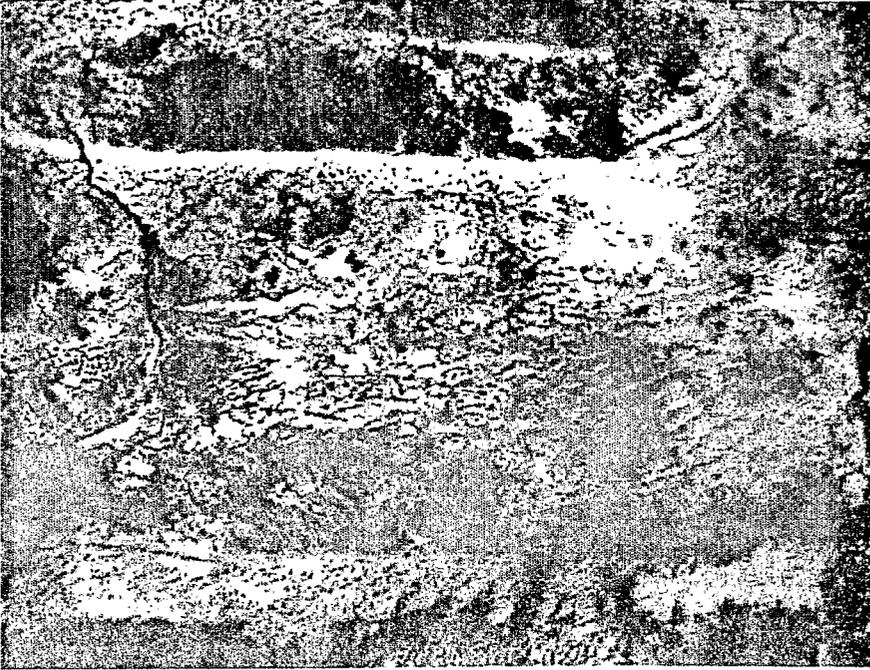


Figure 10. Reproduction monochrome d'une composition colorée extraite de l'image SPOT du 17/12/86

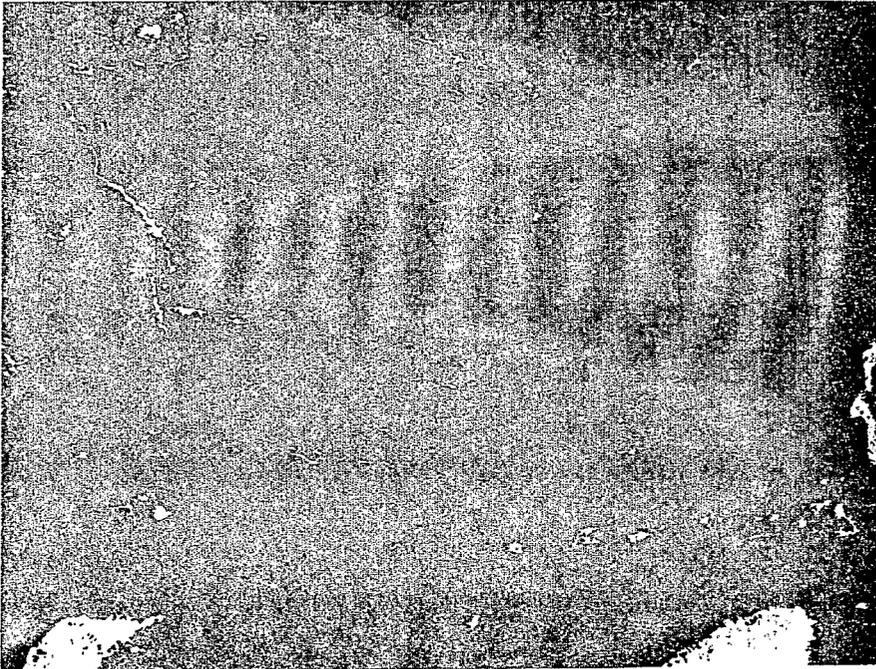


Figure 11. La classe «végétation ligneuse»

L'identification des aires de ligneux est obtenue à l'aide d'une classification multispectrale non-dirigée. La méthode de classification non dirigée utilisée ici consiste, à partir d'une population-échantillon extraite de l'image, à effectuer des partitions en un nombre croissant de classes selon la méthode de classification automatique dite des centres mobiles. La partition optimale en n classes, discriminant au mieux les aires de ligneux, est déterminée d'après les critères d'inertie (calcul de la plus grande variance interclasse et de la plus petite variance intraclasse sur plusieurs essais) et de stabilité des centres de gravité des classes. Cette partition optimale est ensuite extrapolée à l'ensemble de l'image, en calculant la distance euclidienne entre chaque élément (pixel) et le centre de gravité de chaque classe précédemment obtenue. Chaque pixel est affecté au centre le plus «proche» (Mering et Jacqueminet, 1988b). L'image classée est ensuite binarisée; nous ne conservons que les pixels classés en végétation ligneuse (fig. 11). La classification est validée en superposant à la même échelle sur des aires-test des portions de l'image classée et binarisée avec des photographies aériennes numérisées sur lesquelles les pixels correspondant à la végétation ligneuse ont été extraits.

L'image classée et binarisée est ensuite subdivisée en quadrats jointifs de 85 par 85 pixels. Cette taille de fenêtre préserve une bonne homogénéité des textures, eu égard à la surface des unités géomorphologiques. Pour chaque quadrat, la taille des entités de pixels connexes correspondant aux agrégats de ligneux est estimée statistiquement à l'aide de la granulométrie par ouverture et leur dispersion à l'aide de la covariance .

La granulométrie par ouverture consiste à transformer l'image par ouvertures successives à l'aide d'un élément structurant convexe - ici un hexagone - de taille croissante. À chaque opération, les particules de pixels connexes, de taille inférieure à celle de l'élément structurant, sont éliminées à la manière d'un tamisage dont la taille des mailles croît. La distribution de la taille en surface $G(n)$ et la distribution de la taille en nombre $F(n)$ des unités de ligneux de chaque quadrat sont évaluées en comptabilisant le nombre de pixels et le nombre de particules éliminées à chaque ouverture. Le calcul de la densité granulométrique en surface $g(n)$ et de la densité granulométrique en nombre $f(n)$ nous permet d'évaluer également la proportion en surface ou en nombre de particules du quadrat éliminées entre deux ouvertures successives de rayon respectif n et $n+1$ (fig. 12).

Le calcul de la covariance consiste à transformer l'image par érosions successives à l'aide d'un bipoint d'espacement croissant et d'orientation donnée. À chaque opération, la surface de l'ensemble ainsi transformée est rapportée à celle d'un masque ou fenêtre de référence subissant les mêmes transformations. Le résultat du calcul de la covariance est décrit à l'aide d'un covariogramme. La courbe du covariogramme traduit l'état de dispersion des particules du quadrat dans la direction étudiée (dans cette étude, la covariance a été calculée dans la direction horizontale).

La valeur à l'origine du covariogramme est d'autant plus élevée que la surface de l'échantillon est grande. Cette valeur permet de mesurer le taux de recouvrement du couvert ligneux de chaque échantillon. Sur la figure 13, la valeur à l'origine de la courbe de la brousse tigrée mouchetée, plus élevée par rapport à celles des autres covariogrammes, met en évidence un taux de recouvrement plus élevé au sein de ce quadrat.

La pente du covariogramme est d'autant plus forte que la structure est fine pour une même surface relative. La pente forte de la courbe de la brousse tigrée à bandes (fig. 13) souligne le fractionnement plus important de cette texture par opposition au covariogramme de la brousse tigrée à lanières dont la pente est plus douce.

Des oscillations régulières du covariogramme traduisent l'existence d'une périodicité dans la texture étudiée. La hauteur et l'amplitude des oscillations indiquent respectivement le diamètre moyen des particules et la distance moyenne qui les sépare dans la direction étudiée.

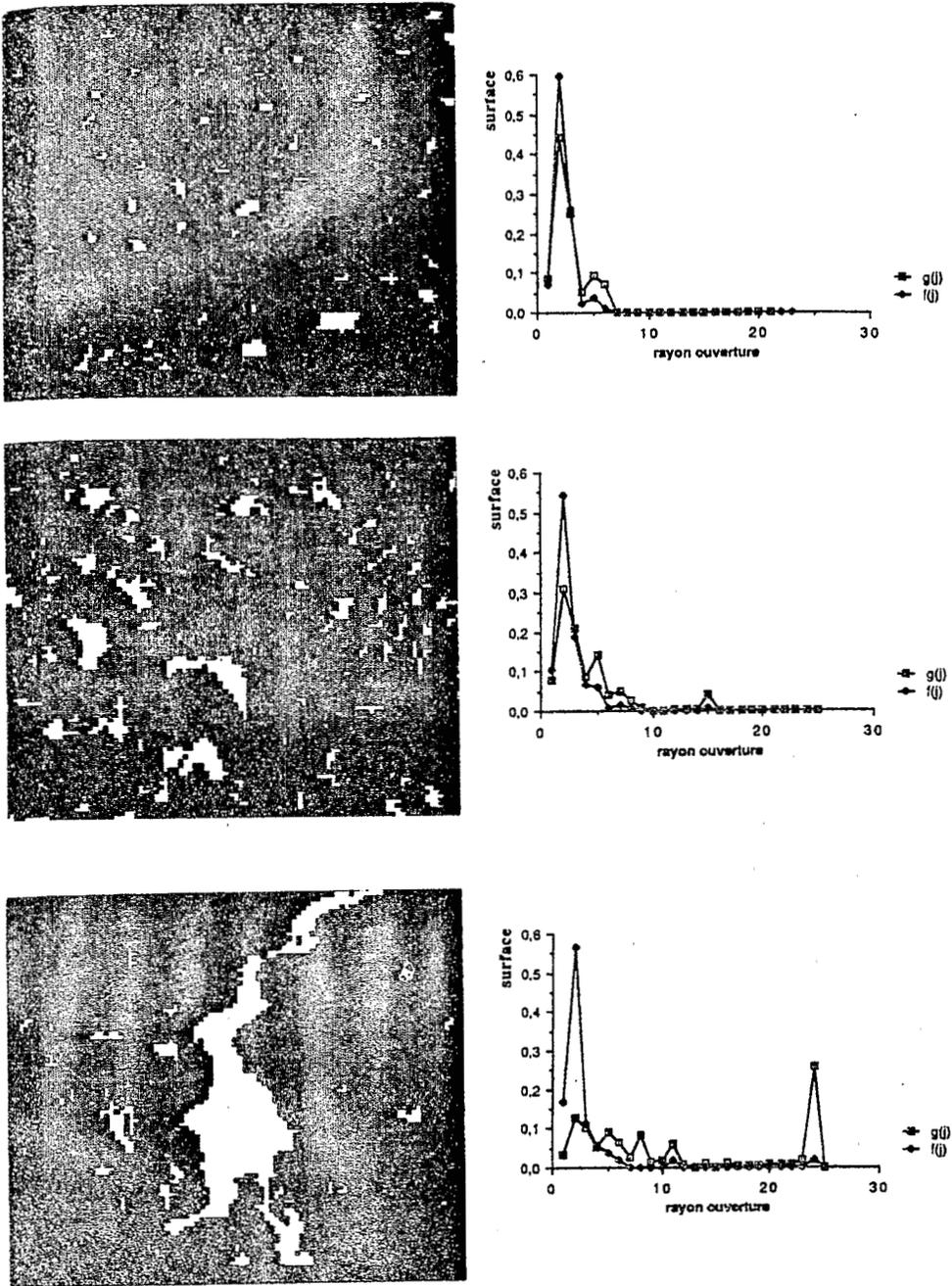


Figure 12. Les courbes de densité granulométrique en surface $g(n)$ et de densité granulométrique en nombre $f(n)$ calculées sur trois quadrats (en haut : bosquets sur cordon dunaire; au centre : brousse tigrée mouchetée; en bas : agrégats sur chenal d'écoulement temporaire)

Les ondulations de faible hauteur et de faible amplitude du covariogramme de la brousse tigrée à bandes indiquent une texture composée de petits éléments peu espacés, à l'inverse de la courbe aux larges et hautes ondulations de la brousse tigrée à lanières composée de grosses entités largement espacées (fig. 13).

3.3 Analyse statistique des quadrats du couvert ligneux décrits par les paramètres morphologiques

L'analyse statistique des quadrats décrits par les indices texturaux est effectuée à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances (AFC). Ces quadrats, au nombre de 78, correspondent aux quatre types de couvert ligneux décrits plus haut : bosquets dunaires (BD), brousse tigrée (TB, TL, TM, TP), steppe des espaces interdunaires (SI), agrégats d'arbres et arbustes sur les chenaux d'écoulement temporaire (AC) et sur mares temporaires (AM).

L'analyse granulométrique apporte une première typologie des textures précédemment décrites. Nous avons procédé à l'analyse factorielle des correspondances du tableau croisé des 78 quadrats et des 25 variables correspondant chacune à la valeur des indices granulométriques $G(i)$, $g(i)$, $F(i)$, $f(i)$ pour un rayon d'ouverture i ($i = 1, 2, \dots, 25$).

Les mesures granulométriques en surface (fig. 14) permettent de distinguer trois classes de taille de particules au sein des quadrats.

1) Les quadrats des agrégats de ligneux sur aires de ramifications des chenaux d'écoulement temporaire et sur mares, caractérisés par la présence d'une très grosse particule ou par une hétérogénéité des tailles de grains: ils contiennent à la fois une ou deux grosses particules et des petites particules. On relève des pics dans les distributions aux rayons d'ouverture 2, 5, 8, 11 et 12, 19 et 24 que l'on peut considérer comme des tailles-modales de particules.

2) Les quadrats de brousse tigrée à lanières et de brousse tigrée mouchetée composés de gros fourrés épars et des quadrats d'agrégats sur chenaux d'écoulement temporaire de forme plus linéaire et sur mares de taille inférieure à la précédente catégorie; ces quadrats se composent de particules de taille moyenne contenant des pics pour les rayons d'ouverture 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12 et 15. Des quadrats de bosquets sur cordon dunaire contenant une grosse particule sont joints à cette classe.

3) Enfin, la grande majorité des quadrats dont la courbe de densité granulométrique en surface se compose de 1 ou 2 pics, correspondant de manière générale aux rayons d'ouverture 2 et 5 ou 6 ou plus rarement 9 ou 10; il s'agit des quadrats de brousse tigrée à texture fine, de bosquets sur cordon dunaire et de steppe des plaines interdunaires sableuses.

L'AFC effectuée à partir du tableau croisé des 78 quadrats et des variables de la distribution de la taille en surface est illustré sur la figure 14. Cette analyse se caractérise par la présence d'un effet Guttman : les deux premiers facteurs expliquent 90% de l'inertie totale du nuage, la suite des variables $G(j)$ s'ordonne parfaitement de l'indice 1 à l'indice 25 le long d'une parabole, sur laquelle les quadrats sont répartis en fonction de la taille de leurs particules. Sur la partie droite de la parabole, les quadrats de bosquets sur cordon dunaire (BD) et de brousse tigrée à bandes (TB) s'opposent aux quadrats d'agrégats sur chenaux d'écoulement temporaire (AC) et sur mares (AM), à l'autre extrémité de la parabole.

Par contre, l'AFC effectuée à partir de l'analyse granulométrique en nombre met surtout en évidence la forte proportion de particules de taille 1 et 2. En effet, le petit nombre relatif de particules convexes de grande surface à l'intérieur de l'ensemble des quadrats influencent peu les mesures. Cette analyse distingue deux types de quadrats : les quadrats ayant une forte proportion de particules de taille 1 et 2 et les quadrats en contenant peu. Ce critère ne permet

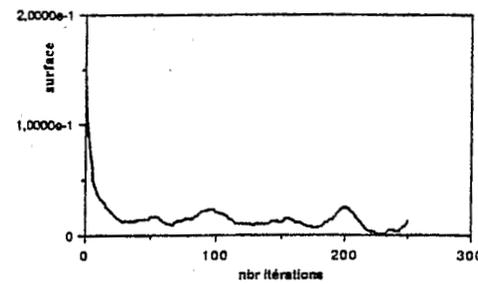
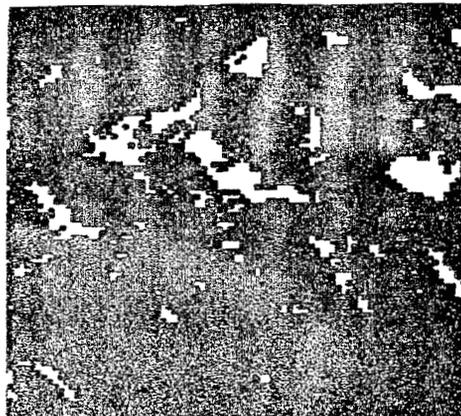
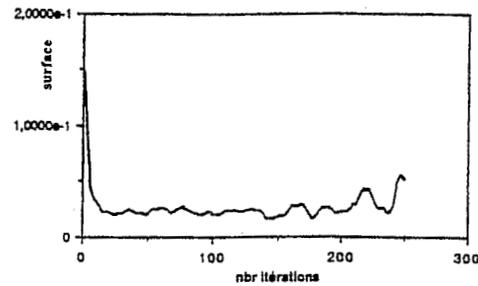
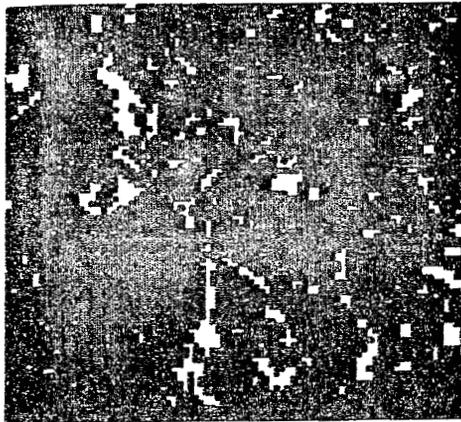
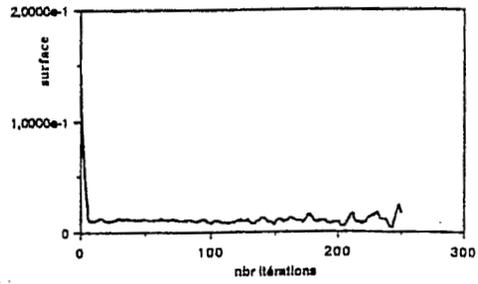
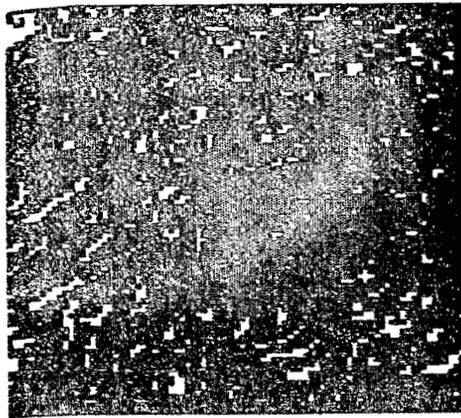
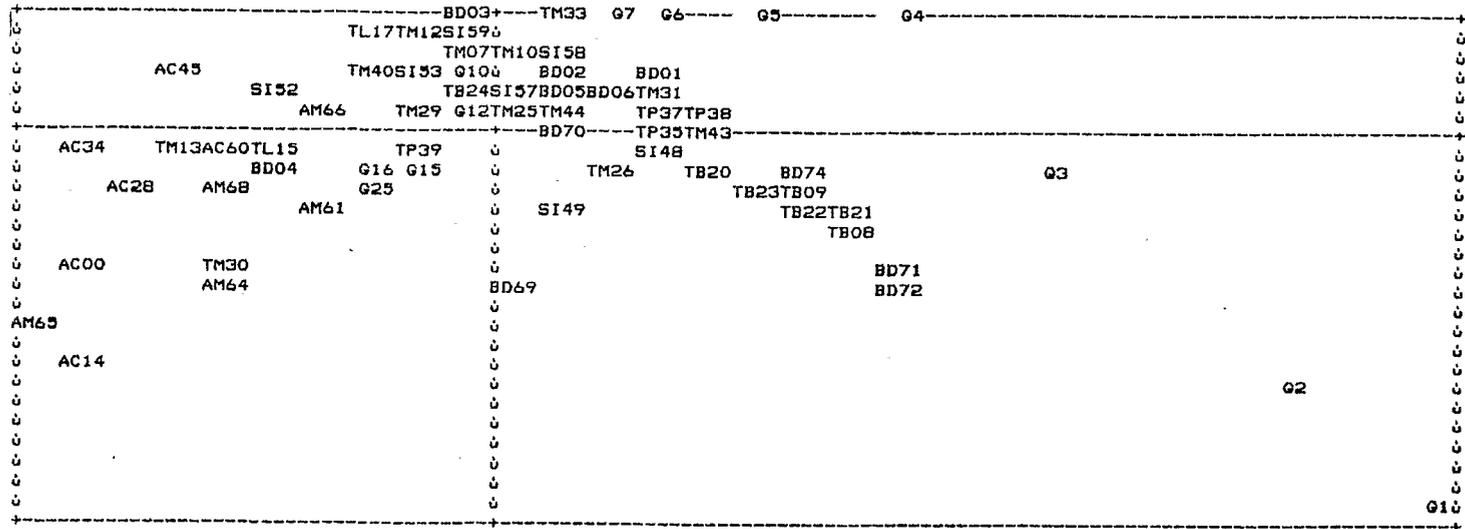


Figure 13. Les covariogrammes calculés sur trois quadrats de brousse tigrée de texture différente (en haut : brousse tigrée à bandes; au centre : brousse tigrée mouchetée; en bas : brousse tigrée à lanières)

1 AXE HORIZONTAL (1)--AXE VERTICAL (2)--TITRE: distribution de taille en surface sur Oursi

NOMBRE DE POINTS : 101



NOMBRE DE POINTS SUPERPOSES : 34

TL19(TM12)	SI62(TL17)	TM11(TM07)	TL18(TM07)	TP47(TM10)	SI56(TM10)	SI63(SI58)	G8(TM10)	G9(TM10)	TP36(BD02)
TM41(BD02)	TM42(BD02)	TM32(BD06)	SI51(BD05)	AM67(TB24)	SI54(TP38)	SI55(TP38)	TP46(TP35)	TL16(TL15)	TM27(TL15)
BD75(AC60)	BD76(TL15)	G13(TP39)	G14(TP39)	G17(G16)	G18(G16)	G19(G16)	G20(G16)	G21(G16)	G22(G16)
G23(G16)	G24(G16)	BD77(TB21)	BD73(TB08)						

Figure 14. Nuage des individus dans le premier plan de l'AFC du tableau croisé des 78 quadrats et des variables issues du calcul de la distribution de taille en surface

pas de caractériser des textures, mais fait apparaître certaines nuances au sein des quadrats appartenant à une même texture. On distingue ainsi les quadrats de bosquets du cordon dunaire méridional contenant beaucoup de particules de taille 1 et 2, des quadrats de bosquets plus épais du cordon septentrional. En effet, la végétation du cordon septentrional subit une exploitation de l'homme moins forte que celle du cordon méridional situé à proximité des mares et des lieux d'habitation. Parmi les différents types de brousse tigrée distingués au début, les quadrats de brousse tigrée à bandes, de brousse tigrée piquetée, et des quadrats appartenant à une aire de brousse tigrée mouchetée composée de petits fourrés s'opposent aux quadrats de brousse tigrée mouchetée et de brousse tigrée à lanières caractérisés par une faible proportion de particules de taille 1 et 2.

Les analyses de distribution de la taille et de la densité granulométrique sont complémentaires. La première est une distribution croissante et offre une bonne graduation des quadrats en fonction de la finesse de leur texture. La seconde permet de mieux caractériser chaque quadrat en mettant en évidence des seuils dans la variation de taille des particules des quadrats pour les rayons d'ouverture supérieurs aux trois premiers (les deux tiers des quadrats ont une distribution s'étalant sur les cinq premiers rayons d'ouverture). De manière générale, les analyses de densité granulométrique font ressortir certains seuils du rayon des particules caractéristiques d'un sous-ensemble de quadrats (Jacqueminet et Mering, 1989).

Les mesures granulométriques nous offrent une première caractérisation de la texture. L'analyse statistique des covariogrammes, non effectuée à ce jour, nous permettra de l'approfondir.

4 Conclusion

L'utilisation conjointe de l'information spectrale et de l'information texturale et morphologique des images satellitaires, nous a permis de déterminer deux indicateurs de changements des états de surface en milieu sahélien. On pourrait en déterminer d'autres. Les méthodes de caractérisation de ces indicateurs sur images au moyen de paramètres quantitatifs, de nature reproductibles, fournissent des informations quantifiées et localisées sur l'état des milieux sahéliens. Leur utilisation permet de suivre ainsi l'évolution spatiale et temporelle des transformations des milieux sur l'ensemble du Sahel.

5 Références

- AMBOUTA, K., 1984. Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'Ouest nigérien. —Thèse de docteur-ingénieur, Nancy, 116 p.
- COSTER, M. et J.-L. CHERMANT, 1985. Précis d'analyse d'images. —Éditions du Centre national de la recherche scientifique, Paris, 521 p.
- COUREL, M.-F., 1984. Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. —Thèse de doctorat d'État, Paris I, 407 p.
- GIRARD, M.-C. et C.-M. GIRARD, 1989. Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. —Collection Sciences agronomiques, Masson, Paris, 260 p.
- JACQUEMINET, C., 1986. Analyse et mesures des orientations de dunes de forme linéaire. —Mémoire de DEA «Géographie et pratique du développement», École des hautes études en sciences sociales, ORSTOM Télédétection Bondy, Paris, 49 p.

- JACQUEMINET, C. et C. MERING, 1989. Caractérisation de l'organisation spatiale du couvert ligneux sur images SPOT à l'aide de paramètres quantitatifs. —Table ronde CNRS-CEGET «Apports de la télédétection spatiale à l'étude des paysages et des systèmes agraires tropicaux», 25-27 octobre 1989, Talence.
- MERING, C. et C. JACQUEMINET, 1988a. An approach of quantitative description of sand-hills shapes in the west african Sahel from remote sensing imagery. —7^e Congrès de stéréologie de Caen, septembre 1987, Acta Stereologica, Ljubliana, 6/III, p. 951-956.
- MERING, C. et C. JACQUEMINET, 1988b. Use of SPOT satellite images for inventory and follow-up of ligneous resources in the Sahel. —22th ERIM symposium on remote sensing of environment, october 20-26, 1988, Abidjan, 15 p.
- ROBINSON, G.-S., 1976. Detection and coding of edge using directional masks. —University of Southern California, Image processing institute, report n° 660.
- SERRA, J., 1982. Image analysis and mathematical morphology. —Academic Press, London, 610 p.