

Article écrit pour les actes du 22ème symposium de télédétection de  
l'E.R.I.M. du 20 au 26 octobre 1988 à Abidjan en Côte d'Ivoire

**L'UTILISATION DES IMAGES SATELLITAIRES SPOT POUR  
L'INVENTAIRE ET LE SUIVI DES RESSOURCES LIGNEUSES AU  
SAHEL**

Catherine Mering  
Christine Jacqueminet

O.R.S.T.O.M  
Unité de télédétection, L.I.A.  
70-74, route d'Aulnay  
93140 Bondy, France

**RESUME**

Dans cette étude, nous utilisons la résolution spatiale des images SPOT pour évaluer la couverture végétale ligneuse des aires de pâturages en milieu Sahélien et caractériser quantitativement ses différentes formes d'organisation dans l'espace. La méthode a été expérimentée sur la région d'Oursi, au Nord du Burkina Faso.

La végétation Sahélienne se caractérise par sa texture discontinue : sur l'aire d'Oursi, elle s'organise en bosquets isolés sur les édifices dunaires et en bandes dans les espaces interdunaires. Ces bosquets et ces bandes apparaissent sur les images SPOT sous la forme de taches subcirculaires et de bandes sombres de taille, d'orientation et d'espacement variables. Les variations du couvert ligneux sont perceptibles par le biais des changements des formes de ces taches et de ces bandes.

Pour traiter l'image satellitaire, nous utilisons différentes techniques telles que la classification automatique sur critères spectraux et les transformations morphologiques ensemblistes sur image binaire.

Sur l'image préalablement classée, nous évaluons la surface couverte en ligneux et nous caractérisons l'organisation spatiale des taches et des bandes à l'aide de paramètres morphologiques tels que la distribution de la taille et leur répartition relative par rapport aux espaces découverts. Nous obtenons ainsi des descripteurs quantitatifs de la texture pouvant servir à comparer les différents types de couvert ligneux.

Cette méthode utilisant des techniques entièrement reproductibles peut aussi être utilisée pour l'évaluation des ressources en ligneux d'autres pâturages du Sahel.

**1. Présentation de l'aire d'étude et problématique :**

La région d'Oursi se situe au Nord du Burkina Faso<sup>(1)</sup> en milieu semi-aride<sup>(2)</sup> (cf. figure A). Sur cette vaste pénéplaine, se sont déposés de longs cordons dunaires orientés E-W, séparés par de larges plaines interdunaires, recouvertes de dépôts sableux éoliens, où des surfaces cuirassées affleurent localement. Lors de leur mise en place, les cordons ont accentué l'endoréisme<sup>(3)</sup> en oblitérant le réseau hydrographique. Ils sont à l'origine des nombreuses mares permanentes ou semi-permanentes situées au Sud du système dunaire. La végétation de type *steppe arborée*, comprend une strate arbustive lâche dont les principales espèces sont : *Balanites aegyptiaca*, *Combretum glutinosum*, *Pterocarpus luscens*, *Guiera*

Fonds Documentaire IRD



010025329

Fonds Documentaire IRD

Cote : B x 25329 Ex : unique



*senegalensis* et une strate herbacée composée principalement d'espèces annuelles à cycle court (*Cenchrus biflorus*, *Schoenfeldia gracilis*, *Aristida mutabilis*). La densité des herbes, arbres et arbustes est très variable, d'une façon générale, elle est plus forte dans les secteurs éloignés des mares et des villages.

La population d'Oursi comprend des sédentaires installés dans les villages près de la mare permanente d'Oursi, pratiquant la culture du mil sur les sols sableux et des nomades dont les campements se regroupent autour des mares subpérennes. Suite aux grandes sécheresses qui se sont succédées depuis 1973, les populations nomades ont tendance à se sédentariser, contribuant ainsi à accroître les surfaces cultivées et à augmenter le pâturage des terrains proches de la mare d'Oursi [BARRAL 77].

Notre problématique consiste à faire un diagnostic du milieu Sahélien et à suivre son évolution, par le biais de la quantification des superficies couvertes en ligneux et des variations de leurs formes. Nous ne considérons que la végétation ligneuse car la couverture herbacée variant d'une année sur l'autre en fonction de l'importance des pluies et de leur répartition, ne peut être un bon indicateur à moyen terme de la dynamique du milieu.

L'évolution de la couverture ligneuse au Sahel peut être caractérisée entre autre, par la contraction des groupements d'arbres et d'arbustes. Cette contraction résulte de l'inégale résistance de certaines espèces vis à vis d'une sécheresse accentuée et d'une pression humaine croissante, elle s'opère différemment selon les conditions topographiques des milieux considérés [COUREL 84].

Le paysage d'Oursi rassemble une grande variété des formes du couvert ligneux que l'on peut rencontrer dans le reste du Sahel: l'alternance de deux milieux, cordons dunaires et plaines interdunaires, aux caractéristiques topographiques, pédologiques et hydriques différentes, entraîne la présence de plusieurs modes de contraction de la végétation:

- sur les cordons dunaires, les ligneux se concentrent en *bosquets* dans les creux intradunaires,

- dans les plaines interdunaires,

- la végétation ligneuse s'organise soit en grandes *bandes* légèrement sinueuses dont l'orientation est parallèle ou perpendiculaire à celle des cordons,

- soit en *brousse tigrée* (alternance régulière de bandes boisées et de bandes nues ayant vu du dessus l'aspect d'une peau de tigre).

Pour discriminer la végétation ligneuse de la végétation herbacée, nous avons choisi une image de saison sèche (17/12/86), période à laquelle la végétation herbacée, à l'état sec, n'a pas les mêmes caractéristiques spectrales que la végétation ligneuse encore chlorophyllienne.

Sur chacune des images correspondant aux trois bandes spectrales, les différentes organisations végétales précédemment décrites, apparaissent sous forme de taches subcirculaires et de bandes sombres de taille et d'espacement variables (cf figure B).

## 2. Délimitations des aires de ligneux :

Pour délimiter les aires de ligneux nous avons partitionné l'image en classant les pixels en fonction d'une taxonomie préétablie des principaux composants du paysage, basée sur notre connaissance du terrain et sur l'examen des photographies aériennes et de la composition colorée (cf. figure B). Quatre taxons ont été déterminés:

- la végétation ligneuse
- les sols sombres
- les sols clairs
- l'eau

Les descripteurs ayant servi à la classification sont les trois bandes spectrales de SPOT d'une part et l'indice de végétation verte calculée à partir des bandes spectrales rouge et proche infra-rouge à l'aide de la formule suivante :

$$IVGV = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2}$$

On a ajouté à ces descripteurs la première composante issue d'une analyse en composantes principales des trois bandes spectrales.

Cette classification est réalisée à l'aide d'une démarche supervisée: à partir des zones d'entraînement représentatives des taxons, nous avons cherché à déterminer la signature propre de chaque taxon, en mettant en évidence à partir des variables descriptives, des *segments* (4) caractéristiques des classes.

Pour cela, nous avons utilisé une *méthode de discrimination non paramétrique* [CELEUX 82] qui opère la segmentation des variables quantitatives qui discrimine au mieux les classes déterminées a priori.

## 2.1 Principes de la méthode de discrimination :

Il s'agit d'une méthode probabiliste permettant de partitionner l'ensemble des pixels de la scène en les affectant à l'une des classes déterminées a priori. Nous supposons que les classes a priori sont disjointes et qu'elles constituent une partition de la scène.

La méthode de base repose sur une discrimination en deux classes d'une variable quantitative. On la généralise aisément à une méthode à plusieurs classes et plusieurs variables.

On appelle X la variable descriptive que l'on considère dans notre modèle comme une variable aléatoire décrivant la population totale comme séparée en deux classes W1 et W2.

On appelle F1 et F2 les fonctions de répartition correspondantes à W1 et W2.

L'utilisateur dispose d'un échantillon  $(x_1, \dots, x_N)$ , correspondant à l'échantillon des zones test. Cet échantillon est considéré dans le modèle comme une réalisation de la variable X.

La méthode consiste à déterminer le seuil de discrimination "C" entre W1 et W2 en minimisant *le risque de Bayes* c'est à dire en minimisant le risque de mal classer un nouveau pixel  $x_{N+1}$ .

On démontre que minimiser le risque de Bayes revient à maximiser la distance  $D(c)$  de Kolmogorov-Smirnov entre les deux distributions .

$$D(c) = \sup_z |f_1(z) - f_2(z)| = f_1(c) - f_2(c)$$

où f1 et f2 sont les fonctions de répartition empiriques de W1 et W2.

On généralise la procédure de base au cas de plusieurs variables en effectuant la première coupure sur la variable qui fournit la plus grande distance de Kolmogorov-Smirnov .

Dans le cas où plusieurs variables doivent servir à discriminer les deux classes, une seule itération ne suffira pas, en général, à obtenir les deux classes recherchées puisqu'elle s'effectuera sur une variable seulement. Aussi, après avoir découpé l'échantillon en deux sous-échantillons appelés *segments* lors de la première itération, on réitérera la procédure pour chaque segment.

Si l'un des deux segments satisfait au test d'arrêt, il devient *segment terminal* . Sinon, on applique l'ensemble de la procédure à ce segment.

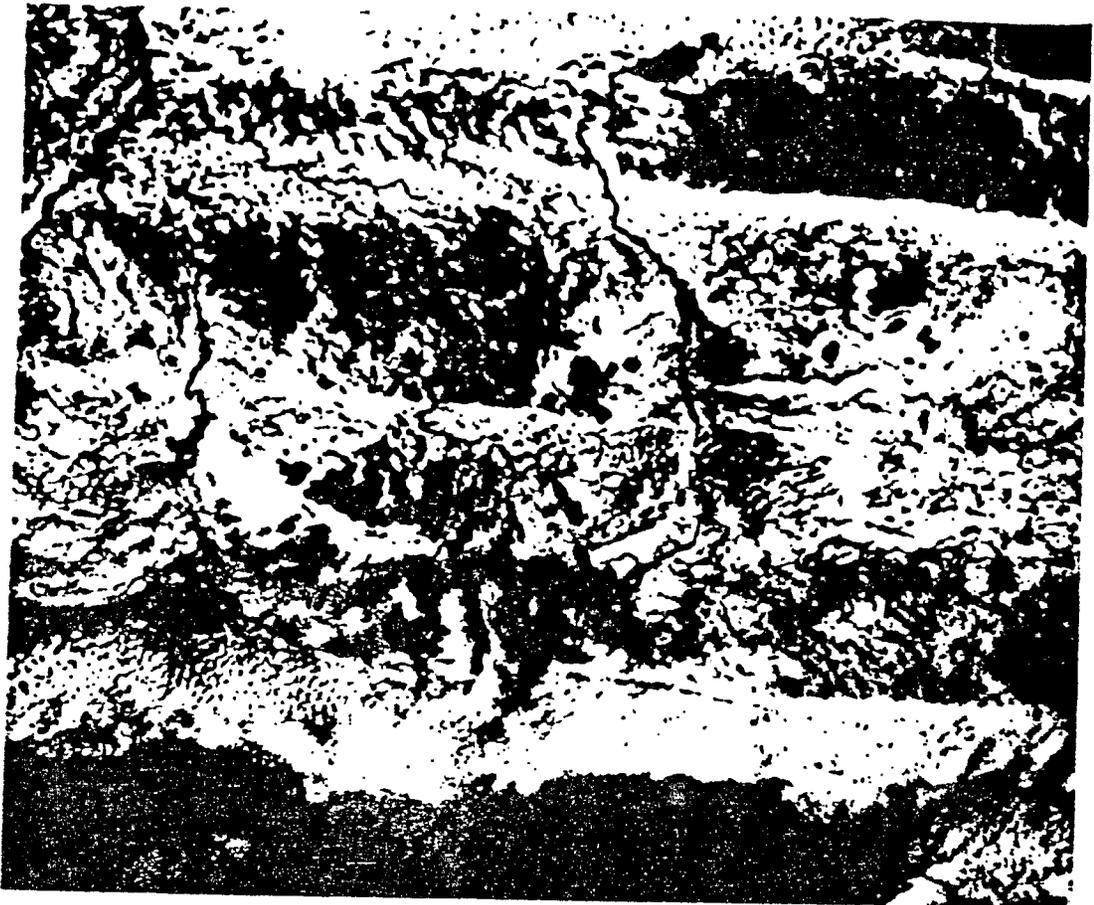


Figure B : Composition colorée extraite de l'image SPOT du 17/12/86

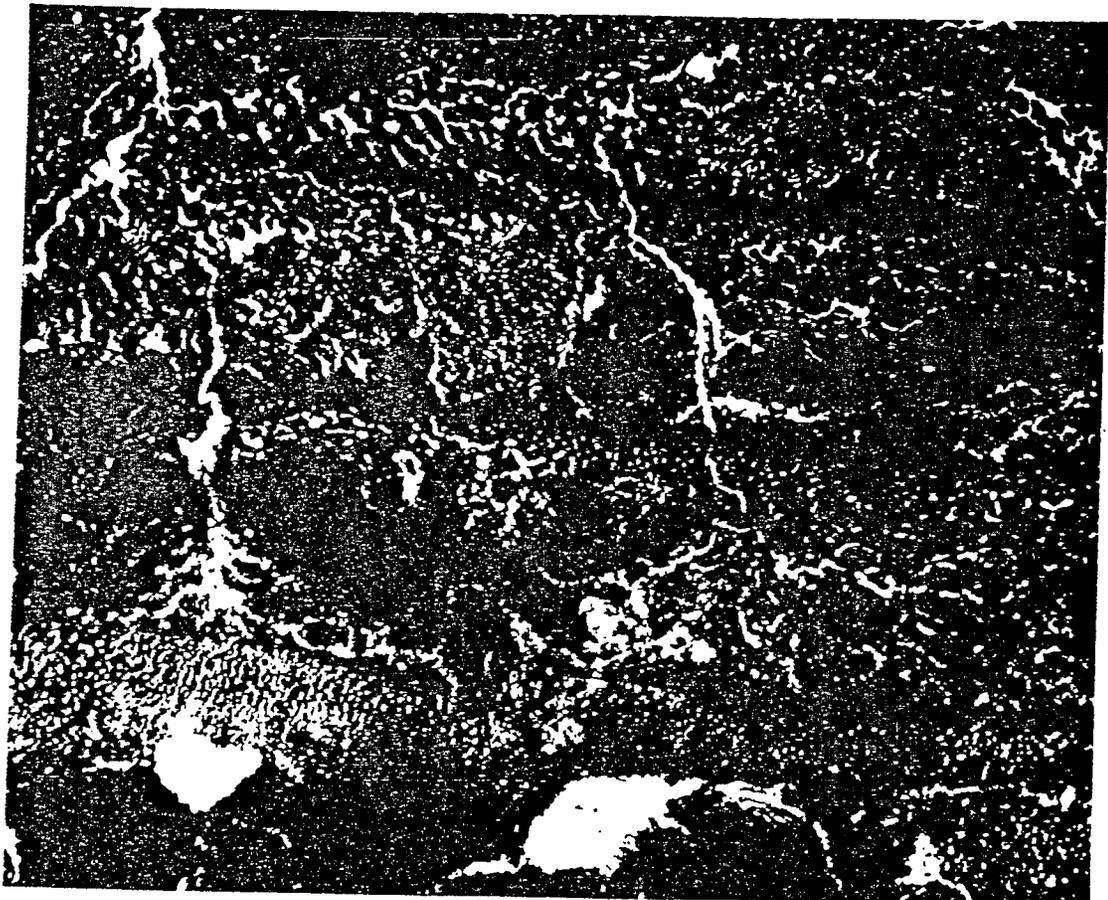


Figure D : la classe "végétation"

Une extension de la procédure à des problèmes à K classes consiste à les considérer comme une succession de problèmes à deux classes pour laquelle on désire obtenir un arbre de décision unique.

Soit A l'ensemble des partitions en deux classes de l'ensemble W.

Dans ce cas, la classe A choisie est la réunion des classes a priori qui maximise D(C).

Si l'on traite plusieurs variables, on cherchera la classe A pour chaque variable puis on choisira la coupure  $c_j^*$  par la procédure décrite au paragraphe précédent.

Le test d'arrêt est déterminé de la façon suivante: le cardinal de chaque classe dans les segments doit être assez grand pour permettre une évaluation raisonnable du rapport des densités qui est estimé par le rapport des effectifs de chacune des classes dans le segment. Ainsi le partitionnement s'arrêtera chaque fois que le partitionnement suivant n'assurera pas des échantillons de taille minimale pour chaque classe dans chaque segment. *L'utilisateur doit donc fixer l'effectif minimal de la classe majoritaire et de la classe minoritaire dans le segment ainsi que l'effectif minimal d'un segment quelconque pour continuer la partition.*

## 2.2 Résultats de la discrimination :

L'analyse discriminante opérée sur les zones d'entraînement, met en évidence cinq segments terminaux dont les effectifs coïncident presque avec ceux des classes a priori, comme le montre le tableau suivant (cf. figure C):

nS	S	C	PS(%)	PC(%)
1	XS1 < 48	eau	100	100
2	XS1 > 48 ACPI < 101	sols clairs végétation	99,24 2,92	97,39 2,61
3	XS1 > 48 ACPI > 101 IVGV > 132	végétation sols sombres	92,50 0,96	98,23 1,33
4	XS1 > 48 101 < ACPI < 115 IVGV < 132	sols sombres végétation	14,10 4,17	80,00 18,18
5	XS1 > 48 ACPI > 115 IVGV < 132	sols sombres végétation	84,94 0,42	99,62 0,38

Figure C : tableau récapitulatif des segments terminaux

(nS : numéro du segment, S : définition du segment, C : taxon, PS : pourcentage des pixels de la classe appartenant au segment, PC : pourcentage des pixels du segment appartenant à la classe)

## 2.3 Classification et validation :

On classe les pixels de l'image en leur appliquant les segments terminaux issus de l'analyse précédente. Chaque pixel est affecté à la classe majoritaire du segment correspondant. On valide la classification ainsi effectuée au moyen de *parcelles de contrôle* (5) : pour chaque parcelle, on dénombre le nombre de pixels bien classés. Ce

critère a été retenu pour déterminer la meilleure classification résultante après plusieurs essais de segmentation. C'est ainsi que la segmentation exposée dans le paragraphe précédent a été choisie.

La délimitation des aires de ligneux est obtenue en sélectionnant les pixels classés en végétation. Le résultat est traduit sous la forme d'une image binaire (cf. figure D).

### 3. Mesures de la surface et des formes d'organisation spatiale des aires de ligneux :

Pour effectuer les mesures à partir de l'image, on utilise les méthodes de la Morphologie Mathématique qui mettent en oeuvre des transformations sur des ensembles euclidiens (l'ensemble correspondant à une forme sur un fond) [SERRA 82].

La forme résultante de la binarisation effectuée précédemment et correspondant à la classe "végétation" est ici assimilée à un ensemble unique que l'on notera X dans la suite de l'exposé.

Les mesures de la surface ont été effectuées globalement sur l'ensemble de la portion d'image analysée.

Les mesures de texture ont été faites sur des quadrats d'environ 85 pixels de côté, extraits de l'image <sup>(6)</sup>. Chaque quadrat illustre une forme type de végétation contractée:

- bosquets dunaires (cf. figure E1),
- brousse tigrée des espaces interdunaires (cf. figure F1),
- grandes bandes des espaces interdunaires (cf. figure G1).

#### 3.1 Mesures des surfaces :

La surface totale des aires ligneuses est estimée à partir du calcul de la surface de l'ensemble X qui s'obtient en calculant le nombre de points constituant l'ensemble X.

Ce calcul a été effectué à partir d'un cadre de 900 lignes sur 1371 colonnes. On mesure la surface de X et le taux d'occupation de X.

Surface(X) = nombre de pixels(X) = 117327

Taux d'occupation de X = environ 10%

Connaissant la résolution spatiale de SPOT, on peut donc estimer la superficie en ligneux de l'aire d'étude à 4693 ha.

#### 3.2 Distribution de la taille des agrégats de ligneux :

Les agrégats de ligneux sont ici assimilés aux composantes connexes de l'ensemble X.

Afin d'estimer la distribution de la taille des composantes connexes de X, nous utilisons la méthode de *granulométrie par ouverture*. Elle consiste à transformer l'ensemble X par *ouverture* <sup>(7)</sup> à l'aide d'un élément structurant hexagonal B. Les éléments connexes de taille inférieure à celle de l'élément structurant sont éliminés. En accroissant la taille n de l'élément structurant, on élimine successivement les éléments de taille n-1 à la manière d'un tamis. Le calcul de la surface et du nombre d'éléments éliminés à chaque ouverture nous permet d'évaluer la distribution de la taille des éléments de X.

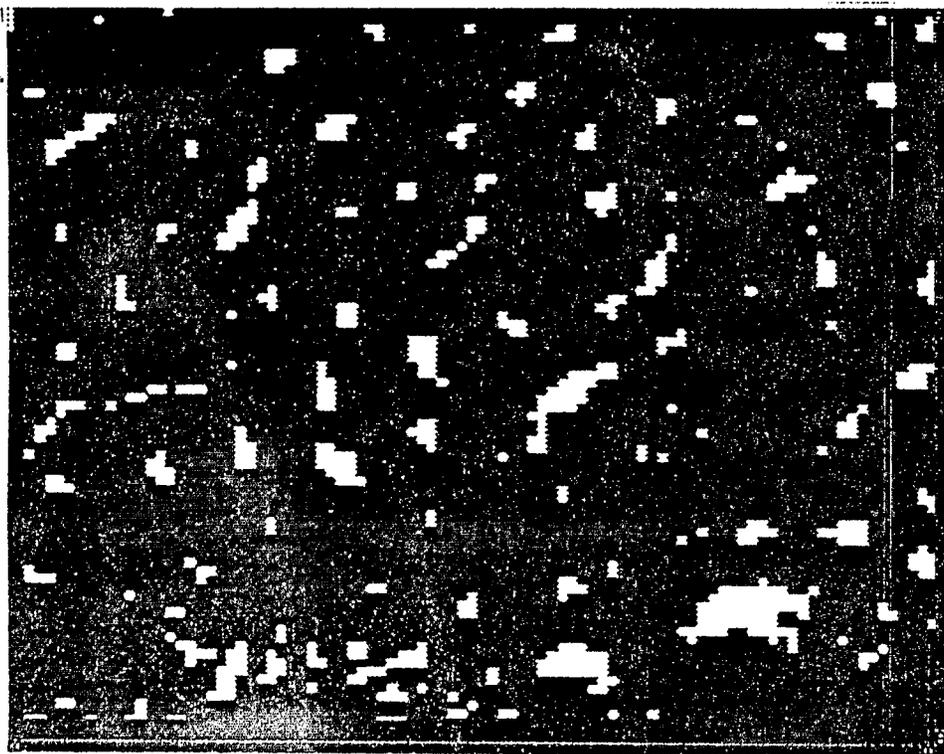


Figure E1: bosquets dunaires

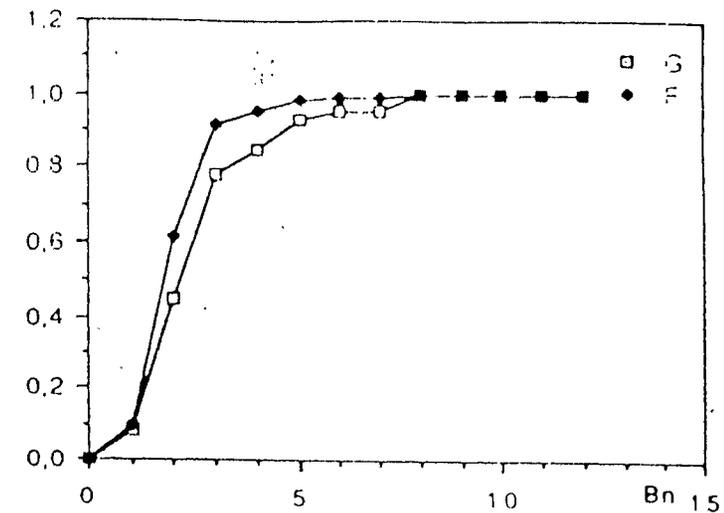


Figure E2: Distribution de la taille en surface (G) et en nombre (F)

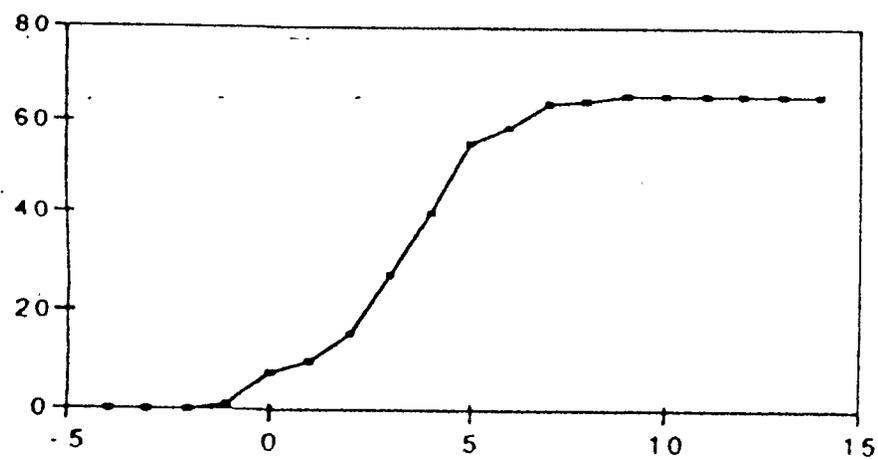


Figure E4: indice textural

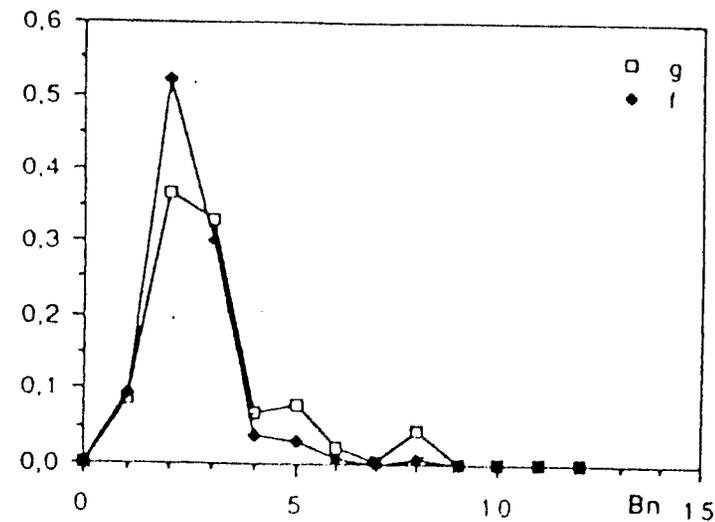


Figure E3: Densité granulométrique en surface (g) et en nombre (f)

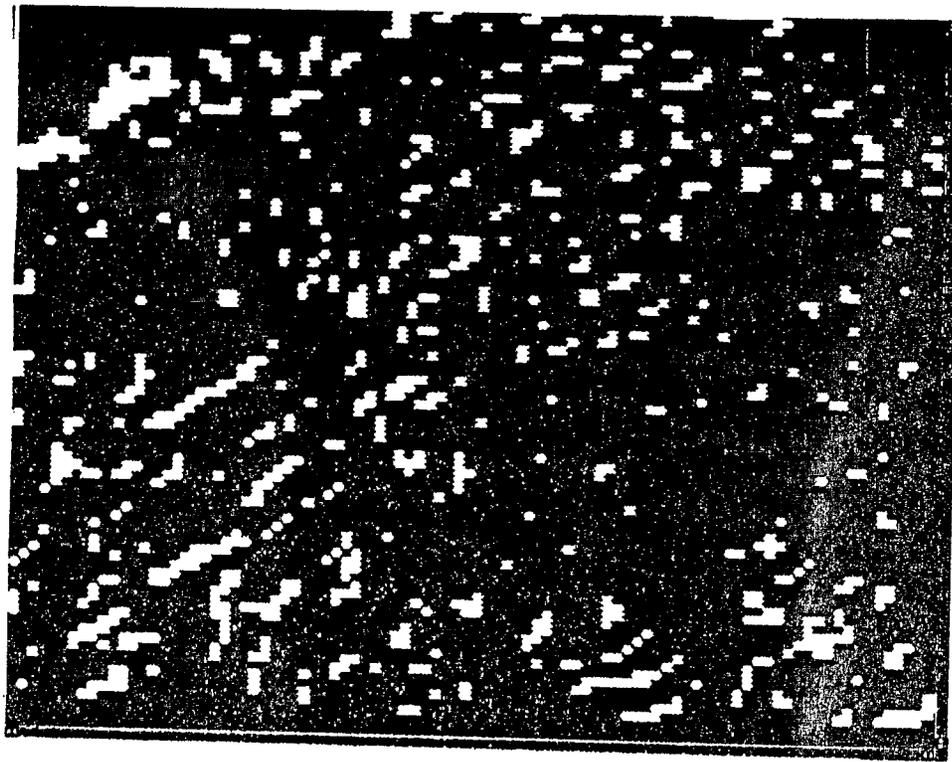


Figure F1. Brousse tigrée des espaces interdunaires

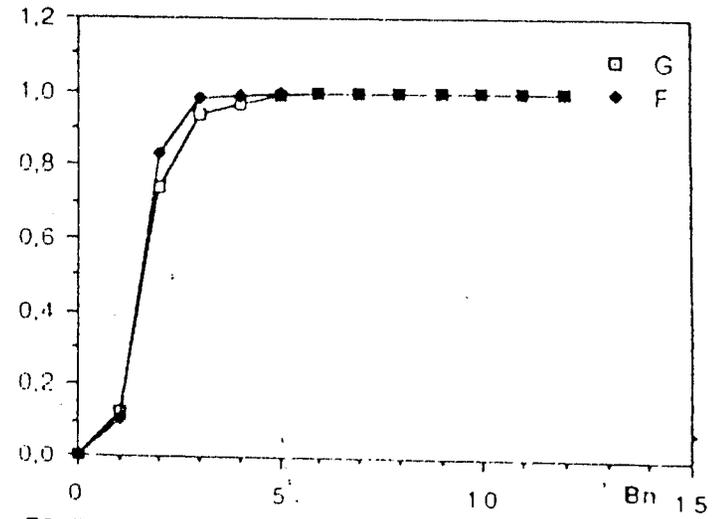


Figure F2. Distribution de la taille en surface (G) et en nombre (F)

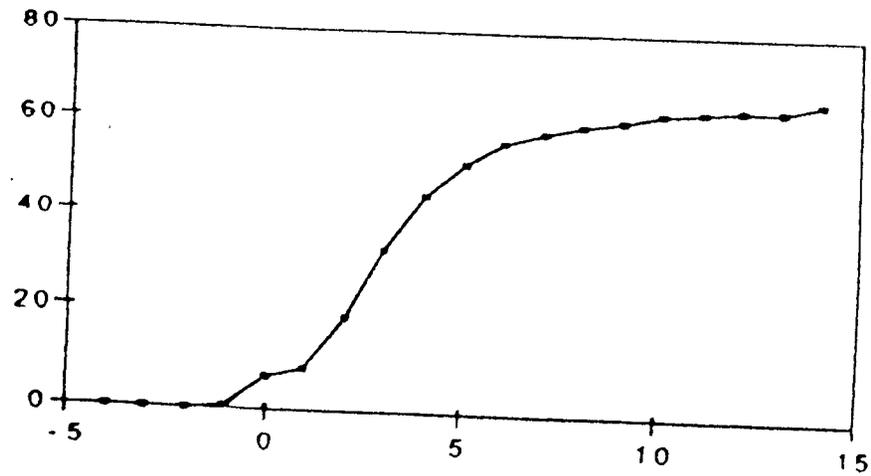


Figure F4: indice textural

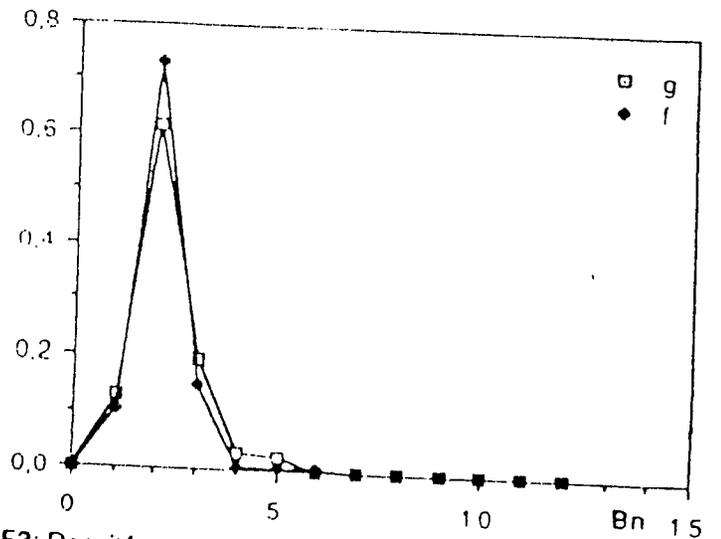


Figure F3: Densité granulométrique en surface (g) et en nombre (f)

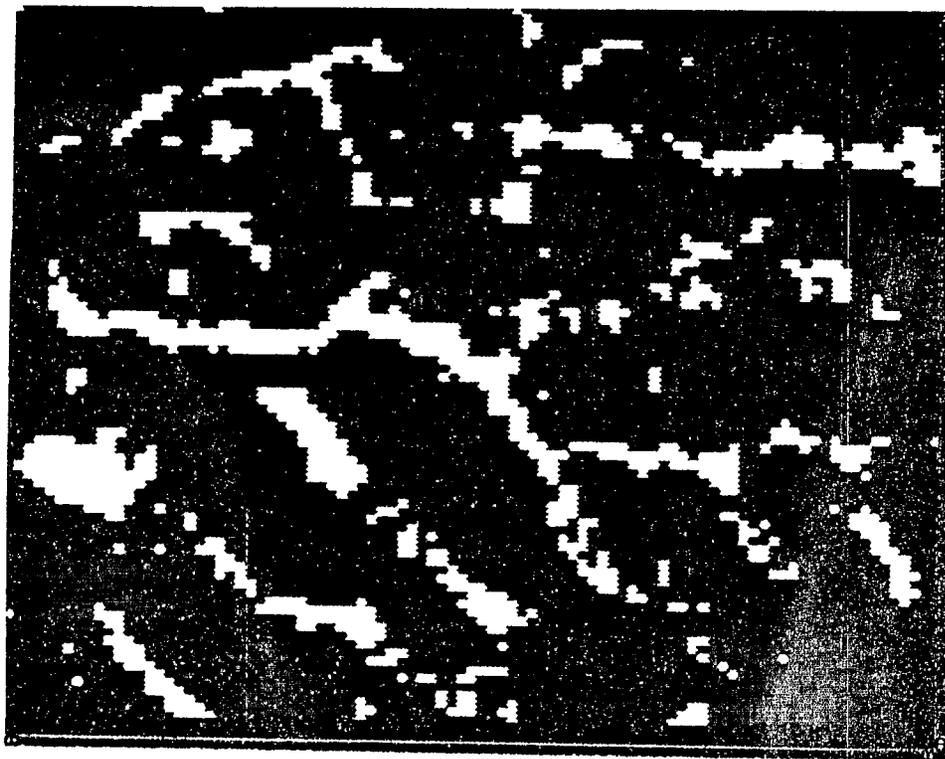


Figure G1: Grandes varées des espaces interdunaires

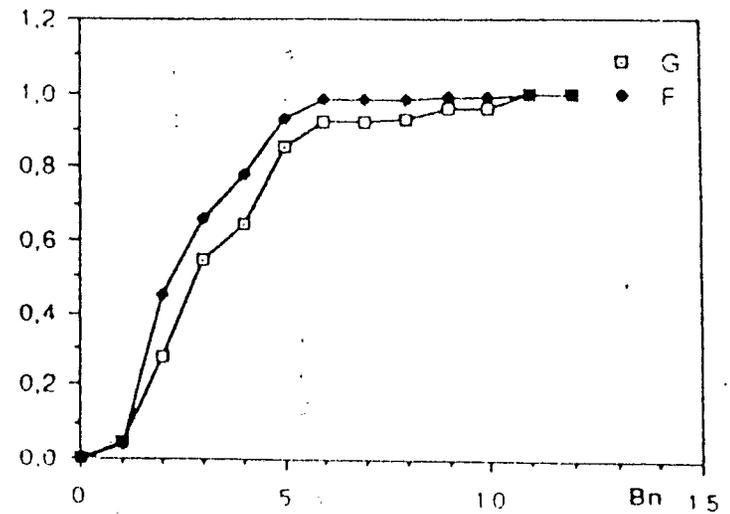


Figure G2: Distribution de la taille en surface (G) et en nombre (F)

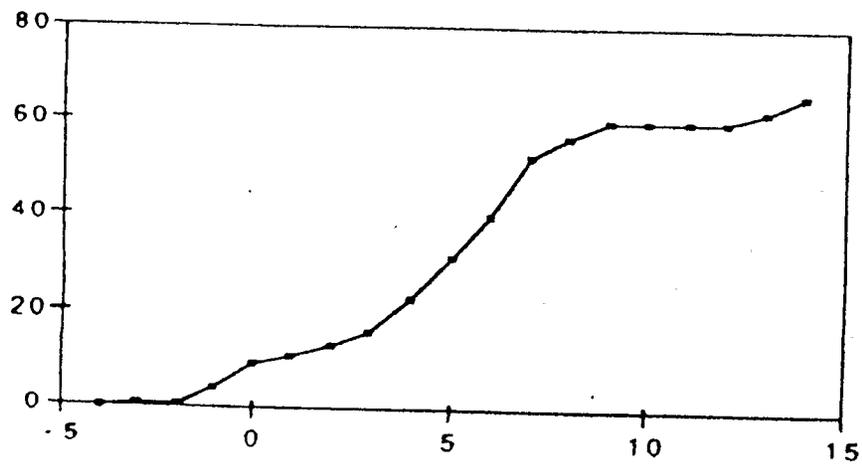


Figure G4: Indice textural

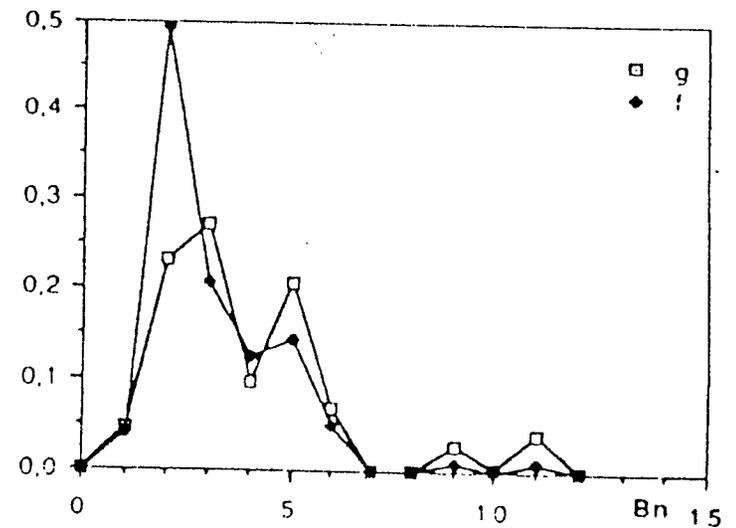


Figure G3: Densité granulométrique en surface (g) et en nombre (f)

On calcule  $G(n)$  la distribution de taille en surface et  $F(n)$  la distribution de taille en nombre à l'aide des formules suivantes :

$$G(n) = \{A(X) - A(X_{B(n)})\} / A(X) \quad n \geq 0$$

$$F(n) = \{N(X) - N(X_{B(n)})\} / N(X) \quad n \geq 0$$

où,

$A(X)$  est la surface de  $X$

$N(X)$  est le nombre d'entités connexes de  $X$

$X_{B(n)}$  est l'ouvert de  $X$  par l'élément structurant hexagonal  $B$  de taille  $n$

Ces distributions permettent d'évaluer la totalité en surface et en nombre des parties<sup>(8)</sup> de l'ensemble  $X$  éliminées par les ouvertures de rayon inférieur à  $n$ .

Ces distributions, calculées pour chacun des quadrats  $E1, F1, G1$ , ont été représentées graphiquement sur les 3 figures  $E2, F2, G2$ . En abscisse, figure la taille  $n$  de l'élément structurant  $B$ ; en ordonnée, figurent les valeurs correspondantes de  $G(n)$  et  $F(n)$ .

Les deux courbes  $F(n)$  et  $G(n)$  se confondent dans le cas où le nombre d'éléments connexes varie de la même façon que la surface occupée: Si  $X$  est composé essentiellement d'éléments connexes de grande taille, la courbe  $G$  sera longtemps située sous la courbe  $F$ . Si  $X$  est composé d'éléments connexes dont la taille est équirépartie, les deux courbes sont confondues et on la même allure convexe.

Le graphique  $F2$  met en évidence la texture pointilliste de la *brousse tigrée* : elle est composée de grains dont la quasi-totalité est de taille inférieure à 1.

Les courbes du graphique  $G2$ , de pente plus faible par rapport au autres échantillons, indiquent l'existence de plusieurs tailles de grains dont l'effectif décroît progressivement à mesure que la taille augmente. La surface des grains croît de façon régulière. On décèle un seuil sur la courbe  $G$  qui tend à distinguer deux classes de taille de grains.

Le graphique  $E2$  montre que la taille des bosquets dunaires varie de façon continue. Les courbes ont un tracé presque continu entre les abscisses 1 et 4.

On peut également évaluer la *densité granulométrique* en surface  $g(n)$  et en nombre  $f(n)$  à l'aide des formules suivantes :

$$g(n) = \{A(X_{B(n)}) - A(X_{B(n+1)})\} / A(X)$$

$$f(n) = \{N(X_{B(n)}) - N(X_{B(n+1)})\} / N(X)$$

Le calcul de la densité granulométrique permet d'évaluer la proportion en surface ou en nombre des parties de  $X$  qui sont éliminées entre deux ouvertures successives de rayon respectif  $n$  et  $n+1$ .

Ces densités, calculées pour chacun des quadrats  $E1, F1, G1$ , ont été représentées graphiquement sur les 3 figures  $E3, F3, G3$ . En abscisse, figure la taille  $n$  de l'élément structurant  $B$ ; en ordonnée, figurent les valeurs correspondantes de  $g(n)$  et  $f(n)$ .

Les courbes de densité permettent de visualiser l'importance relative en nombre et en surface des parties de  $X$  de taille  $n$ .

D'après la figure  $F3$ , on observe que la *brousse tigrée* est presque essentiellement composée d'éléments de taille 1.

D'après la figure G3, les courbes indiquent la présence de quatre tailles de grains. On observe une forte proportion en surface et en nombre d'éléments de taille 1 et 2.

Sur la figure E3, les deux courbes f et g indiquent la présence de trois tailles de grains dont la grande majorité ont une petite surface.

### 3.3 Texture du couvert ligneux :

Afin d'estimer l'agencement relatif des parties de X dans la fenêtre étudiée, on applique successivement à l'image des ouvertures de taille décroissante, la taille maximale des ouvertures correspondant à la disparition de l'ensemble X et des *fermetures* <sup>(9)</sup> de taille croissante jusqu'à ce que la fenêtre soit inhibée à 1.

Ces indices de texture, calculés pour chacun des quadrats E1, F1, G1, ont été représentés graphiquement sur les figures E4, F4, G4. En abscisse figure la taille n de l'élément structurant B; en ordonnée, figure le nombre de pixels résiduels après chaque transformation; on a représenté la suite des rayons d'ouverture par une suite croissante de nombres négatifs, de -5 à 0.

La régularité de la courbe traduit la régularité de l'agencement des formes sur le fond.

Cet indice textural caractérise à l'aide d'un seul paramètre la répartition spatiale des éléments dans une fenêtre de taille fixe. A ce titre, il peut être utilisé comme descripteur quantitatif dans des analyses et dans les classifications d'unités de paysage basées sur la texture.

### 3.4 Mesure de la dispersion spatiale des agrégats de ligneux :

Ici, on évalue la dispersion spatiale des composantes connexes de X à l'aide du calcul de la *covariance* de l'ensemble X. On définit la covariance  $C(X,h)$  de la manière suivante :

$$C(X,h) = A\{(E^h(X)) \cap (E^h(Z))\} / A(E^h(Z))$$

où,

Z est le masque de mesure

A (X) est la surface de X

$E^h(X)$  est l'érosion de X par un bipoint de longueur h.

La procédure consiste à effectuer des érosions successives de l'ensemble X et du masque de mesure Z <sup>(10)</sup> par un bipoint d'espacement croissant h et d'orientation  $\alpha$  <sup>(11)</sup> et d'en déduire le covariogramme  $C(X,h,\alpha)$  de l'ensemble X.

Le covariogramme permet de mettre en évidence des états de dispersion des éléments au sein d'un masque de mesure, dans une direction donnée. De façon générale, les propriétés du covariogramme permettent d'en déduire certaines caractéristiques de l'état de dispersion de l'ensemble analysé [COSTER 85]:

-La covariance présentant un caractère directionnel, renseigne sur l'*anisotropie* de l'ensemble X: en particulier, la dérivée à l'origine dans une direction donnée est égale à la variation diamétrale de l'ensemble X dans cette direction.

- Les oscillations de la covariance traduisent la présence de *périodicités* de l'ensemble X. Ces ondulations sont d'autant plus accentuées que la périodicité est plus marquée. La distance qui sépare un minimum d'un maximum n'est autre que l'épaisseur moyenne des parties de X dans la direction étudiée. La distance entre deux maxima correspond à la distance moyenne entre deux parties de X.

Pour chacun des quadrats E1, F1, G1, on a calculé le covariogramme correspondant à la direction horizontale ( $\alpha=0$ ).

Les covariogrammes sont représentés sur les figures E5, F5, G5: en abscisse, figure la longueur  $h$  du bipoint; en ordonnée, figure le résultat du calcul de la covariance.

Les covariogrammes des trois quadrats mettent tous en évidence une certaine périodicité de la structure du couvert végétal. Mais l'amplitude et la hauteur des ondulations varient sensiblement d'un quadrat à l'autre.

Le covariogramme du quadrat E correspondant aux *bosquets dunaires*, présente des oscillations d'amplitude variable. La distance entre un minimum et un maximum varie entre 1 et 7 et la distance entre deux minimas varie entre 2 et 7: Les bosquets ont un diamètre horizontal variant entre 1 et 7 pixels en moyenne. Ils sont distants d'environ 2 à 7 pixels en moyenne.

Le covariogramme du quadrat F correspondant à la *brousse tigrée* se caractérise par des petites ondulations de faible hauteur. La distance entre un minimum et un maximum varie entre 1 et 4 et la distance entre deux minimas varie entre 2 et 5. Les bandes ont un diamètre horizontal variant entre 1 et 4 pixels en moyenne. Ils sont distants d'environ 2 à 6 pixels en moyenne.

Le covariogramme du quadrat G correspondant aux *grandes bandes* se caractérise par la superposition de deux périodicités : une ondulation de grande amplitude composée d'ondulations d'amplitude plus faible. Ce phénomène traduit l'existence de deux structures imbriquées. En analysant les ondulations élémentaires, on observe que la distance entre un minimum et un maximum varie entre 1 et 10 et la distance entre deux minimas varie entre 5 et 12. Les bandes ont un diamètre horizontal variant entre 1 et 10 pixels en moyenne. Ils sont distants d'environ 5 à 12 pixels en moyenne.

Une utilisation systématique des covariogrammes sur l'ensemble de l'image satellitaire, par l'intermédiaire de masques de mesure jointifs permettrait d'opérer une taxonomie des unités du paysage Sahélien en fonction de l'état de dispersion de la couverture végétale.

## CONCLUSION :

Les méthodes d'analyse quantitative de traitement d'image pour évaluer les surfaces couvertes en ligneux et caractériser leur texture fournissent des résultats reproductibles directement utilisables pour l'inventaire et le suivi des ressources ligneuses des pâturages en milieu Sahélien.

Cette méthode est satisfaisante quand la couverture ligneuse est suffisamment dense localement pour être différenciée des sols dénudés sombres sur les images satellitaires. Les descripteurs obtenus peuvent également servir de base à l'analyse taxonomique des unités de paysage au couvert discontinu des milieux semi-arides.

## NOTES :

(1) l'aire d'étude se situe entre les longitudes 14°40'-14°50'N et les latitudes 0°60'-0°40'W.

(2) les précipitations sont en moyenne de 350 mm par an, réparties sur une saison des pluies allant de juin à septembre.

(3) Endoréisme : Organisation des régions dont le réseau hydrographique ne se raccorde pas au niveau de base général des mers et océans, mais soit à une plaine

d'épandage, soit à une mer ou un lac intérieurs (P. George, Dictionnaire de la géographie).

(4) Les segments correspondent à la réunion des intervalles jointifs calculée à partir des variables par segmentation. Chaque famille de segments correspond à une partition de l'ensemble des pixels de la scène. On utilise également le terme de segments pour qualifier les sous-ensembles de pixels déterminés par la segmentation.

(5) Il s'agit des fragments d'image délimités à partir des réalités-terrain et des photographies aériennes, servant à contrôler les résultats des classifications faites sur l'image a posteriori.

(6) A l'intérieur des quadrats, on a choisi un agrandissement de facteur 3. Ce choix est celui qui permet la meilleure discrimination des textures étudiées. Il est envisagé à l'avenir de faire une étude systématique des résultats obtenus dans la discrimination des différents types de couverts en fonction du facteur utilisé.

(7) et (9) L'érosion et la dilatation sont les deux transformations morphologiques de base, dont la définition est la suivante:

Soient un ensemble  $X$  appartenant à  $P(\mathbb{R}^2)$  et  $B$  un élément structurant muni d'un centre  $x$  et noté  $B_x$ . On appelle *érodé de  $X$  par  $B$*  et on notera  $E^B(X)$  le lieu des centres  $x$  de  $B_x$  tels que  $B_x$  soit inclus dans  $X$ .

On appelle *dilaté de  $X$  par  $B$*  et on note  $D^B(X)$ , le lieu des centres  $x$  de  $B_x$  tels que  $B_x$  rencontre  $X$ . On démontre que dilater un ensemble  $X$  est équivalent à éroder son complémentaire  $X^c$  et inversement. On dira que l'érosion et la dilatation sont des opérations *duales* pour la complémentation.

L'ouverture et la fermeture peuvent être définies à partir de l'érosion et de la dilatation, conformément à ce qui suit:

On réalise l'ouverture d'un ensemble  $X$  par un élément structurant  $B$ , en érodant  $X$  par  $B^V$  qui est l'élément symétrique de  $B$  puis en dilatant le résultat par  $B$ . On note  $X_B$  l'ouverture de  $X$  par  $B$ .

De même que la dilatation peut être définie comme l'opération duale de l'érosion, on définit la fermeture comme transformation duale de l'ouverture: on réalise la fermeture de  $X$  par un élément structurant  $B$  en ouvrant le complémentaire de  $X$  par  $B^V$  et en prenant le complémentaire de l'ensemble résultant. On note  $X^B$  la fermeture de  $X$  par  $B$ .

(8) Les parties de  $X$  sont les sous ensembles de  $X$  connexes ou non.

(10) Le masque de mesure est la fenêtre carrée qui délimite l'ensemble  $X$  que l'on mesure. Ici il s'agit de carrés de 256 points de côté.

(11) Un bipoint est constitué d'un couple de points distants d'une longueur  $h$ . C'est un ensemble non connexe contrairement au segment de droite.

#### BIBLIOGRAPHIE :

- [BARRAL 77] H. Barral : Les populations nomades de l'Oudalan et leur espace pastoral. Travaux et Documents de l'ORSTOM n° 77, 1977, 111p.
- [CELEUX 82] G. Celeux, Y. Lechevallier : Méthodes de segmentation non paramétriques. Revue de statistique appliquée, vol. XXX, n°4, 1982, pp39-53.
- [COSTER 85] M. Coster et J.L. Chermant : Précis d'Analyse d'images. Edition du CNRS, Paris, 1985, 521p.

- [COUREL 84] M.F. Courel : Etude de l'évolution récente des milieux Sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'Etat, Paris I, 1984, 407 p.
- [MERING 87a] C. Mering, Y. Poncet, C. Jacqueminet, M. Rakoto Ravalontsalama : Quantitative description of denudation forms in the Western African Sahel. *Advanced Space Research*, 7(3), Pergamon Press, London, 1987, pp31-39
- [MERING 87b] C. Mering, C. Jacqueminet : An approach of quantitative description of sand-hills shapes in the West African Sahel from Remote Sensing Imagery. *Acta Stereologica*, Ljubljana, 1987, pp951-956
- [SERRA 82] J. Serra : Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London, 1982.