

T D M

TRAVAUX ET DOCUMENTS
MICROFICHÉS

N° 85

F3

ANALYSE
DE LA STRUCTURE SPATIALE
DU COUVERT LIGNEUX
EN MILIEU SAHÉLIEN
SUR IMAGES SATELLITAIRES SPOT

Christine JACQUEMINET

ORSIOM
Editions

ECOLE DES HAUTES ETUDES EN SCIENCES SOCIALES

Thèse de doctorat
(nouveau régime)

**ANALYSE DE LA STRUCTURE SPATIALE
DU COUVERT LIGNEUX EN MILIEU SAHELIEN
SUR IMAGES SATELLITAIRES SPOT**

(Etude appliquée au secteur dunaire d'Oursi
au Burkina Faso et au Ferlo sableux au Sénégal)

présentée par
Christine JACQUEMINET

sous la direction de
Marie Françoise COUREL

9 mars 1991

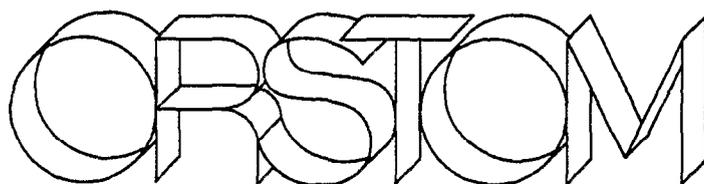
11 MAI 1992

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 35.384 *lx 2*

Cote : *A*

TDM 85



Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection :

Travaux et Documents Microédités

PARIS 1992

ISBN : 2-7099-1096-9

© ORSTOM

F 3

«La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1^{er} de l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.»

ECOLE DES HAUTES ETUDES EN SCIENCES SOCIALES

Thèse de doctorat
(nouveau régime)

présentée par
Christine JACQUEMINET

**ANALYSE DE LA STRUCTURE SPATIALE
DU COUVERT LIGNEUX EN MILIEU SAHELIEU
SUR IMAGES SATELLITAIRES SPOT**

(Etude appliquée au secteur dunaire d'Oursi
au Burkina Faso et au Ferlo sableux au Sénégal)

Thèse soutenue le 9 mars 1991 devant le jury composé de :

- M. BARBUT, Professeur à l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences
Sociales, rapporteur,**
M.-F. COUREL, Directeur de Recherches au CNRS,
M. GROUZIS, Directeur de Recherches à l'ORSTOM, rapporteur,
X. GUYON, Professeur à l'Université Paris I,
M. POUGET, Directeur de Recherches à l'ORSTOM,
**G. SAUTTER, Professeur à l'Université Paris I, Directeur d'études à
l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales,**
**F. VERGER, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure, Directeur du
laboratoire IMAGEO-CNRS.**

REMERCIEMENTS

Le travail présenté ici a été réalisé dans le cadre du programme scientifique "Zones Sensibles au Sahel" développé par le Département "Milieux et Activités Agricoles" de l'Institut de recherche pour le développement en coopération (ORSTOM) et conduit à l'Atelier de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy (Laboratoire d'Informatique Appliquée). Les objectifs de ce programme consistent à analyser les ressources naturelles des milieux sahéliens, à l'aide d'indicateurs perceptibles et quantifiables sur images satellitaires. Ce programme a aussi pour but de développer des méthodes d'exploitation des données satellitaires basées sur l'analyse des formes sur les images et la quantification de leurs paramètres, permettant d'effectuer des évaluations comparatives dans l'espace et dans le temps.

Ce travail de recherche doit sa réalisation à l'appui, à l'aide et aux encouragements de mes professeurs et des chercheurs qui m'ont encadrée et que je tiens ici à remercier.

En premier lieu, j'adresse toute ma reconnaissance à Marie Françoise Courel, chercheur, qui a accepté d'assurer la direction de ce travail. J'ai ainsi pu bénéficier de sa grande expérience des milieux sahéliens, de la télédétection et de sa connaissance du terrain. La qualité de son encadrement et son soutien amical m'ont grandement aidée.

Je remercie Marcel Pouget, chercheur et directeur du Laboratoire de Télédétection de l'ORSTOM de Bondy, d'avoir accepté de juger mon travail. Son soutien attentif et sa disponibilité lors de mes travaux m'ont été précieux.

Monsieur le Professeur Fernand Verger a bien voulu relire et juger mon travail. Je lui suis reconnaissante pour l'intérêt et les encouragements qu'il a manifestés à mon égard.

Monsieur le Professeur Gilles Sautter, en acceptant d'être membre de mon jury, me fait un grand honneur. Je le remercie de l'intérêt qu'il a bien voulu porter à mon travail.

Xavier Guyon, Professeur à l'Université Paris I, a accepté de juger ce travail. Je lui en suis reconnaissante ainsi que des remarques qu'il a formulées lors de la réalisation des travaux.

Monsieur le Professeur Marc Barbut a accepté de juger mon travail. Je l'en remercie.

Je remercie Michel Grouzis, chercheur à l'ORSTOM, pour l'intérêt qu'il a porté à l'égard de mon travail. La communication de son expérience des milieux sahéliens lors d'une mission sur le terrain au Ferlo et de la rédaction de ce mémoire m'ont beaucoup aidée.

Phillipe Chamard, Professeur à l'Université Paris X, m'a dispensée lors de la réalisation de cette recherche de nombreux conseils et remarques, qu'il soit ici remercié.

Je suis vivement reconnaissante à Yveline Poncet, responsable du programme de recherche "Zones Sensibles au Sahel" de m'avoir intégrée dans les équipes de recherche de l'ORSTOM. Son expérience des milieux sahéliens qu'elle m'a fait partager lors d'une mission sur le terrain, sa disponibilité, ses encouragements et son souci constant de m'assurer les moyens nécessaires au déroulement de ce travail ont largement contribué à la bonne réalisation de cette étude.

Je remercie Catherine Mering, responsable de l'équipe de recherche SATFORM au laboratoire de Télédétection de Bondy, pour son investissement dans l'élaboration de la méthode de ce travail et pour l'initiation aux outils de la télédétection qu'elle m'a dispensée avec beaucoup de disponibilité.

De même, ce travail n'aurait pu se faire sans la contribution de Mamy Rakoto-Ravalontsalama, qui a élaboré le logiciel PLANETES et mis en place le logiciel MORPHOLOG de l'Ecole des Mines de Fontainebleau, au laboratoire de Télédétection de Bondy. Qu'il soit ici remercié.

Ces travaux ont été réalisés au laboratoire de Télédétection de Bondy et doivent leur bon achèvement aux membres de cette équipe qui, par leurs encouragements, leur disponibilité et leur sérieux, m'ont assuré, au cours de ces quelques années passées en leur compagnie, une excellente ambiance de travail. Je remercie en particulier, Haja Andrianasolo dont les remarques rigoureuses m'ont été précieuses, Annick Aing, pour la qualité de ses travaux photographiques, Marie-Thérèse Miguet (documentation), Nicole Delarbre et Liliane Zuretti.

Le bon déroulement des missions sur les terrains au Burkina et au Sénégal est dû aux moyens logistiques mis à ma disposition. Je remercie ici Monsieur Gautun et Monsieur Fontana, respectivement directeurs des centres ORSTOM de Ouagadougou et de Dakar, pour leur contribution essentielle.

Je remercie particulièrement les membres des institutions burkinabé et sénégalaises : l'Université de Géographie de Ouagadougou, l'Université de Géographie de Dakar, l'Institut Sénégalais de Recherches en Agro-forestrie, les membres du Centre de Suivi Ecologique de Dakar et le personnel du Laboratoire de l'Elevage et de Recherches Vétérinaires sénégalais, qui m'ont reçue avec beaucoup de gentillesse et d'intérêt.

Enfin, si je dois la réalisation de ce travail à l'ensemble des personnes citées ici, j'aimerais leur exprimer toute ma reconnaissance pour m'avoir fourni l'occasion de vivre une expérience exceptionnelle que je n'aurais peut-être pas tentée sans eux. J'aimerais ici remercier en particulier, Madame le professeur Monique Mainguet qui, la première, m'a encouragée dans cette voie. Les nombreux échanges entretenus au cours de la réalisation de ce travail avec mes professeurs et la découverte de l'Afrique sahélienne, de ses habitants, de son art de vivre,... ont grandement contribué à mon épanouissement personnel.

PLAN

PARTIE I PRESENTATION DU MILIEU SAHELIE ET DES REGIONS ETUDIEES

INTRODUCTION	1
1. LES CARACTERISTIQUES DU MILIEU SAHELIE :	9
2. LA VEGETATION EN MILIEU SAHELIE :	13
2.1. Définitions :	13
2.2. La brousse tigrée :	14
3. LA PERCEPTION DU PAYSAGE A L'AIDE DES DONNEES SATELLITAIRES :	25
3.1. La nature des informations fournies par le satellite SPOT :	25
3.2. La spécificité du comportement spectral de la végétation :	25
3.3. La composition colorée : une synthèse de l'information satellitaire :	30
3.4. Les données utilisées :	31
4. DESCRIPTION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'OURSIE :	32
5. DESCRIPTION GEOGRAPHIQUE DU FERLO SABLEUX :	41
6. LES STRUCTURES SPATIALES DU COUVERT LIGNEUX SUR LES IMAGES DES SITES ETUDIES :	53
6.1. Description des modes d'organisation spatiale des ligneux sur le site d'Oursie :	54
6.2. Description des modes d'organisation spatiale des ligneux sur le site du Ferlo :	56

**PARTIE II CARACTERISATION
DES PRINCIPALES UNITES DU PAYSAGE
ET IDENTIFICATION DES GROUPEMENTS
DE LIGNEUX SUR IMAGE SATELLITAIRE**

1. LA DEMARCHE ET LES OUTILS DE L'ANALYSE DES UNITES PAYSAGIQUES SUR IMAGES SATELLITAIRES :	61
1.1. Les principes de l'analyse des unités paysagiques sur les images satellitaires :	61
1.2. Le choix d'une démarche non dirigée :	63
1.3. La méthode de classification dite des centres mobiles :	64
1.4. Les variables image :	66
1.4.1. L'indice de végétation :	67
1.4.2. L'analyse en composantes principales :	67
2. LES UNITES PAYSAGIQUES MISES EN EVIDENCE PAR LES CLASSIFICATIONS SUR LES SITES D'OURSIS ET DU FERLO :	69
2.1. La méthode d'analyse des classes et d'identification des unités paysagiques :	69
2.2. Les principales unités paysagiques du site d'Oursi :	70
2.2.1. Les milieux sableux du site d'Oursi :	73
2.2.2. Les milieux cuirassés du site d'Oursi :	80
2.2.3. Les groupements de ligneux sur le site d'Oursi :	84
2.3. Les principales unités paysagiques du site du Ferlo :	87
2.3.1. Le comportement spectral des principaux états de surface du Ferlo au sol :	88
2.3.2. le secteur dunaire septentrional sur le site du Ferlo :	95
2.3.3. le secteur dunaire méridional sur le site du Ferlo :	100
2.3.4. la plaine interdunaire sableuse sur le site du Ferlo :	108
2.3.5. Les groupements de ligneux sur le site du Ferlo :	111
2.4. Les conclusions générales de l'analyse des classifications :	112
3. CONSTRUCTION DE L'IMAGE DES GROUPEMENTS DE LIGNEUX :	116
3.1. Les principes de l'élaboration de l'image des groupements de ligneux :	116
3.2. Le choix de l'image des groupements de ligneux sur le site d'Oursi :	121
3.3. La construction de l'image des groupements de ligneux sur le site du Ferlo :	130

**PARTIE III CARACTERISATION DE LA STRUCTURE
SPATIALE DU COUVERT LIGNEUX
A L'AIDE DE PARAMETRES QUANTITATIFS**

1. EXPOSE DE LA METHODE ET DES OUTILS :	138
1.1. Rappel de la morphologie mathématique :	139
1.2. Les indices morphologiques :	141
1.3. L'Analyse factorielle des correspondances :	147
2. ANALYSE STATISTIQUE DE LA STRUCTURE DU COUVERT LIGNEUX SUR LE SITE D'OURSI :	149
2.1. L'analyse de la taille des groupements de ligneux sur le site d'Oursi :	149
2.2. L'analyse de la dispersion des groupements de ligneux sur le site d'Oursi :	158
2.3. Conclusions de l'analyse des structures des groupements de ligneux sur le site d'Oursi :	160
3. ANALYSE STATISTIQUE DE LA STRUCTURE DU COUVERT LIGNEUX SUR LE SITE DU FERLO :	163
3.1. L'analyse de la taille des groupements de ligneux sur le site du Ferlo :	163
3.2. L'analyse de la dispersion des groupements de ligneux sur le site du Ferlo :	172
3.3. Conclusions de l'analyse des structures des groupements de ligneux sur le site du Ferlo :	177
4. MISE EN RELATION DES STRUCTURES DU COUVERT LIGNEUX ET DES CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES ET PHYSIQUES DES UNITES PAYSAGIQUES SUR LES SITES ETUDIES :	181
CONCLUSION :	190
TABLE DES FIGURES :	197
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	204
ANNEXE I :	210
ANNEXE II :	212

INTRODUCTION

Les milieux sahéliens, peut-être plus que d'autres, se caractérisent par des changements très rapides dans l'espace et dans le temps, que la fourniture régulière d'images satellitaires permet d'analyser. Parmi ces changements, on distingue : les changements liés au cycle annuel, tels que la croissance, la fructification et le dépérissement des herbacées - ces modifications sont particulièrement sensibles sur la steppe arbustive sahélienne, composée de plus de 85% d'espèces annuelles - et les changements à moyen terme qui entraînent des modifications durables du couvert végétal.

L'objet de ce travail consiste d'une part, à déterminer un indicateur à moyen terme de l'état et des modifications des milieux sahéliens, qui soit perceptible et quantifiable sur images satellitaires. D'autre part, il s'agit de mettre au point une méthode d'exploitation des données satellitaires reproductible, permettant de fournir des données quantifiées à propos de cet indicateur pour mener des études comparatives de ces milieux, dans l'espace et éventuellement dans le temps.

a) Le choix d'un indicateur pour analyser le couvert végétal sur images satellitaires :

L'indicateur choisi est la structure spatiale du couvert ligneux (arbres et arbustes). Nous analysons ici les variations dans l'espace, des formes du couvert ligneux perçues en vue verticale sur les images et tentons de saisir dans quelle mesure, elles nous renseignent sur l'état du couvert végétal des milieux sahéliens et les changements qu'ils subissent.

La végétation est un indicateur sensible de l'état du milieu : son extension spatiale et l'état physiologique et phénologique des espèces qui la composent, sont déterminés par les caractéristiques propres des milieux (sols, topographie, ressources hydriques ...) et par les facteurs (climatiques, anthropiques) qui les influencent. Cependant dans l'optique d'une analyse des changements des milieux sahéliens à moyen terme, seuls les arbres et les arbustes en raison de leur présence pluri-annuelle, sont étudiés. La végétation herbacée est un indicateur trop sensible, puisque son taux de recouvrement et ses espèces varient d'une année sur l'autre en fonction de l'importance et de la distribution dans le temps et dans l'espace des pluies.

L'étude des ligneux en milieu sahélien se justifie par le rôle capital qu'ils jouent dans l'équilibre global de l'écosystème sahélien. Leur présence favorise :

- le maintien d'un microclimat moins xérique (ombrage, diminution de l'évapotranspiration potentielle, réduction de la vitesse du vent) ;
- la protection contre l'érosion et l'amélioration de la fertilité du sol ;
- l'augmentation sensible de la production de la strate herbacée : sous les arbres et indépendamment de l'essence considérée (*Commiphora africana*, *Balanites aegyptiaca* ou *Acacia senegal*) s'installe un groupement végétal plus mésophile qui persiste plusieurs années encore après la disparition de l'arbre. Ce changement qualitatif s'accompagne d'une augmentation de la biomasse herbacée allant de 20% à 60% (Poupon, 1980) ;
- les ligneux contribuent aussi à l'alimentation de l'homme et du bétail : ils apportent au bétail l'azote qui lui est nécessaire en saison chaude et aux premières pluies par les repousses (Boudet, 1984). Pendant six mois de l'année, la végétation herbacée est impropre à l'alimentation animale si elle est utilisée seule, et le complément indispensable est apporté par les feuilles des arbres et des arbustes (Bille, 1977). En fin de saison sèche, si la feuillaison a été bonne, les ligneux peuvent intervenir pour 60% dans l'alimentation du bétail (Toutain, 1978). Le pâturage arboré apporte un appoint substantiel en protéines et en sels minéraux alors que la pâture herbacée en est dépourvue (Piot, 1970) ;
- l'arbre joue aussi un rôle dans l'économie des systèmes agricoles en étant fournisseur d'énergie et de matériaux. Le bois fournit aux Sahéliens 90% de leurs besoins énergétiques.

Le choix de cet indicateur résulte de l'observation du couvert végétal au cours des trois dernières décennies, au sol et sur photographies aériennes et images satellitaires (De Wispeleare, 1980, Poupon, 1980, Courel, 1984). Suite aux fluctuations de la pluviométrie et aux déficits hydriques récurrents, on a observé en milieu dunaire, le passage d'un mode diffus de la répartition des ligneux à un mode contracté. Ces modifications de la distribution spatiale des ligneux se manifestent par une dénudation du sommet des ondulations dunaires et un regroupement des ligneux dans les dépressions, en unités spatialement individualisées, que nous appelons *groupements de ligneux*.

Sur les images satellitaires, le contraste entre la réponse spectrale des aires de végétation ligneuse dense et celle des aires peu couvertes ou dénudées environnantes, se traduit par la présence de taches de forme et de dimension variées. Le passage d'une couverture ligneuse diffuse à un couvert discontinu devient ainsi perceptible par

l'apparition de trouées ou par l'individualisation de taches au sein de ce couvert. Dans le cas d'un couvert discontinu, les extensions et les rétractions spatiales du couvert ligneux deviennent alors observables sur les images satellitaires, par le biais des variations de forme et de taille des surfaces occupées par des peuplements denses de ligneux.

L'analyse de la structure spatiale du couvert ligneux soulève plusieurs questions :

- quels sont les paramètres qui régissent l'organisation spatiale des ligneux ? les ressources hydriques, la topographie, les sols ... ?
- la structure spatiale du couvert ligneux est-elle liée à un type de végétation spécifique ?
- de quelle façon la structure spatiale du couvert ligneux perçue sur image satellitaire, nous renseigne-t-elle sur les caractéristiques physiques du milieu qu'il occupe ?

b) Une méthode d'exploitation des données satellitaires reproductible :

Dans le but d'une évaluation quantitative de la structure spatiale du couvert ligneux en milieu sahélien, est mis au point une méthode d'exploitation des données satellitaires, reproductible. Les descripteurs quantitatifs élaborés dans ce travail, pourront être utilisés par la suite pour des mesures systématiques, dans le cadre de comparaisons spatiales et temporelles du couvert ligneux en milieu sahélien.

Les capteurs des satellites enregistrent le rayonnement électromagnétique réfléchi par les objets de la surface terrestre, sur des surfaces élémentaires dont la dimension au sol varie. Les images SPOT multispectrales ont ici été utilisées en raison de leur haut pouvoir de résolution : 20 / 20 m. Les informations fournies par les images satellitaires sont de deux types :

- des valeurs radiométriques numériques,
- un agencement de pixels où l'on distingue des textures et des structures traduisant des organisations diverses d'objets au sol.

"La **texture** est l'ensemble défini en extension, des éléments texturaux. Un élément textural d'une image est la zone continue et répétée dans laquelle un changement de caractère n'est pas décelable, ou décelé, avec les moyens dont on dispose. Dans le cas des images de télédétection, un élément textural est constitué par l'ensemble des éléments de résolution qui ont même valeur de luminance et qui sont connexes. La **structure** est l'ensemble défini en compréhension des éléments texturaux. Les éléments structuraux sont définis par les relations répétées qui existent entre les

éléments texturaux" (Girard, 1989).

Dans le cadre de notre étude, l'élément textural sur l'image est l'entité de pixels connexes identifiés comme étant un groupement de ligneux (deux pixels sont considérés comme connexes, s'ils ont une face ou un sommet commun (Girard, 1989)). On définit la structure du couvert ligneux sur les images, à l'aide des propriétés intrinsèques des éléments texturaux (valeur de luminance, taille, forme) et des propriétés extrinsèques des éléments texturaux (la position relative des éléments texturaux entre eux, leur distance, leur nombre par unité de surface).

Lors de cette étude, la structure du couvert ligneux est analysée à partir des images satellitaires et à partir de photographies aériennes. Bien que le pouvoir de résolution de ces deux documents change, l'élément textural demeure le groupement de ligneux. L'échelle des photographies aériennes (1. 50 000) est trop petite pour nous permettre de distinguer chaque individu.

La méthode développée ici, utilise à la fois les données spectrales et les données morphologiques des images : la simple identification spectrale d'un objet ne permet pas toujours d'appréhender toutes les modalités de sa nature et de son état. On a souvent recours à l'analyse des textures et des structures, notamment en photo-interprétation, pour caractériser des objets dont la signature spectrale est variable, mais caractérisée par une organisation spatiale spécifique.

D'autre part, les composants du paysage sont soumis à des paramètres qui influent sur leur répartition dans l'espace. Leur organisation spatiale est à la fois significative des caractéristiques physiques du milieu (topographie, nature des sols, géologie, hydrologie...) et de la nature des mécanismes morphogénétiques (actions mécaniques, hydriques, éoliennes ...) qui les affectent. La signature morphologique devient alors une source d'information, qui analysée en complémentarité avec la signature spectrale, renseigne sur l'état et la dynamique des paysages.

Lors de cette recherche, les formes sur les images (ici, celles du couvert ligneux) ont été étudiées à l'aide des outils de la morphologie mathématique, qui nous ont semblé particulièrement bien adaptés, pour extraire des images des informations quantifiées quant à la structure de l'objet étudié. L'utilisation de ces outils a été facilitée par la mise en place au laboratoire de Télédétection de Bondy, lors de la réalisation de cette recherche, du logiciel d'analyse des formes MORPHOLOG élaboré par l'école des mines de Fontainebleau.

c) Les sites étudiés :

Nous nous intéressons ici essentiellement aux milieux dunaires, au sein desquels, nous le rappelons, des modifications importantes du couvert végétal ont été observées au cours des dernières décennies. Deux sites d'étude ont été choisis : le **secteur dunaire d'Oursi** au nord du Burkina Faso et le **Ferlo sableux** au Sénégal (Tatki, Mbidi, Tessékéré). Ces deux régions appartiennent au milieu sahélien et sont colonisées par une steppe arborée et arbustive, se caractérisant par un regroupement des ligneux en unités spatialement individualisées.

Néanmoins, entre ces deux régions des différences apparaissent : les modelés dunaires sont différents ; la végétation, bien que composée des mêmes espèces sur les deux sites, présente un développement et des associations floristiques différentes dans chacune de ces régions. Enfin, dans ces deux régions à vocation pastorale, l'exploitation du milieu par l'homme s'exerce avec une intensité différente : la charge anthropique que subit le Ferlo est beaucoup moins importante que celle à laquelle est soumise la région d'Oursi. Cette différence se traduit par un état global du couvert végétal plus fourni et développé dans le Ferlo que dans la région d'Oursi.

Lors de l'analyse, les deux sites sont étudiés de façon indépendante. L'application de la même méthode d'analyse des données satellitaires permettra d'étudier et de comparer, pour chacune de ces régions, de quelle façon la structure spatiale du couvert ligneux varie en relation avec les différentes unités du paysage.

d) Le plan du mémoire :

Sur les images satellitaires, des variations de la structure du couvert ligneux sont perceptibles d'une unité géomorphologique à l'autre. En effet, à chaque unité géomorphologique (bande dunaire, espace interdunaire), correspondent un ou plusieurs modes d'organisation spatiale des groupements de ligneux dont l'extension spatiale apparaît sur les images étroitement limitée à chaque unité. La caractérisation de la structure spatiale du couvert ligneux au sein de chaque unité géomorphologique, et l'analyse de ses variations spatiales au sein et entre ces unités, à partir des données satellitaires et des données-terrain, sont menées de la façon suivante :

- Partie I :

Après un rappel des principales caractéristiques du domaine sahélien et de celles de la végétation sahélienne, nous nous attachons à décrire plus précisément les deux régions étudiées. Cette description s'appuie en particulier sur les ouvrages de Barral, Courel, Poupon ... et sur les observations faites au sol sur les deux sites étudiés. Les unités géomorphologiques des paysages étudiés sont ici présentées, ainsi que les différents modes d'organisation spatiale du couvert ligneux qui leur sont associés.

Puis, nous procédons à l'analyse du paysage et de la structure du couvert ligneux sur les images satellitaires. Cette analyse s'effectue en deux étapes relatées dans la deuxième et la troisième partie :

- Partie II :

La première étape consiste en une reconnaissance des unités du paysage dont le couvert ligneux. Cette reconnaissance des principales unités du paysage est obtenue à l'aide d'une classification multispectrale non dirigée, effectuée par la méthode des centres mobiles. L'hétérogénéité des états de surface des paysages étudiés se traduit sur les images par une grande variété des réponses spectrales, que les classifications permettent de synthétiser.

Cette opération permet d'une part, de distinguer les grandes unités du paysage et de les caractériser, à l'aide de leurs propriétés radiométriques et de la connaissance du terrain. D'autre part, elle permet d'isoler de l'ensemble du paysage, les groupements de ligneux pour ensuite analyser leur structure spatiale.

L'identification des unités du paysage est obtenue en classant les images en un nombre croissant de classes. Sur les images classées issues des partitions à nombre croissant de classes, les limites spatiales des unités varient et notamment celles des groupements de ligneux. Pour déterminer l'image des groupements de ligneux à partir de laquelle, sera effectuée l'analyse de la structure spatiale du couvert ligneux, les résultats des classifications sont confrontés à d'autres sources d'information. Sur le secteur d'Oursi, l'image des groupements de ligneux est obtenue à partir d'une comparaison entre les images classées et les photographies aériennes. Sur le secteur du Ferlo, l'image des groupements de ligneux est élaborée à l'aide d'une comparaison entre deux images satellitaires prises à deux dates différentes.

- Partie III :

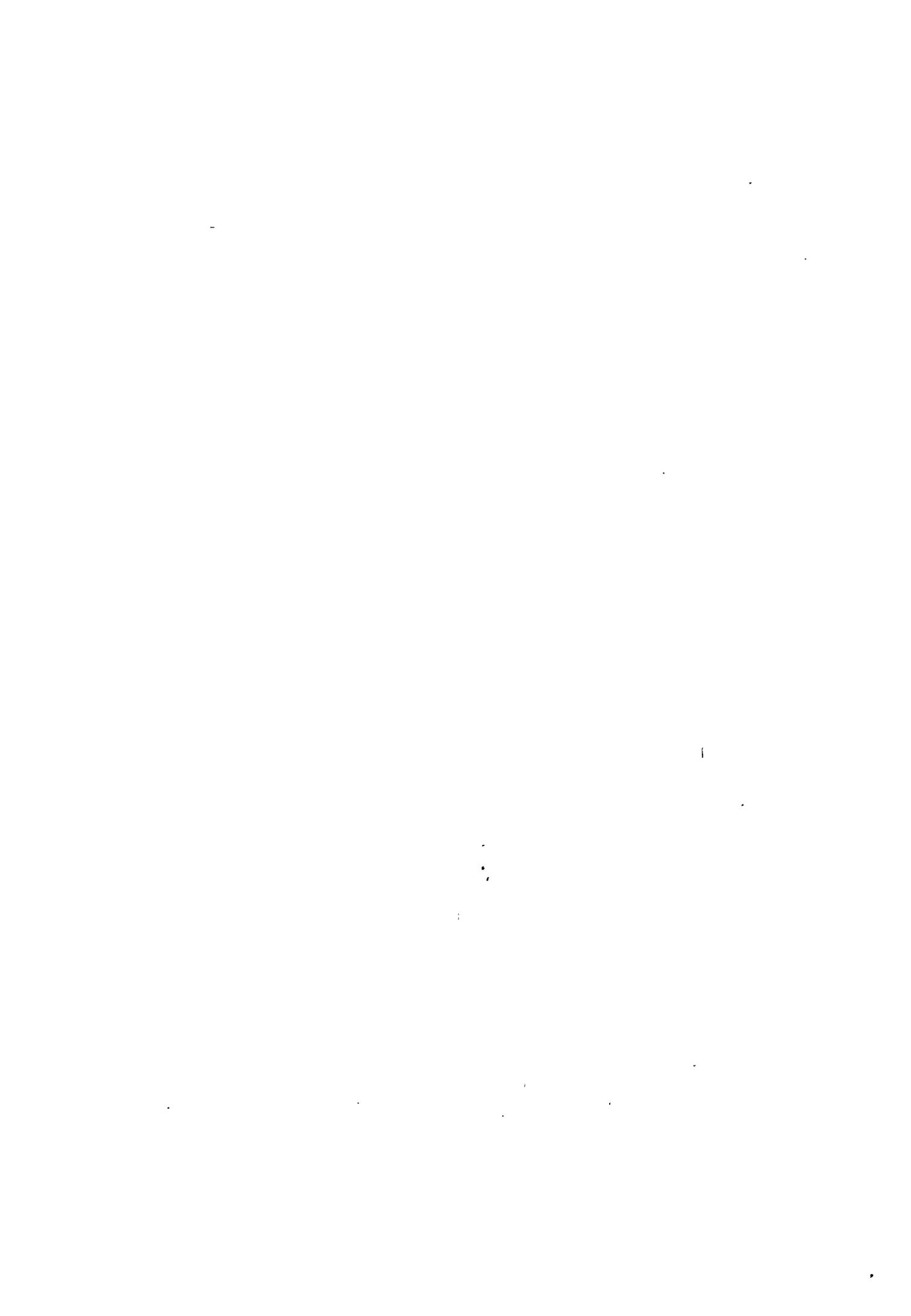
La deuxième étape est consacrée à la caractérisation de la structure du couvert ligneux. A partir de l'image des groupements de ligneux issue de l'étape précédente, nous procédons à une analyse quantitative de la taille et de la dispersion des groupements de ligneux, à l'aide de deux indices empruntés à la morphologie mathématique : la *granulométrie par ouverture bidimensionnelle* et la *covariance*. L'image des classes correspondant aux groupements de ligneux est binarisée et subdivisée en imagettes de taille fixe, appelées quadrats. Ces quadrats sont délimités au sein de chacune des unités géomorphologiques décrites dans la première partie. Une analyse comparative de la structure des quadrats de groupements de ligneux, est menée à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances. Cette analyse permet de dégager une typologie des grands types de structure du couvert ligneux rencontrés sur les sites étudiés et de mettre en évidence leurs variations spatiales entre et au sein des unités géomorphologiques.

A l'issue de ces deux étapes, l'analyse comparative des structures du couvert ligneux entre et au sein des unités géomorphologiques, est mise en relation avec les propriétés radiométriques et physiques de ces unités, dans le but de dégager des associations et de saisir de quelle façon cet indicateur traduit l'état du milieu sur les deux sites étudiés.

Lors de la conclusion, une présentation rapide des apports thématiques et de la méthode développée dans cette recherche, est donnée. Des perspectives ouvertes par ce type de travail, sont proposées, pour approfondir la connaissance du fonctionnement des écosystèmes sahéliens.

PARTIE I

**PRESENTATION DU MILIEU SAHELIEEN
ET DES REGIONS ETUDIEES**



1. LES CARACTÉRISTIQUES DU MILIEU SAHÉLIEN :

La zone sahélienne se situe entre la zone saharienne et la zone soudanienne, c'est à dire entre les latitudes 14° et 18°N dans la partie occidentale de l'Afrique et entre les latitudes 12° et 16°N au Tchad. En Afrique de l'ouest, le Sahel couvre d'ouest en est, les îles du Cap Vert, la partie septentrionale du Sénégal, la partie méridionale de la Mauritanie, la partie centrale du Mali, le nord du Burkina Faso, le sud du Niger, l'extrême nord du Cameroun et la partie centrale du Tchad et du Soudan (Fig.1).

Plusieurs critères permettent de définir ce domaine bioclimatique :

- **La pluviométrie :**

En effet, en raison de sa rareté ou de son insuffisance, l'eau constitue l'élément déterminant de ce milieu. Le Sahel est l'espace compris entre les isohyètes 200 et 700 mm (Courel, 1984). Le climat sahélien se caractérise par la faiblesse des précipitations et par l'existence de deux saisons contrastées : une saison sèche qui dure d'octobre à mai et une saison des pluies répartie de juin à septembre, permettant une agriculture pluviale. La distribution des pluies est marquée par une extrême irrégularité dans le temps et dans l'espace.

- **La géomorphologie :**

La limite sud du Sahel coïncide avec la limite méridionale des ensembles dunaires pléistocènes aujourd'hui fixés. Le Sahel, où les altitudes supérieures à 500 m sont exceptionnelles, est le domaine des plaines et des plateaux. A l'exception de l'Aouker et de l'Awana, tous les ergs sahéliens semi-fixés ou fixés présentent le même modelé. Ils se caractérisent par un système apériodique de cordons parallèles de longueur variable, séparés par des couloirs plus ou moins larges à substrat sableux. L'orientation des cordons est NE-SW à l'ouest et ENE-WSW à l'est. Les formations géologiques les plus fréquemment rencontrées sont : les dépôts du Continental terminal, les cuirasses ferrugineuses et/ou bauxitiques, les dépôts éoliens (les ergs représentent près de 50% de la superficie totale du Sahel), les dépôts superficiels colluviaux des plaines, des glacis ou des vallées des oueds, les éboulis de versants (Courel, 1984).

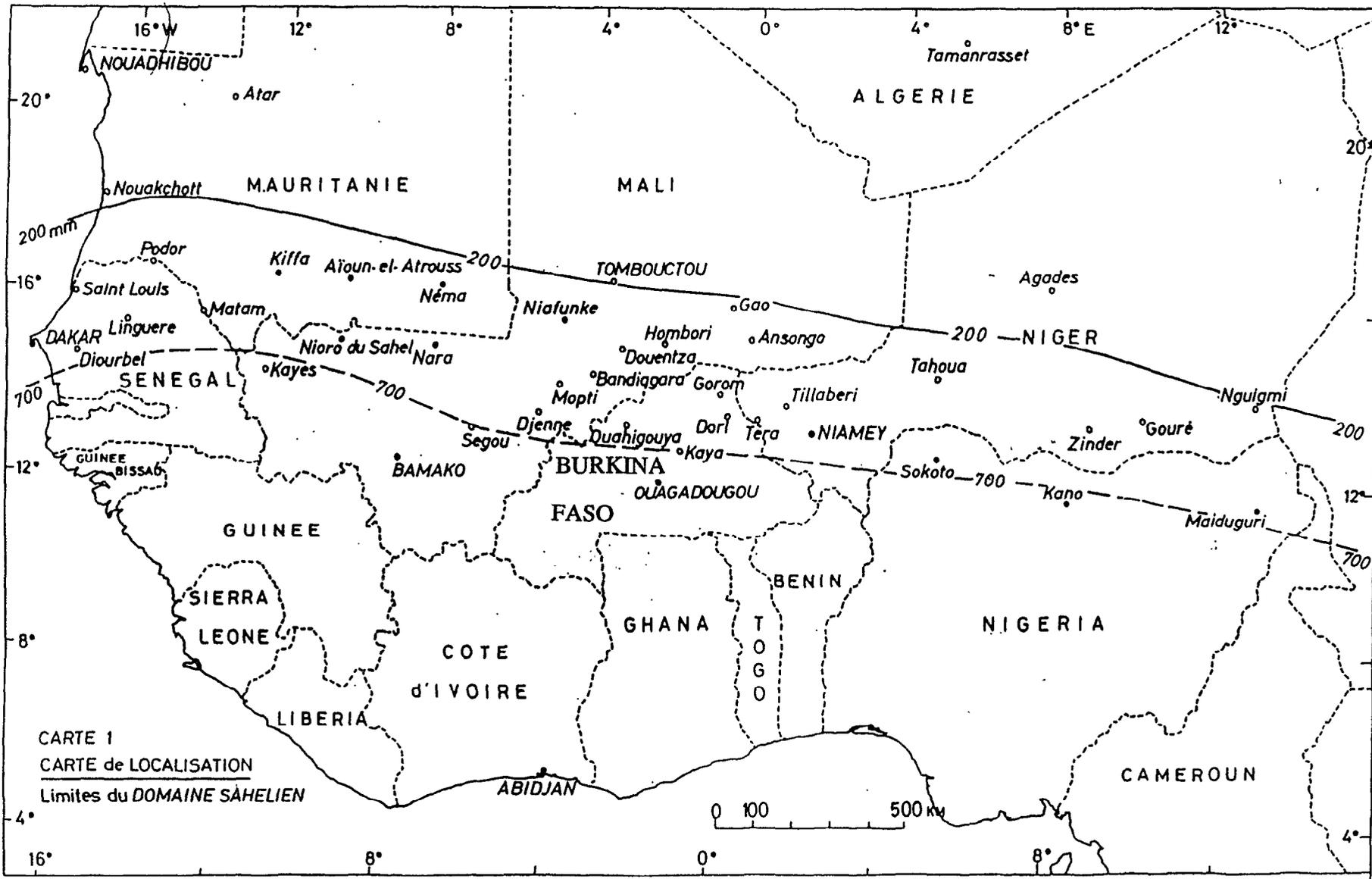


Figure 1 : Les limites spatiales du domaine sahélien (Courel, 1984)

- **Les sols :**

Les sols du domaine sahélien sont généralement peu évolués ou dégradés, leur profil est de type AC ou A(B)C. Leurs caractères sont pour la plupart hérités de périodes paléoclimatiques de nature et de durée différentes. Les sols à texture sableuse prédominent : sols minéraux bruts, sols brun-rouge subarides, sols ferrugineux tropicaux peu lessivés ou sols hydromorphes à pseudo-gley. Les états de surface ou formations superficielles de ces sols sont marqués par une alternance de surfaces couvertes en végétation, de sols nus et de surfaces encroûtées présentant un micro-relief plus ou moins marqué.

- **L'hydrologie :**

Le domaine sahélien est endoréique. Les pluies estivales, très inégalement réparties dans le temps et dans l'espace, d'abondance et d'intensité très variables, n'autorisent que le fonctionnement très irrégulier d'un réseau hydrographique de facture très ancienne (exception faite des fleuves Sénégal et du lac Tchad dont l'alimentation est allochtone ainsi que du fleuve Niger dont l'alimentation est en partie allochtone). L'endoréisme a des causes anciennes et récentes. Pendant le Pléistocène, le réseau hydrographique a été fortement oblitéré au moment de la mise en place des dunes et des ergs. C'est à ces barrages naturels que l'on doit l'existence de la plupart des mares permanentes ou semi-permanentes telle que la mare d'Oursi (Courel, 1977 et 1984).

- **La végétation :**

La couverture végétale typique du Sahel est la steppe arbustive et/ou arborée ; localement discontinue, elle se présente comme une mosaïque de formations variées ayant le même fond floristique. La steppe se compose d'un tapis herbacé discontinu parsemé d'arbres et d'arbustes (Aubreville, 1949) : la strate herbacée haute de 50 à 80 cm, est constituée d'espèces annuelles en dominance graminéennes (Courel, 1984). Les espèces herbacées les plus communes sont *Cenchrus biflorus*, *Schoenefeldia gracilis*, *Aristida mutabilis*, *Zornia glochidiata*.

La strate ligneuse comprend des arbustes (5 à 6 m) et des arbres (7 à 14 m) plus ou moins espacés. Elle est dominée par quatre familles : mimosacées, capparidacées, combrétacées et tiliacées. La plupart des arbres et des arbustes sont des espèces caducifoliées. Les espèces les plus fréquemment rencontrées sont : *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*, *Acacia raddiana*, *Pterocarpus lucens*, *Combretum glutinosum*, *Combretum micranthum*, *Combretum aculeatum*, *Adansonia digitata* ...

• **Les activités humaines :**

Dans le Sahel typique, l'utilisation des terres est principalement pastorale et traditionnellement transhumante (Sharman, 1987). L'élevage sahélien est totalement tributaire de la localisation des pâturages et de celle des points d'eau qui en conditionnent l'accès. Or les ressources fourragères, quantitativement et qualitativement, sont extrêmement dispersées dans l'espace et fluctuantes dans le temps. La recherche conjointe du fourrage et de l'eau entraîne une mobilité des pasteurs et de leurs troupeaux de plus ou moins grande amplitude (Milleville, 1989). Cette mobilité est dépendante de la distribution dans le temps et dans l'espace des pluies, qui influe sur la plus ou moins bonne reconstitution des pâturages. La nature condamne donc les pasteurs "à suivre les pluies" et à courir après les pâturages "annoncés".

"Le plus souvent, l'espace sahélien est partagé entre l'élevage et l'agriculture. Le mode d'exploitation pratiqué par l'un et l'autre système de production est extensif. Les activités élevage et agriculture sont imbriquées : les troupeaux pénètrent dans les champs en saison sèche. L'augmentation du cheptel au Sahel, liée aux progrès sanitaires de l'élevage et à l'accroissement de la population se traduit par une augmentation de la charge des pâturages. L'extension des périmètres cultivés suit étroitement l'accroissement de la population" (Toutain, 1978). Entre 1968 et 1988, la population humaine a doublé, mais le cheptel a été décimé à plusieurs reprises. Bien qu'il soit actuellement plus important qu'en 1968, sa répartition géographique a changé. Suite aux sécheresses successives, les pasteurs sahéliens et leurs troupeaux ont migré vers le sud ou ont abandonné l'élevage pour la ville. Si bien qu'aujourd'hui, les zones sensibles, comme le Gourma (Mali), le Tamesna (Niger) ... ont un couvert végétal en "bon état". Les grandes capacités de régénération de la végétation sahélienne combinées à une pluviométrie irrégulière et à une pression anthropique plus ou moins forte localement se traduisent par de grandes variations spatiales de l'état du couvert végétal dans les régions sahéliennes.

2. LA VÉGÉTATION EN MILIEU SAHÉLIEN :

2.1. Définitions :

Pour décrire la végétation ligneuse au sol et sur images, nous employons différents termes qu'il convient de définir :

- Les ligneux : ce terme désigne ici les arbres et les arbustes.
- L'arbre, l'arbuste : Ellenberg et Mueller-Donbois (1965-1966) parlent d'arbres pour les phanérophytes possédant un seul tronc bien différencié et d'arbustes pour les phanérophytes ramifiés pratiquement dès leur base.
- Le groupement de ligneux : désigne un groupe d'arbres et d'arbustes spatialement individualisé. Dans l'appellation botaniste, le groupement de ligneux correspond à l'élément de végétation ligneuse, que l'on définit ainsi : "on appelle *élément*, les différentes unités floristiquement, écologiquement et physionomiquement différenciées, dont l'imbrication plus ou moins régulière constitue une *communauté végétale* caractérisée par sa physionomie et sa structure, ainsi que par sa composition floristique et son écologie" (Gounot, 1969). Lors de cette étude, l'élément de végétation ligneuse est également désigné à l'aide des termes suivants : bosquet ou fourré, dans le cas des bandes boisées de la brousse tigrée.
- La formation végétale : Une formation peut être définie comme "tout groupement présentant une physionomie homogène et constante due à la dominance soit d'une ou de plusieurs espèces sociales, soit d'espèces ayant un caractère biologique commun" (Grisebach, 1880, cité par Lemée, 1978). Deux formations végétales sont analysées lors de cette étude : la steppe arborée et arbustive et la brousse tigrée (cf. §2.2., partie I).

On distingue deux grands modes de distribution spatiale des arbres et des arbustes au sol : le mode diffus, appelé aussi piquetis et le mode contracté, où les individus sont regroupés en petites unités spatialement distinctes :

- Le piquetis d'arbres et d'arbustes se rencontre sur l'ensemble des secteurs étudiés : les bandes dunaires et les espaces interdunaires, à l'exception des aires de brousse tigrée. Sur les deux sites étudiés, ce mode de distribution spatiale tend à être le fait de quelques essences particulières : *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Calotropis procera*, *Sclerocarya birrea*, *Combretum glutinosum*. Sur les images Spot, les individus, de taille inférieure à la surface prise en compte par le pixel (20/20 m), ne sont pas perceptibles, sauf dans le cas de très gros individus tels que les *Acacia albida* du village d'Oursi. Dans ce cas, généralement, leur

réponse spectrale est assimilée au sol sous-jacent.

- Le mode contracté se rencontre sur l'ensemble des sites étudiés. La succession dans l'espace de groupements de ligneux se traduit en vue verticale, par des structures sur les images. Ces unités de végétation ligneuse se caractérisent par la variété de leur taille, de leur composition floristique, de leur taux de recouvrement et de leur structure (cf §6., partie I).

2.2. La brousse tigrée :

La formation végétale la plus répandue en milieu sahélien est la steppe arbustive et arborée, telle que nous l'avons décrite précédemment (cf. §1., partie I). Une autre formation végétale occupe localement les milieux sahéliens et notamment le site d'Oursi, il s'agit de la brousse tigrée. La brousse tigrée est définie par une alternance de bandes boisées et de bandes nues, évoquant vues du dessus, le pelage d'un tigre. Celle-ci se caractérise par la spécificité de son environnement climatique et topo-édaphique, d'un cortège floristique, d'un mode de fonctionnement et enfin d'une structure en vue verticale, dont les formes et les variations de formes sont significatives de sa dynamique. L'exposé s'appuie sur les études des auteurs suivants : Clos-Arceud, 1956 ; Audry et Rossetti, 1962 ; White, 1970 ; Boudet, 1972 ; Leprun, 1978 et 1991 ; Ambouta et Icole, 1986 ; Cornet et al, 1988 ; Serpantié et al, 1988 ; Cornet, 1991.

Nous tentons de définir la brousse tigrée à l'aide des critères suivants :

• La pluviométrie :

La brousse tigrée se développe entre les isohyètes annuelles 250 et 750 mm. Cette formation végétale est caractéristique des domaines sahéliens et soudaniens. Elle disparaît au nord, quand les précipitations insuffisantes et aléatoires ne permettent plus le développement des ligneux. La brousse tigrée disparaît aussi au sud quand les conditions écologiques plus favorables permettent le développement d'une forêt claire ou d'une savane arborée (Ambouta, 1984).

• Le substrat :

La formation végétale "brousse tigrée" est généralement associée à des roches sédimentaires, schistes ou grès argileux non cuirassés au nord, cuirassés au sud (Leprun, 1991). Au Niger et au Mali (Séno-Mango), la brousse tigrée occupe les grès cuirassés du Continental terminal (Boudet, 1972, Ambouta, 1984).

Les sols des brousses tigrées sont azonaux et peu évolués, quelque soit leur latitude.

• **La topographie :**

Les brousses tigrées s'étendent sur des terrains à topographie plane, avec des pentes allant de 1 à 3% (Boudet, 1984 ; Serpantié et al, 1988 ; Leprun, 1991). "Les paysages de "brousse tigrée" (Mali) sont associés à des ondulations de terrain à peine prononcées, soit géomorphologiques, soit modelées sous l'effet de l'érosion en nappe et des vents" (Boudet, 1984).

"les bandes sont disposées perpendiculairement à la pente générale (Fig.2). Les bandes couvertes ont des pentes faibles, toujours inférieures à 1,6%, ce qui les distingue des bandes nues, dont les pentes peuvent dépasser 2,4%. Les touffes de végétation ligneuse sont en général placées en légère surélévation" (Ambouta, 1984). Boudet, 1983, signale la présence des bandes boisées dans les creux topographiques à propos d'une séquence située dans le Séno-Mango (Mali) : "Le modelé faiblement ondulé, est constitué de replats cuirassés et gravillonnaires nus ou très faiblement colonisés et de petites dépressions circulaires d'environ 40 à 50 m de diamètre et de 1 à 2 m de profondeur dans lesquelles prolifère une végétation bien fournie".

• **Une composition floristique :**

La composition floristique de la brousse tigrée change du nord vers le sud où les espèces à affinité soudanienne deviennent dominantes. Dans la région d'Oursi, les bandes boisées sont colonisées par les espèces ligneuses suivantes : *Combretum micranthum*, *Pterocarpus lucens*, *Acacia ataxacantha*, *Guiera senegalensis*, *Grewia flavescens*, *Commiphora africana*, *Boscia senegalensis*, *Boscia angustifolia*, *Combretum nigricans*. La strate herbacée est composée des espèces suivantes : *Pennisetum pedicellatum*, *Eragrostis tremula*, *Schoenfeldia gracilis*, *Zornia glochidiata*
....

• **Un mode de fonctionnement :**

On distingue généralement cinq unités dans le sens longitudinal des bandes boisées (Ambouta, 1984, Cornet, 1991) (Fig.3) :

- une frange de colonisation composée d'herbacées et de jeunes arbustes sur un recouvrement sableux peu épais ;
- une zone boisée, couverte d'une végétation ligneuse dense à port buissonnant. On distingue dans cette zone : en bordure amont, une végétation arbustive dense et très vigoureuse, dans la partie centrale à frondaison fermée, quelques grands arbres et

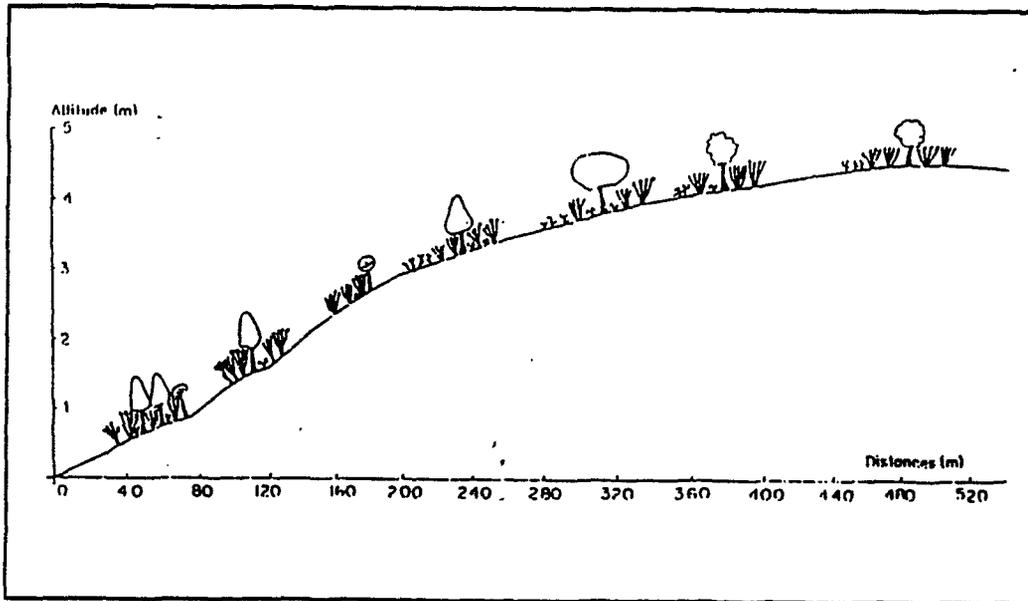


Figure 2 : La répartition des bandes boisées de la brousse tigrée par rapport à la pente (Ambouta, 1984)

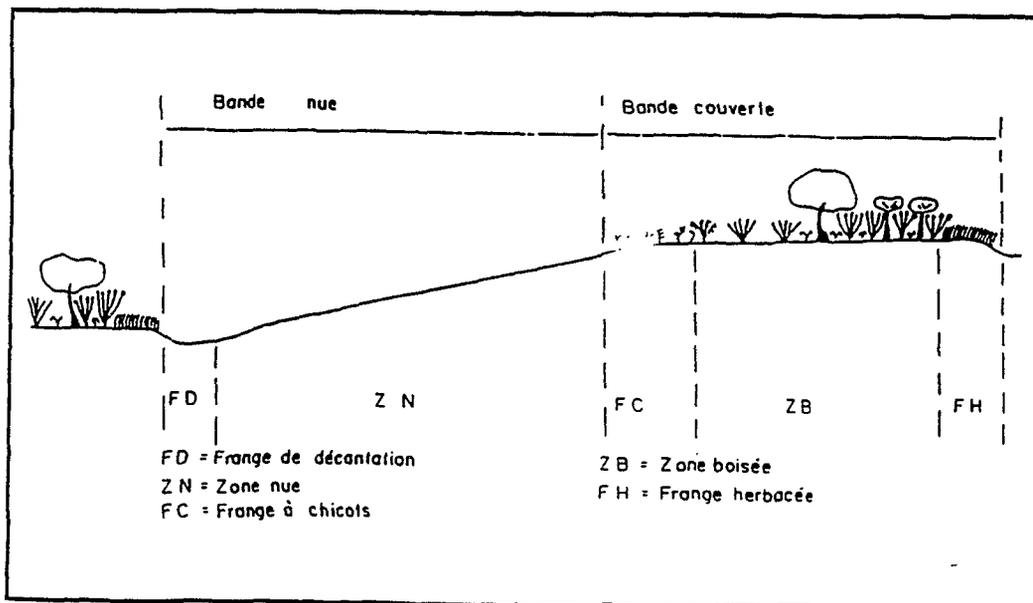


Figure 3 : Séquence modale du faciès brousse tigrée (Ambouta, 1984)

une bordure aval assez diffuse, à végétation plus prostrée, moins vigoureuse et clairsemée. "Dans ces zones boisées, le couvert herbacé est quasiment inexistant lorsque la frondaison est fermée, il apparaît en maigres touffes quand la voûte s'ouvre" (Ambouta, 1984) ;

- une frange à chicots occupée par des troncs d'arbustes morts ;
- une zone nue limoneuse ou argilo-sableuse ;
- une zone nue étroite formant cuvette, où s'accumulent les éléments fins transportés par les eaux de ruissellement, appelée frange de décantation.

La structure de la brousse tigrée a pour conséquence, la création de véritables impluviums au niveau de chacune des plages nues, au bénéfice des zones périphériques boisées. La composition floristique des bandes boisées de "brousse tigrée" montrent qu'elles constituent des jalons contractés avancés d'espèces à affinité sud-sahélienne et soudanienne au sein de régions nord-sahéliennes et saharo-sahéliennes (Boudet, 1979). Les espèces à écologie plus humide retrouvent, dans le biotope privilégié que constituent les bandes boisées, des conditions de milieu qui correspondent à celles dont elles disposent plus au sud. Les bandes boisées de la brousse tigrée équivalent à un écosystème humide en milieu subaride.

• **Une structure en vue verticale :**

La taille et la forme des bandes boisées varient sous l'effet de plusieurs paramètres : Ambouta évoque l'influence de la microtopographie sur les variations du faciès de brousse tigrée rencontré au Niger : sur les surfaces ondulées, les bandes s'organisent en couronnes concentriques (brousse tigrée à rosaces). Sur les plateaux réduits par l'érosion à une étroite lanière, les bandes boisées sont parallèles aux escarpements bordiers. Fréquemment sur les plateaux les plus larges, la brousse tigrée s'organise en bandes distinctes sur les bordures du plateau et l'organisation en brousse tigrée disparaît vers le centre dans un faciès plus confus.

Sur le terrain d'Oursi, nous avons observé au sol, des modifications au sein de la structure de la brousse tigrée en liaison avec les variations de l'épaisseur des épandages sableux : les fourrés les plus grands et les plus espacés (Photo 4, p. 39) s'étendent sur des sols où le recouvrement sableux est le plus mince et où la cuirasse affleure. Ces fourrés ont aussi un spectre floristique plus diversifié par rapport aux secteurs voisins de brousse tigrée, composée de petits fourrés rapprochés (Photo 3, p. 39). On remarque cependant, une forte densité de bois mort dans les grands fourrés. Dans l'aire de brousse tigrée à petits fourrés, ceux-ci sont jointifs, les bandes nues ne sont pas toujours des bandes, mais souvent des auréoles. La surface du sol est limono-sableuse avec localement des fentes de retrait. Les ligneux sont en bon état, à

port buissonnant.

La largeur relative des bandes est un bon indicateur de l'adaptation de la structure de la brousse tigrée aux conditions climatiques : un élargissement des bandes nues reflète une baisse de la pluviométrie, à l'inverse, un accroissement de la surface des bandes boisées traduit une augmentation du total des pluies (Ambouta, 1984).

La structure spatiale de la brousse tigrée constitue une forme d'adaptation de la végétation aux conditions d'aridité. Elle semble être l'aboutissement de la contraction de la végétation ligneuse et herbacée sous des conditions hydriques et pédologiques particulières. La formation et l'évolution de la brousse tigrée sont dues à la conjugaison de plusieurs facteurs parmi lesquels : la nature sédimentaire du substrat, le modelé plat ou peu accentué, les sols peu épais et peu évolués, l'endoréisme, l'érosion hydrique et la direction des vents. On évoque aussi la présence de diaclases qui favoriseraient l'infiltrabilité de l'eau sous les bandes boisées, l'activité termitique, le surpâturage (Audry et Rosseti, 1962 ; White, 1970 ; Boudet, 1972 ; Leprun, 1991).

Cette formation végétale apparaît localement fortement dégradée pour les besoins anthropiques : pâturage, déboisement pour la mise en culture et pour la fourniture de bois de feu, notamment à proximité des voies de communication et des villes. Une exploitation intensive des zones boisées accélère les processus de dénudation : la matière organique, autrefois maintenue sous les bandes boisées est dispersée, les agrégats se détruisent rapidement, les éléments fins se dispersent et colmatent la porosité. Les processus de ruissellement en sont accrus jusqu'à conduire à la dégradation complète du sol, par augmentation de graviers due à une soustraction des fines particules, au décapage et à la stérilisation de l'horizon de surface. "La sécheresse se trouve à l'origine indirecte de cette situation puisqu'elle a incité à l'exploitation par les caprins de la brousse tigrée, protégée auparavant par son accès difficile" (Serpantié et al, 1988).

Nous retiendrons de ces descriptions, l'existence d'une formation végétale spécifique d'un domaine climatique et pédologique, dont l'organisation spatiale conduit à une optimisation des ressources hydriques, par une alternance de bandes boisées jouant le rôle de récepteur et de réservoir et de bandes nues jouant le rôle d'impluvium. Enfin, la structure de la brousse tigrée bien perceptible sur les photographies aériennes et sur les images Spot XS, est un bon marqueur de son état et des divers facteurs (climatiques, anthropiques) qui influent sur son état.

2.3. Les facteurs de la croissance et de la distribution spatiale de la végétation en milieu sahélien :

La croissance et la distribution dans l'espace de la végétation en zone sahélienne, sont soumises à l'action de nombreux facteurs écologiques interdépendants dont le facteur déterminant est l'eau. Le comportement des végétaux est conditionné par les apports hydriques et leur redistribution en fonction de la topographie, des états de surface et des types de sols. "L'hétérogénéité de la répartition de la végétation, en relation avec la redistribution de l'eau, semble être une règle quasi générale en zone aride et semi-aride" (Cornet, 1991).

Nous analyserons successivement l'influence des ressources hydriques, de la topographie, des sols et des états de surface, et enfin, du stress anthropique. Cet exposé est consacré en majeure partie à la végétation ligneuse, qui fait l'objet de notre étude.

• Les ressources hydriques :

Le cycle annuel et pluriannuel des apports hydriques conditionne l'activité physiologique et phénologique des végétaux. Lors du cycle annuel, la succession d'une saison humide et d'une saison sèche entraîne des variations de l'état foliaire des individus et induit leur date de floraison et de fructification. L'état foliaire des ligneux est dans le cas d'une étude à l'aide d'image satellitaire, particulièrement important. Compte tenu de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations, ce paramètre peut expliquer les modifications de la réponse spectrale, influencées par une activité chlorophyllienne réduite, sans pour autant qu'il y ait dépérissement des ligneux.

L'analyse de l'évolution mensuelle de l'état foliaire des espèces suivantes : *Boscia senegalensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, *Acacia nilotica*, *Pterocarpus lucens*, *Ziziphus mauritiana*, *Sclerocarya birrea*, *Combretum aculeatum*, *Anogeissus leiocarpus*, *Guiera senegalensis*, *Acacia seyal*, *Grewia bicolor*, *Commiphora africana* (Chevallier, 1930, Bille, 1976, Piot, Nebout, Nanot, Toutan, 1980, Courel, 1984), signale que ces ligneux sont feuillus de juillet à janvier (Fig.4). C'est en effet, ce que nous avons constaté sur le terrain de novembre à janvier, à l'exception de *Commiphora africana*, qui se présentait le souvent défeuillé.

De février à juin, pendant la saison sèche, de nombreuses espèces perdent leurs feuilles : *Anogeissus leiocarpus*, *Guiera senegalensis*, *Acacia seyal* et *Commiphora*

Légende

■ ■ ■ ■ FEUILLES PRESENTES

□ □ □ □ FEUILLES RARES ou ABSENTES

- | | | | |
|---|---|----|------------------------------|
| 1 | <i>BOSCIA senegalensis</i> | 7 | <i>ACACIA laeta</i> |
| 2 | <i>BALANITES aegyptiaca</i> | | <i>COMBRETUM aculeatum</i> |
| | <i>MITRAGYHA inermis</i> | 8 | <i>ANOGEISSUS lelocarpus</i> |
| 3 | <i>ACACIA</i> var <i>nilotica</i>
var <i>adansonii</i> | 9 | <i>GUIERA senegalensis</i> |
| 4 | <i>PTEROCARPUS lucens</i> | 10 | <i>ACACIA seyal</i> |
| 5 | <i>ZIZIPHUS mauritiana</i> | 11 | <i>GREWIA bicolor</i> |
| 6 | <i>SCLEROCARYA birrea</i> | 12 | <i>COMMIPHORA africana</i> |

Diagramme central : variations mensuelles de l'humidité relative de l'air - station de TILLABERI (1960-1970)

==== valeurs supérieures à la moyenne annuelle (45%)

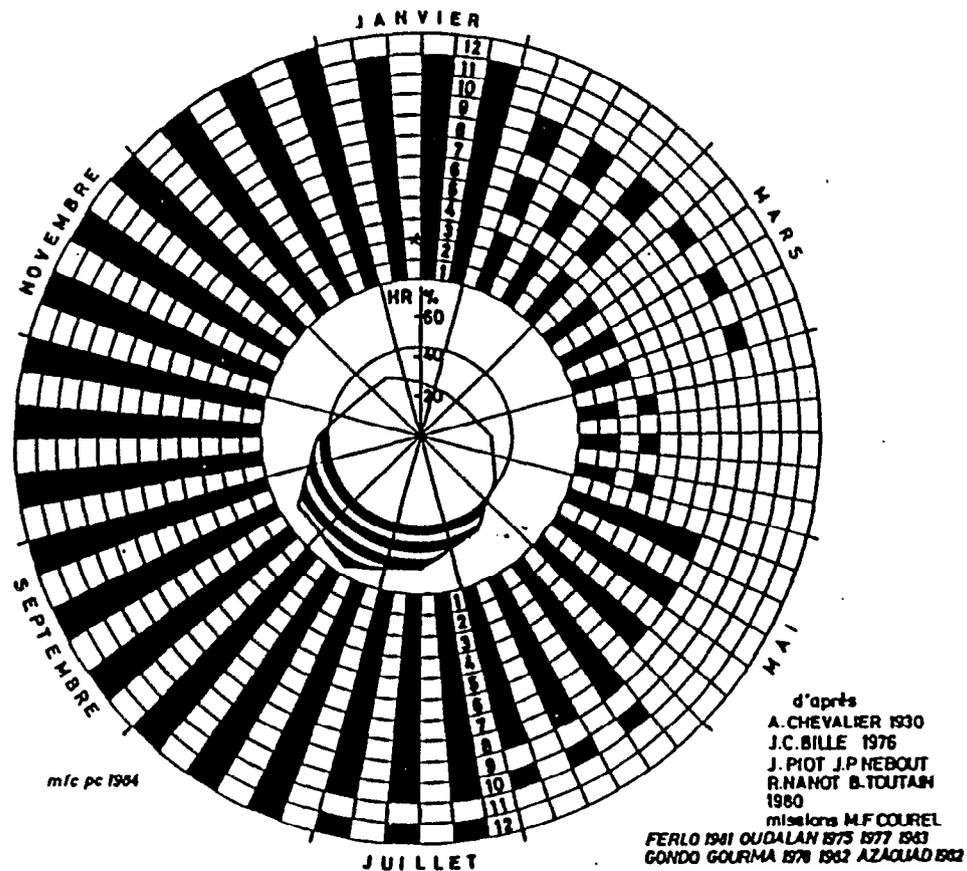


Figure 4 : Evolution mensuelle de l'état foliaire de quelques ligneux de la zone sahéenne (Courel, 1984)

africana ont perdu leurs feuilles. On notera cependant que *Boscia senegalensis* et *Balanites aegyptiaca*, les deux espèces les plus répandues sur les deux sites étudiés, conservent leurs feuilles toute l'année.

Une étude phénologique de la végétation met en évidence l'ajustement de son activité métabolique aux conditions écologiques immédiates : la date des précipitations, comme leur importance viennent modifier le calendrier phénologique et dans des conditions extrêmes (sécheresse de 1972), certaines phases du développement peuvent être considérablement réduites ou disparaître (Poupon, 1980 ; Grouzis et Sicot, 1980 ; Grouzis, 1990). Certaines de ces perturbations sont perceptibles plusieurs années de suite. Par exemple, la défoliation sévère dans une année donnée peut conduire à une production ligneuse réduite de 25% dans l'année suivante (Piot, 1983).

Les effets de la sécheresse se traduisent de façon générale par une limitation de la croissance des individus pouvant aller jusqu'à leur dépérissement. Cette limitation s'opère différemment en fonction des espèces et des milieux.

Sur la strate ligneuse, on observe :

- le ralentissement de la croissance des individus et des perturbations de la phénologie : baisse de la floraison, de la fructification et de la production foliaire, l'absence de régénération. Cependant, certains ligneux, même dans des conditions pluviométriques difficiles, gardent leur feuillage tout au long de l'année, comme *Boscia senegalensis*, *Balanites aegyptiaca* et *Mitragyna inermis* (Courel, 1984).
- l'appauvrissement du spectre floristique voire la disparition de certaines espèces (*Grewia bicolor* au Ferlo, *Pterocarpus lucens* à Oursi). Poupon commente les effets de la sécheresse de 1972 à Fété-Olé (Ferlo) : "Si la sécheresse a eu pour effet des modifications quantitatives importantes du peuplement ligneux, elle n'a pas entraîné de véritables changements qualitatifs, quelle que soit la strate envisagée (ligneuse ou herbacée), il n'y a eu ni apparition de nouvelles espèces à caractère xérophile marqué témoignant de la transformation du milieu extérieur, ni disparition d'espèces présentes à Fété-Olé". Des comptages de fréquence des individus, effectués sur ce même site entre 1976 et 1983, ont mis en évidence une perte importante des ligneux, surtout parmi les populations d'*Acacia senegal*, *Grewia bicolor* et *Commiphora africana* (Sharman, 1987).
- l'augmentation du taux de mortalité des arbres et arbustes dans les bio-unités les plus sensibles : sommet de dune, glacis d'érosion, glacis d'épandage et affleurements rocheux et la tendance à la généralisation du mode contracté dans les bio-unités les plus favorables : talweg, couloir, dépression intradunaire ... Une bio-unité est définie par la nature, la texture, les ressources en eau des sols et la nature

de la couverture végétale, eux-mêmes déterminés par les conditions particulières induites par la topographie.

Sur la strate herbacée, un amoindrissement des ressources hydriques entraîne :

- le raccourcissement du cycle végétatif ;
- la réduction de la taille des plantes, de la fructification et la diminution du stock de graines : quand les pluies sont trop espacées, les plantes meurent avant la production de graines ;
- l'appauvrissement du spectre floristique et le maintien des espèces les plus résistantes à la sécheresse : si la quantité des apports hydriques est un facteur important du développement de la couverture herbacée, la répartition des pluies dans le cycle joue un grand rôle notamment au moment de la mise en place de la végétation. L'abaissement du potentiel hydrique diminue non seulement la capacité de germination mais aussi la vitesse. De plus, le délai de germination augmente. Certaines espèces supportent plus difficilement que d'autres le stress hydrique : *Aristida mutabilis* est très sensible au déficit hydrique, à l'inverse de *Zornia glochidiata*, *Schoenefeldia gracilis*, *Cenchrus biflorus* ..., plus résistantes (Grouzis, 1988 ; Grouzis, 1991).

• **La topographie, les sols, les états de surface :**

Le facteur topographique intervient dans la redistribution de l'eau à l'échelle des versants sous l'action du ruissellement. Le ruissellement, particulièrement intense lors de fortes précipitations, favorise l'accumulation des eaux et des éléments fins dans les points bas. En milieu dunaire, la réserve d'eau des sommets et des versants de dunes est généralement de courte durée. Elle varie considérablement en fonction des précipitations de l'année et de leur répartition. En bas de pente et en bas-fond, au contraire, quelle que soit la pluviométrie de l'année, le bilan hydrique est plus favorable et l'existence de réserves en profondeur est propice au développement des ligneux (Cornet, 1991).

Nous avons observé dans le Seno Mango (Mali), l'influence de la pente sur le développement de la végétation ligneuse : les dépressions dont les versants sont fort pentus, sont occupées par des bosquets chétifs, par contre les dépressions très peu marquées, où la déclivité des versants est à peine perceptible, sont colonisées par une végétation ligneuse abondante. Ceci est lié à la vitesse d'infiltration des eaux en milieu sableux et au rapport entre ravinement et infiltration.

Les qualités physico-chimiques des sols, leur profondeur et les capacités d'infiltration et de rétention de l'eau, en association avec la pluviométrie, jouent un rôle primordial

sur la croissance du système racinaire et le développement de l'individu. En raison de ces caractéristiques, les sols constituent ou non de bons substrats à la croissance de la végétation. Les formations végétales sont d'autant plus stables qu'elles se situent sur un substrat plus sableux (Poupon, 1980). Là encore, la topographie joue un rôle dans l'évolution des sols dont la différenciation est due pour l'essentiel à la dynamique interne et externe de l'eau le long des toposéquences (Cornet, 1991).

La présence de nombreuses taches nues pelliculaires ou croûtes de surface (Casenave et Valentin, 1987) constitue un frein à la colonisation du couvert végétal. Ces taches nues pelliculaires résultent de la combinaison de facteurs pédologiques, climatiques et végétaux : la sécheresse entraîne la disparition du couvert herbacé là où les réserves hydriques sont les plus faibles. Le sol nu est soumis, même sous de faibles pluies, à des processus de réorganisation superficielle qui conduisent à la désagrégation du sable et des éléments fins. Ces derniers s'indurent sous une forme pelliculaire, alors que les sables balayés par le vent s'accumulent en micro-buttes, piégés par les herbes et les arbustes qui sont maintenus dans les zones à réserves hydriques plus élevées (Barral et al, 1983).

Au fur et à mesure que s'avance la saison sèche, le couvert herbacé sec devient de plus en plus discontinu et ne protège plus les sols, ce qui entraîne une exacerbation de l'érosion hydrique et éolienne.

La dénudation des sols favorise, au début de la saison des pluies, le ruissellement sur les versants des dunes et sur les glacis. Le ruissellement en nappe entraîne des colluvions colmatantes (argiles et limons) qui forment ainsi des croûtes pelliculaires, sur lesquelles les graines ne peuvent ni se fixer, ni germer. Des glaçages superficiels résultent aussi du choc des gouttes de pluies (Valentin, 1985). Les processus d'induration limitent la pénétration de l'eau. Les petites pluies s'infiltrent mieux que les pluies orageuses qui ruissellent.

La baisse de la perméabilité entraîne une augmentation du ruissellement, des ravinements et le bon remplissage des mares. La baisse de la perméabilité se traduit aussi par une baisse de l'infiltration et du niveau des nappes superficielles, qui influe directement sur le développement de la végétation et notamment sur celui des ligneux.

Même si les vents actuels sont peu véloces, la disparition du couvert végétal exacerbe la déflation éolienne. Des cuvettes de déflation se forment autour des arbres sous l'action combinée du vent et du ruissellement, entraînant leur déchaussement. Les particules fines (sables fins, argiles et sables) devenues mobilisables sont remaniées

par les vents. On assiste ainsi à la formation de dunes vives (par exemple, l'erg vif d'Oursi et les dunes vives sur les bordures de la vallée du Sénégal, sur le Dieri au nord du Ferlo), à la création de plages décapées rendant la reprise de la végétation plus difficile. Par contre, l'amoncellement de particules fines au pied des obstacles, constitue des lieux privilégiés de reconquête de la végétation herbacée dans un premier temps, puis, de la végétation ligneuse.

• **Les activités humaines :**

La dégradation du couvert végétal est liée aux conditions pluviométriques défavorables, mais aussi aux activités pastorales et agricoles (défrichage et mise en culture, feux, pâturage, coupes de bois).

L'exploitation intensive de l'écosystème par le bétail, soit par son action propre, soit associée à des conditions climatiques difficiles, a un rôle essentiel dans la modification du couvert végétal : taux de recouvrement, diversité du spectre floristique. La multiplication d'autres espèces qui tendent à devenir par endroits monospécifiques, par exemple, la multiplication de *Balanites aegyptiaca* et de *Boscia senegalensis* dans le Ferlo "du fait de l'action du bétail seule ou liée à la faiblesse de la pluviométrie" (Diallo, 1984). "L'extension des cultures contribuerait à la destruction du couvert herbacé des formations dunaires et entraînerait une perte de fertilité des sols, par l'éolisation des particules fines et la remobilisation des sables grossiers. La mise en culture des terres s'accompagnerait fréquemment de l'élimination du couvert ligneux, soit pour lutter contre la nidification des oiseaux granivores, soit tout simplement pour nettoyer les terres à cultiver, en particulier les dépressions interdunaires" (Barry et al, 1983).

3. LA PERCEPTION DU PAYSAGE À L'AIDE DES DONNÉES SATELLITAIRES :

3.1. La nature des informations fournies par le satellite SPOT :

Les capteurs du satellite SPOT enregistrent l'énergie solaire réfléchi par les objets de la surface terrestre, dans les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge.

Le satellite SPOT est équipé de deux capteurs HRV (Haute résolution visible) et d'un ensemble d'enregistrement des données sur bande magnétique et de transmission vers le sol. Le capteur HRV possède deux modes de fonctionnement : un mode "panchromatique" qui correspond à une observation dans le visible (510 nm à 730 nm) avec un pas d'échantillonnage de 10 mètres et un mode "multibande" qui correspond à une observation dans les trois bandes spectrales :

XS1 : 500 nm à 590 nm (jaune-vert),

XS2 : 615 à 680 nm (rouge),

XS3 : 790 à 890 nm (proche infrarouge),

avec un pas d'échantillonnage de 20 mètres. Une scène SPOT multispectrale comporte environ 3000 lignes et 3000 colonnes, ce qui équivaut à une surface au sol d'environ 60 km de côté.

Les valeurs enregistrées correspondent à des valeurs de flux réfléchi par les objets de la surface terrestre, c'est à dire à des valeurs de luminance (Tableau 1). Celle-ci représente la puissance émise dans une direction d'angle solide par unité de surface normale au faisceau ; la réflectance est le rapport de l'énergie réfléchi à l'énergie incidente dans une longueur d'onde donnée (Courel, 1984). On considère que dans un canal donné, les variations entre les valeurs de luminance pour des objets différents se font dans le même sens, que les variations des valeurs de réflectance mesurées sur le terrain pour ces mêmes objets (Girard, 1989).

3.2. La spécificité du comportement spectral de la végétation :

La description du comportement spectral de la végétation s'inspire en grande partie de l'ouvrage "Réponse spectrale des végétaux" de Bariou, Lecamus, Le Henaff, 1985.

Grandeur radiométrique	Définition ; expression	Unité	Dénomination anglo-saxonne
Energie	Energie rayonnée par une source dans tout l'espace environnant ; E	Joule (J)	Radiant energy
Flux	Energie rayonnée par unité de temps ; $\Phi = dE/dt$	Watt (W)	Radiant flux
Intensité énergétique	Flux émis dans un angle solide, selon une direction donnée ; $I = d\Phi/d\Omega$	$W.sr^{-1}$	Radiant intensity
Luminance	Intensité énergétique émise d'un élément de surface dS considéré dont la normale est inclinée de θ par rapport à Ox ; $L = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dS \cos \theta}$ (fig. 2.3)	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	Radiance
Eclairement	Flux reçu par unité de surface ; $E_r = d\Phi/dS$	$W.m^{-2}$	Irradiance
Émittance	Puissance émise par unité de surface, dans une hémisphère ; $M = \pi L$	$W.m^{-2}$	Radiant exitance
Réflectance	Rapport de l'émittance à l'éclairement ; $\rho = \frac{M}{E} = \frac{\pi L}{E}$		Réflectance

Tableau 1 : Définitions de la nature des données satellitaires (Cassenet, 1985)

De manière générale, la réponse spectrale des végétaux (Fig.5) se caractérise par :

- une forte absorption dans les longueurs d'onde du visible, notamment dans le bleu et dans le rouge : l'absorption est principalement déterminée par la composition, la concentration et la distribution des pigments dont principalement la chlorophylle. Cette absorption se traduit par une diminution de la réflectance dans les longueurs d'onde de 350 à 500 nm et de 600 à 700 nm,
- un niveau d'absorption plus faible et une réflectance plus élevée de 500 à 600 nm, par rapport aux régions Bleu et Rouge adjacentes,
- une réflectance élevée dans le proche infra-rouge (750 à 1500 nm) : dans ces longueurs d'onde, la réflexion n'a pas de rapport avec la couleur du feuillage mais dépend de la structure interne des feuilles.

La plus grande partie de la réflectance est liée à la radiation solaire, une petite partie provient des pigments qui, après avoir absorbé le rayonnement dans l'Ultra Violet et le Visible, restituent une certaine quantité de cette énergie comme fluorescence à une longueur d'onde plus élevée.

Ces caractéristiques spectrales se traduisent sur les images Spot, par une valeur de luminance plus élevée dans le canal XS1, une valeur plus faible en XS2 et une valeur très élevée en XS3.

La réponse spectrale des végétaux est soumise à de nombreuses variations, en fonction des espèces, de leur état physiologique et phénologique et sous l'effet de multiples facteurs. Elle dépend :

- de l'état de surface des feuilles (brillant, mat, lisse, pubescent), de leur exposition, de leur inclinaison et de leur couleur ou de leur pigmentation ;
- de la teneur en eau : dans le visible et le proche infra-rouge, on constate en général une augmentation de la réflectance à mesure que croît la déshydratation des feuilles ;
- de l'âge de la feuille : de manière générale, la réflectance est plus forte pour les jeunes feuilles. La réflectance des feuilles adultes varie peu. La sénescence se traduit, suite à la destruction des pigments, par une augmentation de la réflectance particulièrement sensible dans les bandes d'absorption du visible et une diminution de la réflectance dans le proche infra-rouge ;
- de la superposition du nombre de couches de feuilles qui se traduit par une augmentation de la réflectance. On observera donc une réflectance plus élevée au centre des frondaisons que sur les bordures ;
- du degré d'ouverture du houppier qui commande l'importance des ombres, des branches et des feuilles inférieures, enfin du sol dans la réponse enregistrée ;

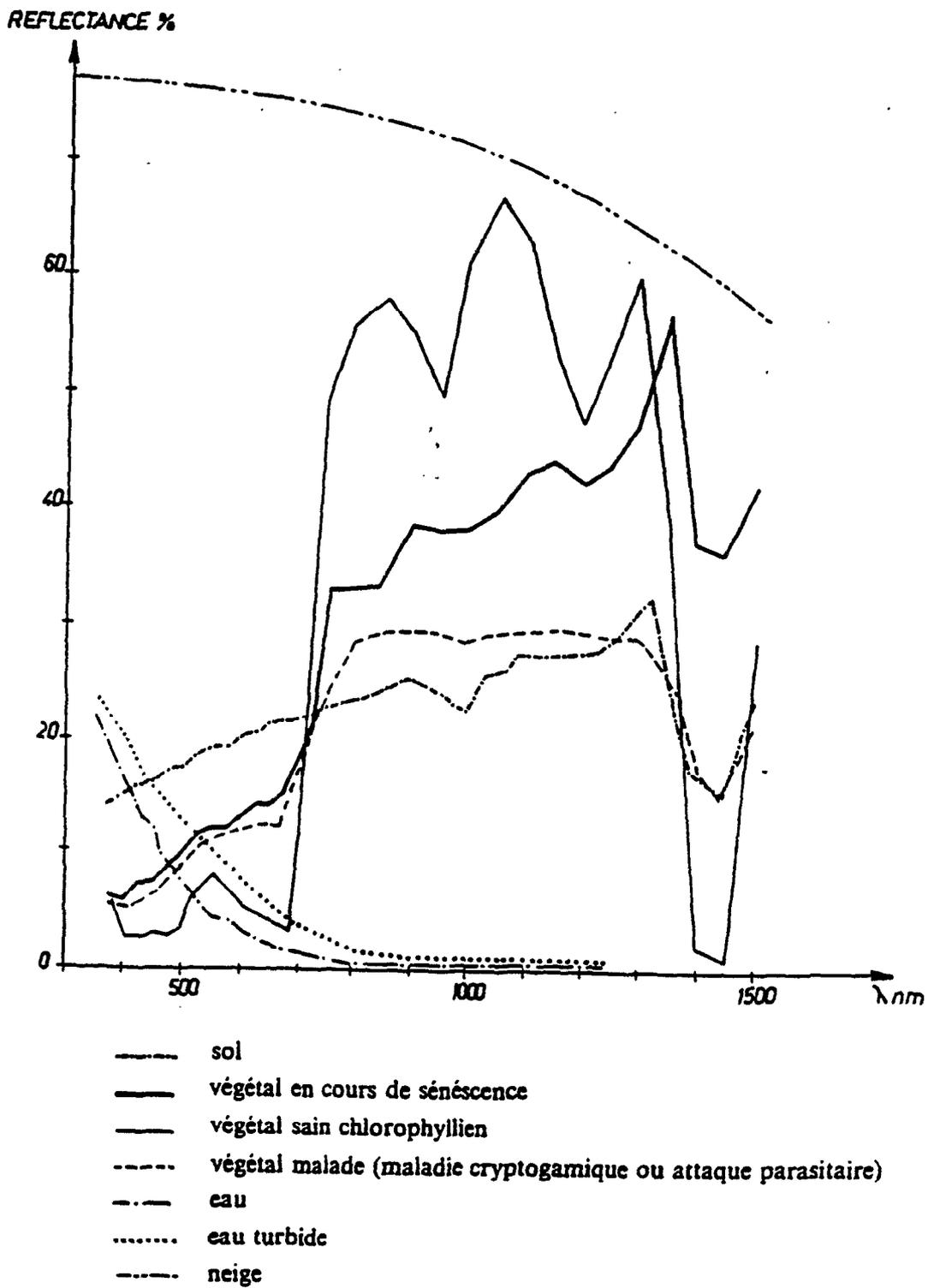


Figure 5 : Les courbes de réflectance de végétaux, d'un sol et de l'eau (Girard, 1989)

- de la densité du peuplement : il faut au moins 40 à 60% de couvert pour que la réflectance soit significative de la végétation. L'association et la distribution relative des espèces ainsi qu'une phénologie non uniforme des composantes du couvert interviennent aussi dans les variations de la réponse spectrale.

L'environnement interfère de façon plus ou moins complexe dans la réponse spectrale d'un couvert végétal par : la pente, la couleur du sol, la teneur en eau du sol qui influe sur l'évaporation et la température au sol ...

Enfin, la réponse spectrale dépend de la géométrie de la visée par le biais de l'angle d'élévation solaire, de l'angle zénithal de visée, des conditions météorologiques (vitesse du vent, température de l'air, nébulosité).

Par comparaison, la courbe de réflectance d'un sol nu (Fig.5) présente, contrairement à celle d'un végétal chlorophyllien, la particularité d'être régulièrement croissante et convexe depuis le visible (400 nm), jusqu'au proche infrarouge (1300 nm). Divers paramètres interviennent sur la réflectance des sols nus, que nous analysons ici à l'aide de l'ouvrage "Télédétection appliquée : Zones tempérées et intertropicales" de Girard et Girard, 1989 :

- Suivant leur état de surface, plus ou moins rugueux, les sols nus auront une réflectance plus ou moins forte. Les sols lisses ont une réflectance, entre 500 et 1100 nm, supérieure à celle des mêmes sols rugueux, et ce, quelle que soit l'humidité.
- Par ailleurs, selon leur composition chimique, leur teneur en eau,... leur réflectance variera, mais l'allure de la courbe sera toujours la même.
- La couleur est une résultante des diverses variables intrinsèques du sol, et en particulier, de la pierrosité, du fer, du calcaire, de la matière organique, ainsi que de l'humidité. Quand la couleur du sol est sombre, les courbes de réflectance présentent une forme concave jusque vers 800 nm. Quand la couleur du sol est de clarté moyenne, les courbes sont à peu près rectilignes jusque dans le proche infrarouge. Quand la couleur du sol est claire, les courbes de réflectance sont convexes : entre 600 et 800 nm, les pentes sont plus faibles qu'entre 600 et 400 nm ; entre 400 et 600 nm, plus la pente est forte, plus la couleur est pure ou rouge. Ces comportements spectraux se traduisent par des valeurs de réflectance plus élevées sur les sols clairs que sur les sols sombres.
- Lorsque tous les paramètres du sol sont constants, la réflectance diminue à mesure que l'humidité augmente, et ce, pour toutes les longueurs d'onde.

3.3. La composition colorée : une synthèse de l'information satellitaire :

La connaissance des comportements spectraux théoriques de la végétation et des sols permet de réaliser une première identification des principaux composants du paysage sur une composition colorée. Avec les données Spot, une composition colorée peut être réalisée à partir des trois bandes spectrales, à chacune desquelles on attribue une couleur primaire. On attribue aux longueurs d'onde de 500 nm à 590 nm (XS1), le cyan, aux longueurs d'onde de 615 à 680 nm (XS2), le jaune et aux longueurs d'onde de 790 à 890 nm (XS3), le magenta.

Pour l'interprétation de la composition colorée, des règles de base générales ont été définies (Dizier, Léo, 1980) :

- le rouge vif indique la végétation verte très active : les faibles valeurs de réflectance de la végétation en activité chlorophyllienne dans le visible (la quantité d'énergie renvoyée dans le vert est faible ; l'absorption est totale dans le rouge) et les fortes valeurs dans le proche infra-rouge, codé en magenta sur la composition colorée, se traduisent par la présence de rouge dans la couleur résultante sur la composition colorée,
- le rouge violet à marron-rouge : la végétation verte moins active ou en mélange,
- le marron-brun : indique de façon générale, la végétation au repos. Sur les images étudiées, cette couleur correspond aux unités de végétation ligneuse, où les individus ont une activité chlorophyllienne plus ou moins intense eu égard à la période et aux espèces.
- le bleu et le bleu-noir : l'eau,
- le bleu-vert : les sols recouverts d'herbes sèches, peu réfléchissants,
- le bleu, le gris-beige : les sols nus, assez réfléchissants, plus ou moins secs,
- le blanc : les sols nus très réfléchissants, très secs.

La composition colorée constitue une synthèse de l'information contenue dans les différentes longueurs d'onde. Son analyse permet d'identifier les composants du paysage et de percevoir leur distribution spatiale en vue verticale. Lors de cette étude, elle sera l'un des documents de référence pour évaluer la qualité des résultats des traitements opérés sur les images.

3.4. Les données utilisées :

Cette étude a été réalisée à l'aide d'images de télédétection et de données-terrain. Les images SPOT multispectrales utilisées lors de cette étude, sont les suivantes :

- pour le Sénégal : les images Spot du 24/12/86 et du 22/05/88, niveau de traitement 1B ;
- pour le Burkina Faso : les images Spot du 17/12/86 et du 27/05/87, niveau de traitement 1B.

Le niveau de traitement 1B signifie, selon les normes Spot, que l'image a subi des corrections radiométriques (correction d'égalisation des détecteurs par étalonnage sur des surfaces de référence) et des corrections géométriques (le nombre nominal d'éléments d'image est modifié afin de ramener la géométrie d'une image multibande à un pas d'échantillonnage constant de 20 m en ligne et en colonne). Ces corrections prennent en compte la rotation de la terre, l'effet panoramique et la courbure de la terre et les variations d'altitude de l'orbite du satellite (Guide des utilisateurs, SPOT, CNES).

Les dates de prise de vue des images ont été choisies en saison sèche, de manière à éviter une confusion dans la reconnaissance des groupements de ligneux avec les surfaces couvertes en majorité d'herbacées. Sur les images de saison sèche, les ligneux encore en activité chlorophyllienne, se distinguent bien spectralement des herbacées sèches.

Sur l'image d'Oursi, nous analysons le secteur NW de l'image, 1300 sur 900 pixels, soit 26 km sur 18 km au sol (Fig.8). L'image du Ferlo a été subdivisée, aux deux dates, en trois secteurs d'environ 1000 sur 1000 pixels soit 20 km sur 20 km au sol. Ces trois secteurs couvrent du nord au sud, la partie orientale de l'image Spot (Fig.10, p. 44).

Des photographies aériennes du Burkina Faso ont également été utilisées pour des comparaisons avec les résultats des classifications opérées sur les images : la mission U.A.G.I., 6022, 153.31, IGN France, 1981, SPOT HV 02 IRC, 1.50000.

Des missions terrain ont été effectuées, au Burkina Faso, en novembre 1987 et au Sénégal en décembre 1988 et janvier 1990.

4. DESCRIPTION GÉOGRAPHIQUE DE LA RÉGION D'OURSI :

Le secteur dunaire situé au nord de la mare d'Oursi, est localisé dans la province de l'Oudalan, au nord du Burkina Faso (14°40' à 14°50' de latitude nord et 0°20' à 0°40' de longitude ouest) (Fig.6).

• La pluviométrie :

La pluviométrie annuelle moyenne sur la période 1976-1984, enregistrée à la station météorologique de Jalafanka, est de 368 mm (Grouzis, 1988). La variabilité interannuelle de la pluviométrie est forte : entre 1976 et 1989, le minimum pluviométrique annuel enregistré, est de 204 mm à Jalafanka en 1983 et le maximum de 603 mm à Dori, situé plus au sud en 1976. En 1986, le secteur dunaire d'Oursi a reçu moins de 200 mm de pluies dans l'année (Lamachère, 1986).

Le graphique Fig.7, dressé à partir des totaux pluviométriques annuels sur les stations proches du site d'Oursi, illustre la baisse de la pluviométrie de 1965 à 1985 et la légère augmentation de 1985 à 1989 (cf. Annexe I).

• La géomorphologie :

L'aspect dominant de l'Oudalan est celui d'une pénéplaine parvenue à un stade d'évolution avancée. L'altitude varie de 250 à 340 m et émergent çà et là des reliefs dont l'altitude relative ne dépasse pas 200 m. L'armature du relief est principalement constituée par des cuirasses découvertes ou voilées d'une couche détritique, organisées en plans inclinés rayonnant autour des collines rocheuses birrimiennes (Boulet, 1967). On distingue les formations géologiques suivantes : les deux cuirasses ferrugineuses conglomératiques (cuirasse inférieure et cuirasse supérieure) et les cuirasses anciennes qui coiffent les hauts sommets cuirassés (cuirasses bauxitiques et cuirasses ferrugineuses pisolithiques) (Barral, 1977), les affleurements de grès allongés selon une orientation ENE-WSW, le massif de gabbros de Tin Edjar, culminant à 498m (Fig.6).

Ce substrat est recouvert par des dépôts éoliens mis en place au cours de deux épisodes distincts, dont l'un remonterait à 22 000 ans BP et l'autre de 7000 à 5000 BP, séparés par une période humide lacustre.

Au premier épisode correspond l'erg ancien au modelé très aplani, l'épaisseur de la couche de sable n'y dépasse généralement pas 2 à 3 mètres. Dans le secteur étudié, il apparaît principalement au SW de la mare d'Oursi (Fig. 8).

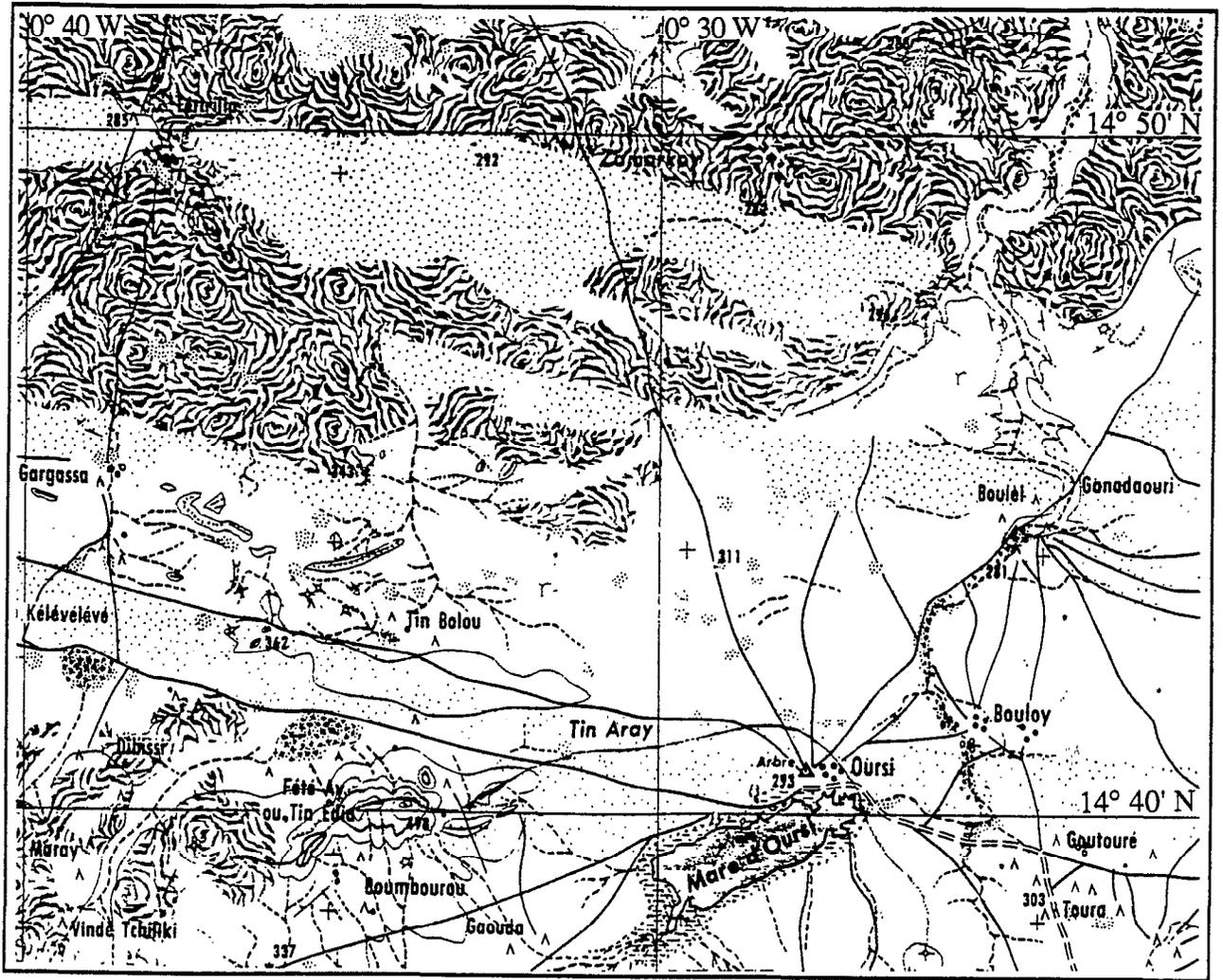


Figure 6 : Le site d'Oursi : extrait de la carte topographique de Dori (IGN Dakar, 1960) au 1. 200 000

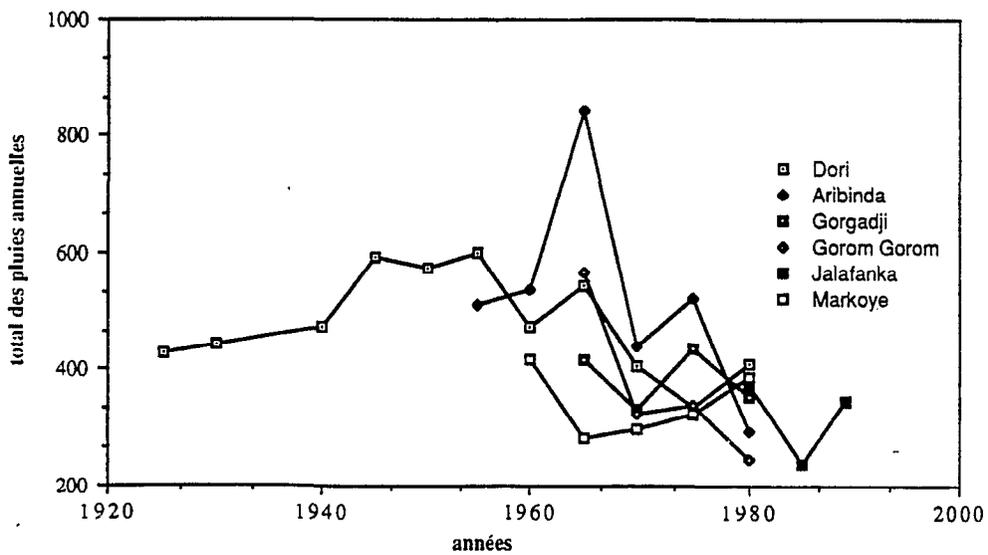


Figure 7 : Les variations interannuelles de la pluviométrie de 1920 à 1989 dans la région d'Oursi

Au deuxième épisode, correspond l'erg récent au modelé beaucoup plus accentué, présentant localement des marques de remaniement actuel (erg vif d'Oursi) et dont l'épaisseur de sable est de l'ordre de 7 à 10 mètres. Erg ancien et erg récent sont généralement imbriqués, le second s'étant vraisemblablement formé au cours de la deuxième phase aride, à partir des matériaux in situ (Barral, 1977). Les quatre bandes dunaires du secteur étudié se rattachent à l'erg récent.

Le modelé dunaire se caractérise par la succession de grandes bandes dunaires orientées E-W, séparées par de larges plaines interdunaires. La largeur des bandes dunaires, sur le site étudié, varie de 1 à 2 km jusqu'à 4 km dans le cas de la bande dunaire la plus septentrionale. Ces bandes dunaires ont un profil dissymétrique, avec un versant abrupt tourné vers le nord, pouvant atteindre 30° et une pente insensible vers le sud. Le modelé des bandes dunaires est complexe. Il résulte de la superposition de deux générations d'ondulations ESE-WNW et NNE-SSW (Courel, 1977). Ces ondulations orthogonales isolent des dépressions de quelques hectares, peu marquées dans la topographie.

On distingue donc deux grandes unités géomorphologiques sur le secteur dunaire d'Oursi (Fig.8) :

- les bandes dunaires,
- les plaines interdunaires.

• **L'hydrographie :**

L'ensemble du secteur est drainé par un réseau hydrographique intermittent, s'écoulant du SW vers le NE en direction du Béli, affluent du Goroual, lui même affluent de rive droite du Niger. Les bandes dunaires sont souvent percées de vallées conséquentes liées à ces écoulements intermittents. Les mares permanentes ou semi-permanentes d'Oursi, de Tin Edjar et de Dibissi, sont alignées sur la lisière méridionale de cet ensemble de bandes dunaires. Elles se sont constituées suite à la mise en place des grands cordons dunaires qui ont joué le rôle de barrage naturel.

• **Les sols :**

Les sols des bandes dunaires d'Oursi sont de type sols brun-rouge subarides. Ces sols à profil de type A (B) C, sont composés d'un horizon humifère épais de plus de 50 cm, reposant sur un horizon de couleur souvent structural. Ils doivent leurs propriétés physiques (texture, porosité, perméabilité) et minéralogiques (sables quartzeux) à leur matériau originel. On distingue deux ensembles de sols brun-rouge en fonction de leur degré de différenciation hérités de paléoclimats plus humides que l'actuel.



Figure 8 : La composition colorée extraite de l'image Spot du 17/12/86 du site d'Oursi :
localisation des éléments du paysage cités dans le texte

0 5km

L'erg ancien porte des sols très différenciés et plus argileux : 8 à 15%. Par contre, l'erg récent, ayant subi un pluvial moins intense et prolongé que l'erg ancien, porte des sols peu différenciés où l'on ne perçoit que de faibles variations de couleur et parfois de porosité (Boulet et Leprun, 1969 ; Barral, 1977). Les sols de l'erg récent, sont pauvres en argiles et limons, 4 à 6% et pauvres en matière organique. Ils sont plus rouges que ceux de l'erg ancien (Barral, 1977).

Les plaines interdunaires cuirassées portent des lithosols constitués par les cuirasses affleurantes, couvertes d'une mince couche de débris grossiers. Ces sols minces et peu évolués sont constitués de deux horizons : un horizon humifère gris beige, sableux à sablo-argileux, épais de 10 à 15 cm ; un horizon légèrement plus coloré (beige rougeâtre), sablo-argileux, gravillonnaire, généralement plus compact et reposant en discontinuité sur une dalle cuirassée (Boulet et Leprun, 1969). Ces sols sont localement recouverts d'épandages sableux ou d'épandages de gravillons ferrugineux.

• **La végétation :**

De façon schématique, deux types de végétation colonisent l'aire d'étude : la steppe arborée et arbustive sur les sols sableux et la brousse tigrée sur les sols à cuirasse subaffleurante.

- La steppe arbustive et arborée colonise les bandes dunaires et les plaines interdunaires à recouvrement sableux épais. Elle se compose des espèces ligneuses suivantes : *Balanites aegyptiaca*, *Guiera senegalensis*, *Boscia senegalensis* dominantes, accompagnées de *Maerua crassifolia*, *Acacia laeta*, *Commiphora africana*, *Combretum glutinosum*, *Combretum micranthum*, *Dichrostachys cinerea*, *Adansonia digitata*, *Pterocarpus lucens* ... Ce spectre floristique diversifié correspond en fait, aux bandes dunaires septentrionales (Photo 1) et aux plaines interdunaires, où le couvert végétal est le moins dégradé.

A l'inverse, la bande dunaire la plus méridionale (Photo 2) où est implanté le village d'Oursi et les abords de la mare de Ganadaori se caractérise par la dominance de *Balanites aegyptiaca* parfois associé à *Combretum glutinosum*. Sur l'erg ancien, *Balanites aegyptiaca* et *Combretum glutinosum* sont associés à *Acacia raddiana* et *Guiera senegalensis*. De manière générale, les espèces ligneuses poussant sur les portions de bande dunaire situées à proximité des mares et des villages sont peu diversifiées.

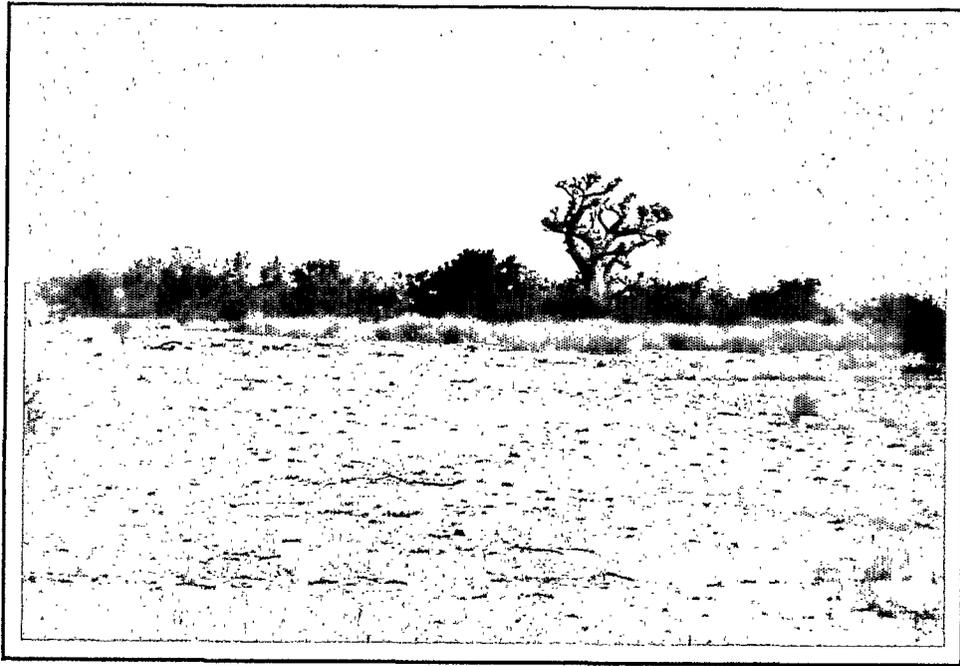


Photo 1 : Bosquet sur la bande dunaire septentrionale du site d'Oursi
(novembre 87)

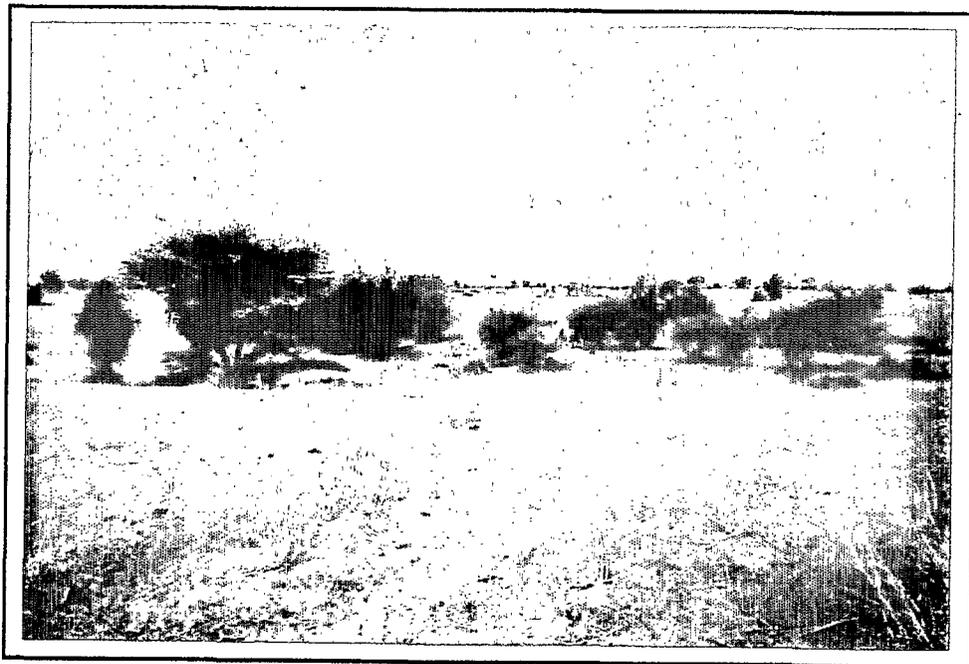


Photo 2 : Bosquet sur la bande dunaire méridionale du site d'Oursi
(novembre 87)

Piot et al. (1980), estiment que la densité des arbres sur la dune d'Oursi, est inférieure ou égale à 50 sujets à l'hectare. A la périphérie des mares, Courel (1984) l'évalue à 100 sujets par hectare.

- La brousse tigrée occupe les sols cuirassés des plaines interdunaires à faible recouvrement sableux et à cuirasse subaffleurante (Fig.8). Les bandes boisées (Photo 3 et 4) sont dominées par *Pterocarpus lucens*, associé à *Boscia senegalensis*, *Combretum micranthum*, *Commiphora africana*, *Dichrostachys cinerea*.

Aujourd'hui, sur le site d'Oursi, cette formation est très dégradée et a perdu en de nombreux endroits son allure brousse tigrée, ayant alors l'aspect d'une brousse mouchetée ou piquetée.

Les axes d'écoulement temporaires et les mares temporaires à l'exception de la mare d'Oursi, sont colonisés par des groupements denses de ligneux dont le spectre floristique est très diversifié : *Guiera senegalensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia laeta*, *Dalbergia melanoxylon*, *Piliostigma reticulatum*, *Myragyna inermis*, *Acacia seyal*, *Acacia nilotica* var. *adansoni* ...

L'ensemble du secteur est colonisé par une strate herbacée discontinue, composée en majorité des espèces suivantes : *Cenchrus biflorus*, *Schoenefeldia gracilis*, *Panicum laetum*, *Aristida mutabilis*, *Zornia glochidiata*. Sa dégradation, voire sa destruction totale par le bétail à proximité des mares ou au sommet de l'abrupt nord de la bande dunaire méridionale, a favorisé la dénudation des sols sableux éminemment sensibles à la déflation éolienne et même l'apparition et l'extension de formes éoliennes vives, telles que celles de l'erg vif situé au nord du village d'Oursi.

Les différentes unités du paysage d'Oursi décrites ici sont perceptibles sur la composition colorée (Fig.8). On distingue :

- les sols sableux des bandes dunaires et des plaines interdunaires en jaune et gris,
- les sols sablo-argileux à pellicule superficielle et l'erg vif en blanc,
- les sols cuirassés des plaines interdunaires en vert et gris,
- le massif de Tin Edjar et les buttes cuirassées en vert,
- la végétation ligneuse et les mares temporaires en marron-rouge. La mare de Ganadaori dont les eaux ont une forte charge sédimentaire et sont libres de végétation, apparaît en bleu turquoise.

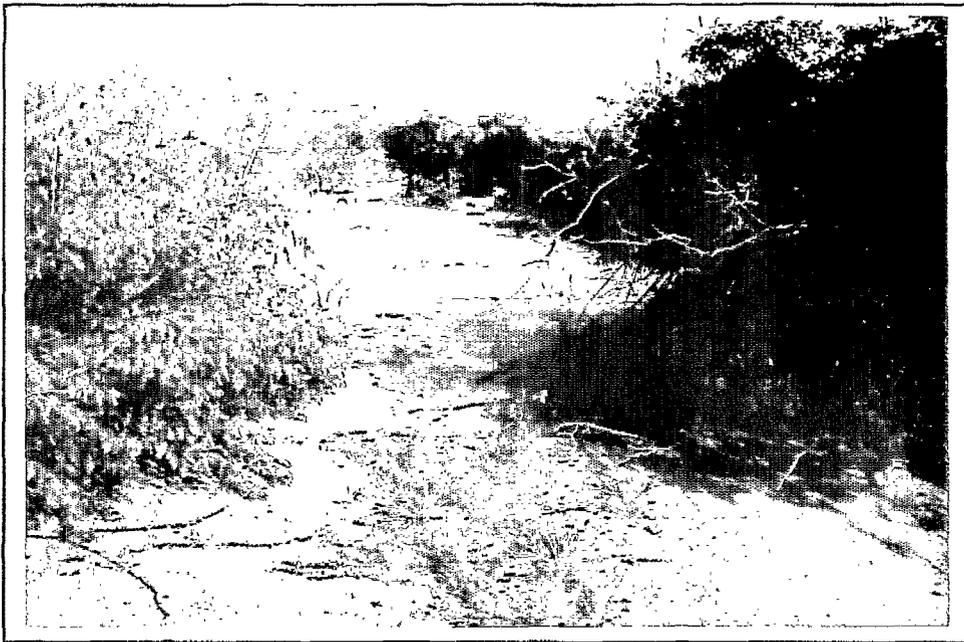


Photo 3 : Brousse tigrée à petites bandes boisées serrées sur la troisième plaine interdunaire du site d'Oursi (novembre 87)



Photo 4 : Brousse tigrée à grandes bandes boisées largement espacées sur la troisième plaine interdunaire du site d'Oursi (novembre 87)

• **Les activités humaines :**

Le milieu d'Oursi est un site particulier en raison d'une forte pression humaine (cultures et pâturages). La région d'Oursi est avant tout une région à vocation pastorale : ses habitants sont essentiellement des nomades (76% de la population totale) dont les campements sont regroupés autour des mares sub-pérennes et des sédentaires, installés dans les villages d'Oursi, Bouloy ... (Fig.6) (Grouzis, 1988). Les cultures de mil sont pratiquées sur les sols sableux éoliens. Tous les milieux sont pâturés à des degrés divers et à des époques bien définies, en fonction de la qualité des fourrages et de leur disponibilité (Courel, 1984). "Les populations nomades de l'Oudalan ont élaboré un système d'utilisation de l'espace qui joue sur les trois composantes essentielles du milieu naturel : les grands systèmes dunaires, les surfaces cuirassées et les affleurements rocheux, les plaines argileuses hydromorphes. A chacun de ces trois éléments morphologiques fondamentaux correspondent, d'une part des points d'eau de types différents, pérennes ou sub-pérennes dans le premier cas, temporaires dans les deux autres, d'autre part des formations végétales, à caractère édaphique, qui constituent des parcours à utilisation saisonnière" (Barral, 1977).

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, 1977). Une forte pression anthropique, surtout à proximité des villages, conjuguée à des conditions climatiques défavorables, se traduit sur ce petit espace par une forte différenciation des modes d'organisation spatiale du couvert ligneux entre et au sein des mêmes unités géomorphologiques.

5. DESCRIPTION GÉOGRAPHIQUE DU FERLO SABLEUX :

L'aire étudiée comprend les forages de Tatki, Mbidi, Ganine, Tessékré, Vindou Thiengoli, entre les latitudes 15° 50' et 16° 20' nord et les longitudes 14° 50' et 15° 20' ouest (Fig.9 et 10).

• La pluviométrie :

De 1950 à 1984, le total des pluies annuelles a progressivement décliné, passant d'environ 400 mm en 1950 (moyennes calculées sur les stations de Dagana, Linguère et Vindou Thiengoli) à environ 100 mm en 1984 (moyennes calculées sur les stations de Vindou Thiengoli, Lodé et Tatki) (Fig.11). En 1972, le total annuel pluviométrique enregistré à Fété Olé est de 38,1 mm. Depuis 1985, on observe une augmentation progressive du total annuel des pluies allant jusqu'à 405,7 mm en 1989 pour la station de Mbidi (relevé de la station météorologique de Mbidi). Ces totaux pluviométriques annuels mettent en évidence les fortes variations interannuelles des précipitations dans la région du Ferlo (cf. Annexe II).

• La géomorphologie :

La région du Ferlo appartient au bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien. Ce bassin regroupe des formations essentiellement marines et les couches gréseuses du Maestrichien (crétacé supérieur) qui renferment une importante nappe d'eau douce exploitée par des forages semi-artésiens. Ces formations sont presque totalement recouvertes par les dépôts de grès argileux du Continental terminal et les dépôts du Quaternaire (Michel, 1967 et 1969). Entre la fin du Tertiaire et le début du Quaternaire, sous un climat plus humide, les dépôts aplanis du Continental terminal ont subi un cuirassement. Au Quaternaire, l'alternance des périodes sèches et humides a entraîné l'altération de cette cuirasse ferrugineuse et la mise en place de matériaux sableux dunaires.

On distingue généralement la formation de trois ergs principaux successifs :

- l'erg ancien : vers 40 000 B.P. au cours d'une période aride, coïncidant avec une importante régression marine, se forme un grand erg qui couvre et déborde le Ferlo septentrional. Le modelé de cet erg se compose de massifs sableux, orientés SW-NE, longs de plusieurs kilomètres, larges de 500 à 800 mètres et de 2 à 3 mètres de dénivellation. Ces massifs dunaires se présentent sur le terrain comme une succession d'ondulations à sommet aplani et émoussé, séparées par des dépressions marquées.

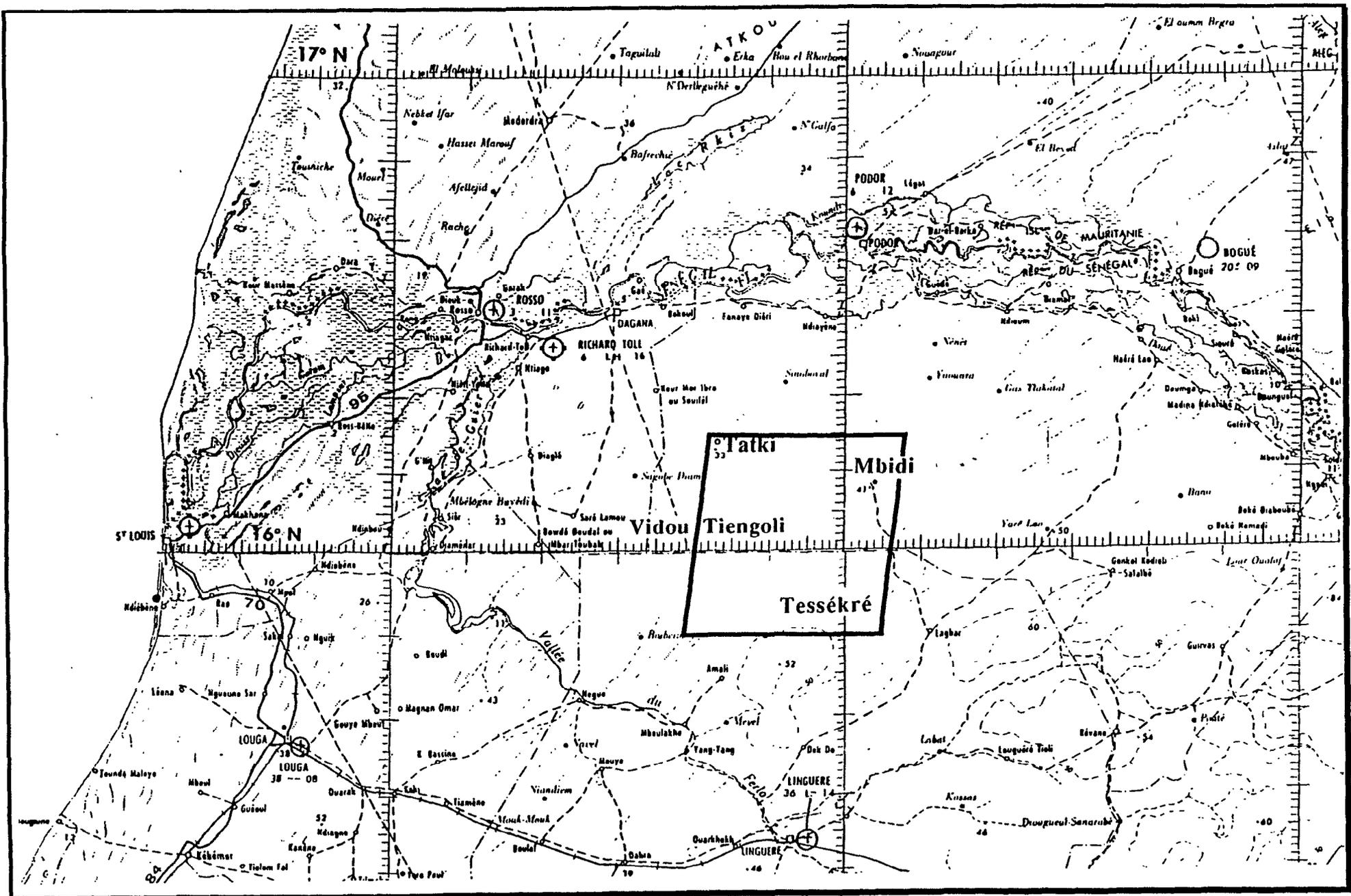


Figure 9 : Le site du Ferlo : extraits des cartes topographiques IGN de St Louis et Dakar au 1 000 000 de 1964 et 1970

- Au Quaternaire récent (Ogolien : 20 à 18 000 B.P.) une nouvelle période sèche aboutit à la formation d'un nouvel erg aujourd'hui appelé "dunes rouges" à cause de la rubéfaction des horizons supérieurs (la rubéfaction se réalisa pendant le pluvial Holocène : 11 000 à 3500 B.P.).

Au cours des fluctuations climatiques du Quaternaire, la cuirasse ferrugineuse a été détruite en presque totalité et reconstituée en cuirasses de nappe parfois affleurantes ou sub-affleurantes, à partir des éléments démantelés.

- Par la suite (de 7000 à 5000 B.P.), lors d'une troisième phase aride mineure, certains massifs dunaires ont été remaniés en bordure des zones alluviales et notamment du lac de Guiers. Ils présentent aujourd'hui, le relief le plus marqué et apparaissent localement sur le secteur étudié : l'orientation de ces cordons dunaires est SSW-NNE (Leprun, 1971 ; Poupon, 1980).

Ces phases de dépôt et de remobilisation des sables ont engendré un modelé dunaire complexe, d'autant plus complexe qu'il est fort aplani et que les limites entre dune et interdune sont souvent masquées par des épandages sableux.

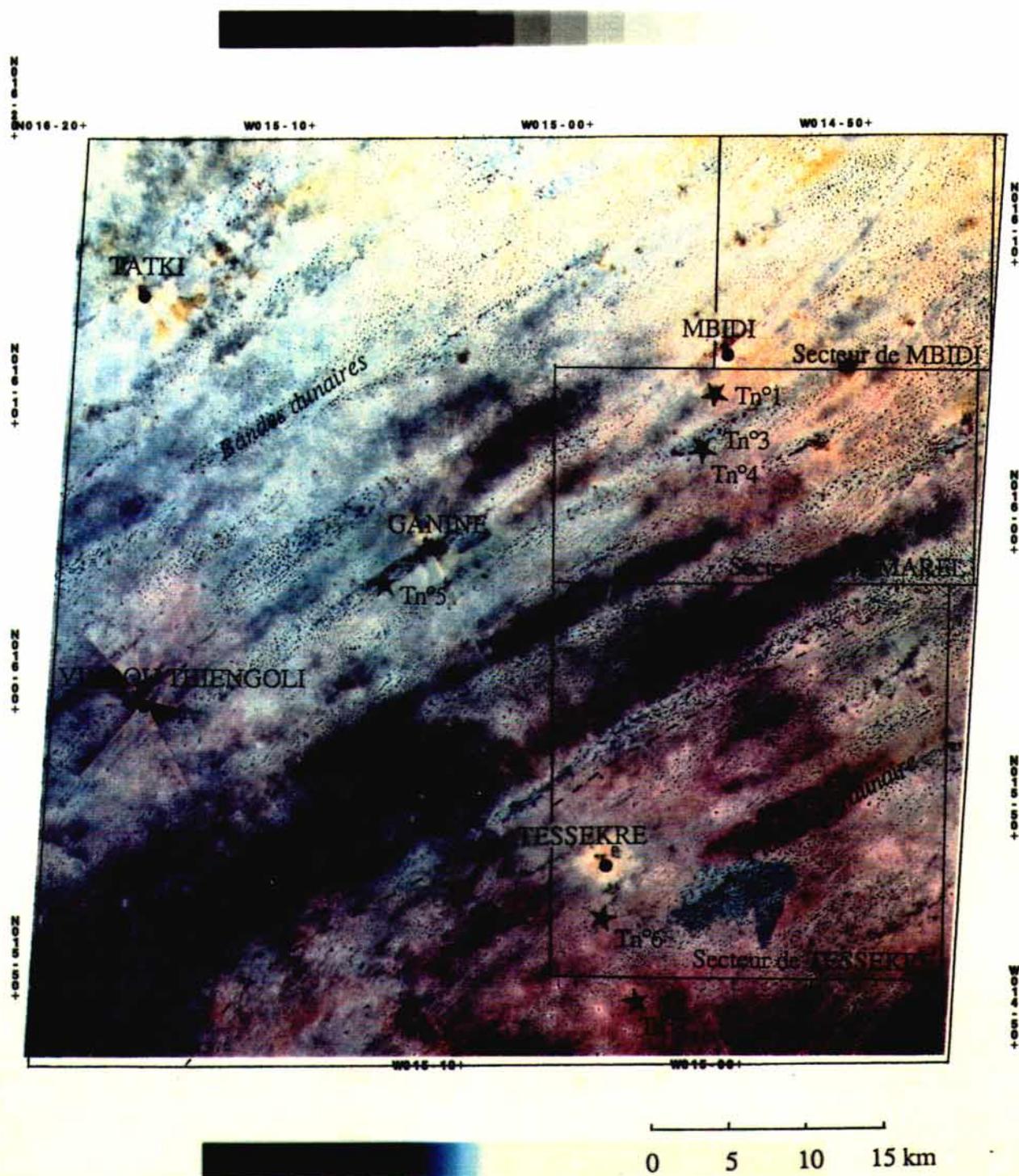
Sur le site étudié (Fig.10), nous distinguons les trois unités géomorphologiques suivantes :

- les bandes dunaires,
- les espaces interdunaires, d'une largeur et d'une longueur très variables, allant de la dépression au couloir interdunaire,
- la plaine interdunaire sableuse.

Ces unités se caractérisent par un modelé, une épaisseur de sable et une organisation spatiale propre de la végétation.

• Au sein des bandes dunaires, du nord au sud de la région étudiée, on distingue deux modelés :

- dans la partie septentrionale, au nord des villages de Vindou Thiengoli et de Mbidi, le modelé dunaire est constitué de bandes dunaires de largeur variable et orientées NE-SW. Ces bandes dunaires constituées de la juxtaposition de cordons, sont remodelées en système transverse. Les ondulations transverses sont bien marquées, ce modelé dunaire apparaît réticulé sur l'image satellitaire. La rencontre des ondulations NE-SW et des ondulations transverses crée des entonnoirs où la concentration des eaux de ruissellement favorise la croissance des groupements de ligneux.



N16°01'/W015°05' AZ:073°57' EL:70°25' OR:008°57'06" INCID:05°39'R 11H 36MN 26S N1B PROJ:
ST043733 LM 080/110 SPOT ©-PRODUCT.CNES IGN-DIST.SPOT IMAGE- © CNES 1988

Figure 10 : La composition colorée extraite de l'image Spot du 22/05/88 du Ferlo :
localisation des forages, des secteurs d'image étudiés et
des transects radiométriques effectués au sol (Tn°)

A ces bandes dunaires orientées NE-SW sont surimposés localement des cordons orientés NNE-SSW, plus étroits et au modelé plus accentué, parmi lesquels la grande dune de Mbidi, située au nord-est du village. Ces cordons se caractérisent au contraire par des dépressions intradunaires longilignes.

- dans la partie méridionale, le modelé dunaire est composé de bandes dunaires orientées NE-SW, séparées par des couloirs interdunaires bien marqués par rapport à ceux de la partie septentrionale. Ici, les ondulations transverses sont moins prononcées. Les bandes dunaires se présentent sur le terrain comme une succession de dômes à sommet aplani et émoussé, parsemés d'entonnoirs aux creux peu profonds.

- Entre les bandes dunaires, s'étendent des couloirs interdunaires. L'absence ou l'étroitesse des espaces interdunaires caractérisent le modelé dunaire de la partie septentrionale. Leur continuité est localement interrompue par des épandages sableux, colmatant le contact entre deux bandes dunaires, ou par l'absence d'espacement entre deux bandes dunaires. Courel, 1984, décrit cette unité de la façon suivante: "des couloirs évasés où se succèdent des dépressions fermées, allongées, plus ou moins vastes".

Les couloirs interdunaires les plus étendus se rencontrent dans la partie méridionale. De nombreuses dépressions correspondent à des *vendous* dans lesquels s'accumulent des eaux ruisselées. Ces mares temporaires remplies pendant la saison des pluies sont ceinturées de bosquets touffus. Les *vendous* aux formes et aux dimensions très variables sont dans leur partie centrale, dépourvus de toute végétation. Le sol argileux, étincelant de blancheur en saison sèche, est parcouru par un réseau polygonal de fentes de rétraction.

- La plaine interdunaire, appelée ainsi en raison de l'absence d'un modelé dunaire organisé, est définie par une vaste étendue sableuse aplanie. Elle est localement recouvertes d'épandages sableux plus ou moins épais. La topographie plane est marquée par des creux plus ou moins rapprochés et à peine perceptibles, où se concentrent les ligneux. La plaine interdunaire sableuse occupe la partie sud-est du secteur étudié, où est localisé le village de Tessékéré (Fig.10).

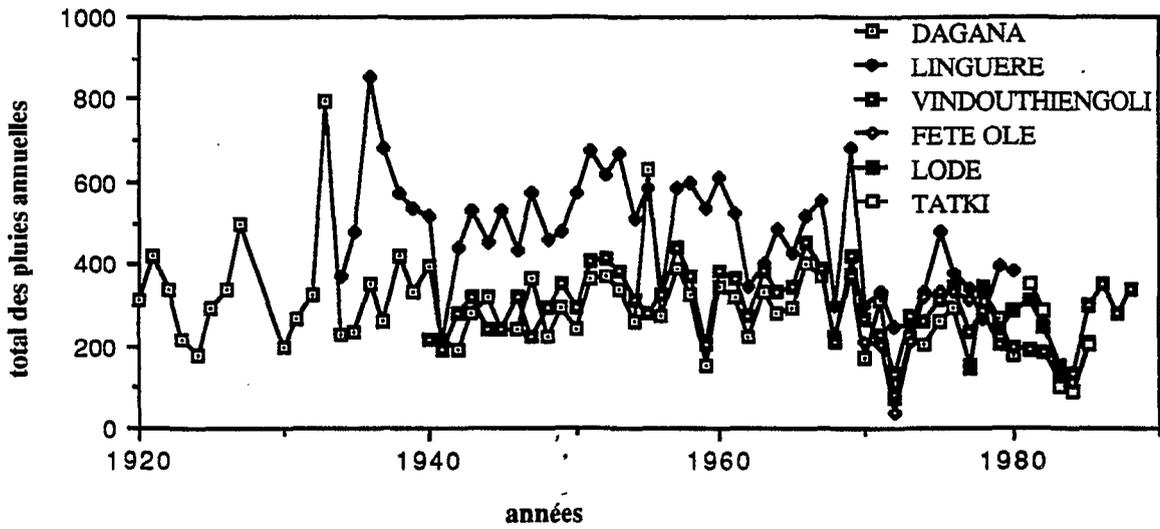


Figure 11 : Les variations interannuelles de la pluviométrie de 1920 à 1989 au Ferlo

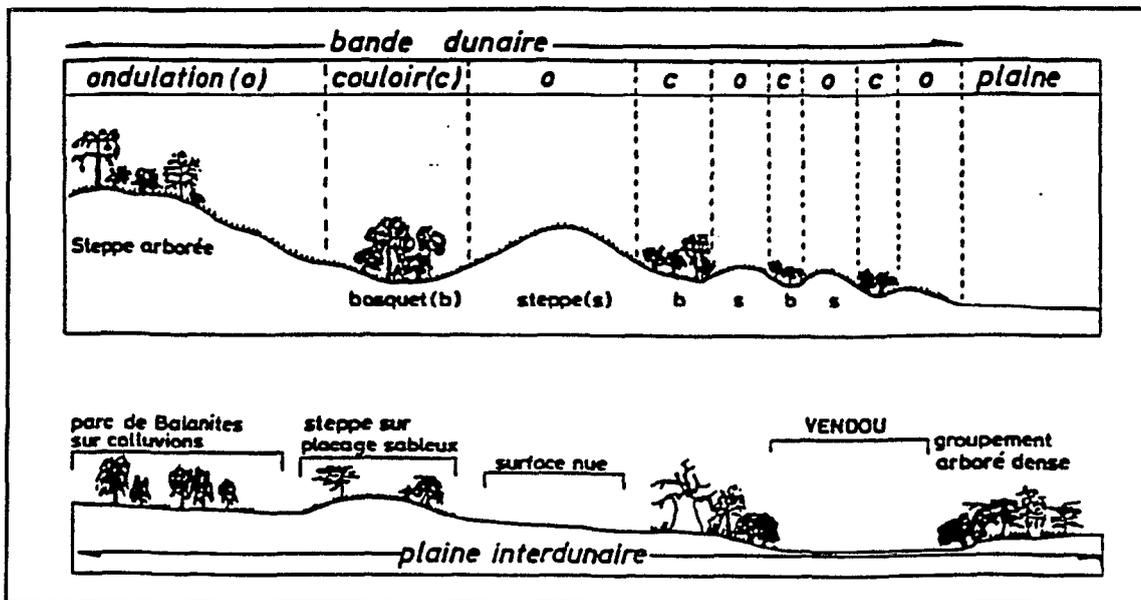


Figure 12 : Coupes figuratives des types de végétation associés aux différentes bio-unités des milieux sableux du Ferlo (Courel, 1984)

- **Les sols :**

Les bandes dunaires portent des sols bruns à brun-rouge sub-arides. Des observations pédologiques faites sur les sommets des bandes dunaires, indiquent dans la partie septentrionale, des sols peu profonds (50 cm) et dans la partie méridionale, des sols assez profonds (1,40 à 2 m). Les horizons des sols de la partie septentrionale sont moins différenciés par rapport à ceux de la partie méridionale, donc logiquement plus jeunes (Leprun, 1971). Les sols des espaces interdunaires ont une texture sableuse, le substratum est le même que celui des bandes dunaires : les sols sont peu épais et généralement tronqués.

En dehors des sols hydromorphes sablo-argileux des cuvettes, on a une association complexe de sols brun-rouge subarides, de sols bruns intergrades vers les sols hydromorphes, de sols rouges intergrades vers les sols ferrugineux et de sols ferrugineux peu lessivés. Leur couverture détritique se compose soit d'épandages de sables brun-rouge remaniés, soit de colluvions sablo-argileuses, mêlées ou non de gravillons ferrugineux, ou de concrétions grésocalcaires, soit encore d'argiles sableuses (Courel, 1984).

- **L'hydrographie :**

Le secteur étudié se caractérise par l'absence de réseaux hydrographiques organisés. Aucun cours d'eau permanent ou intermittent ne traverse le secteur étudié. Dans les espaces interdunaires, de multiples réseaux hydrographiques élémentaires radiaux favorisent l'accumulation des eaux ruisselées dans les cuvettes à fond argileux, pendant la saison des pluies, formant ainsi des mares temporaires.

- **La végétation :**

Cet ensemble sableux est occupé par une steppe arborée et arbustive. La densité des individus et la répartition spatiale des espèces varient d'une unité géomorphologique à l'autre. Le nombre d'individus augmente quand nous nous déplaçons du sommet de la dune au centre de la dépression. La faible couverture végétale des sommets et versants de dunes contraste grandement avec celle des points bas où la végétation ligneuse est dense (Fig.12).

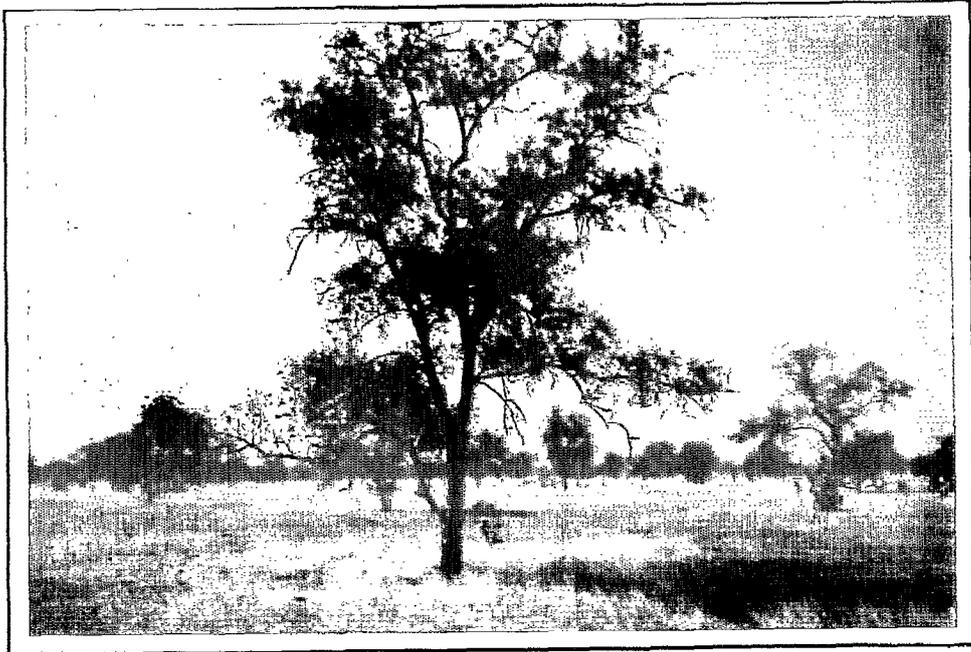


Photo 5 : Couvert ligneux diffus sur bande dunaire au nord du village de Tessékéré dans le Ferlo (*Sclerocarya birrea* au premier plan) (décembre 1988)



Photo 6 : Bosquet de *Balanites aegyptiaca* dominant sur bande dunaire au nord du village de Tessékéré dans le Ferlo (janvier 1990)



Photo 7 : Bosquets de *Calotropis procera* dominant sur bande dunaire au SE du village de Mbidi dans le Ferlo (janvier 1990)

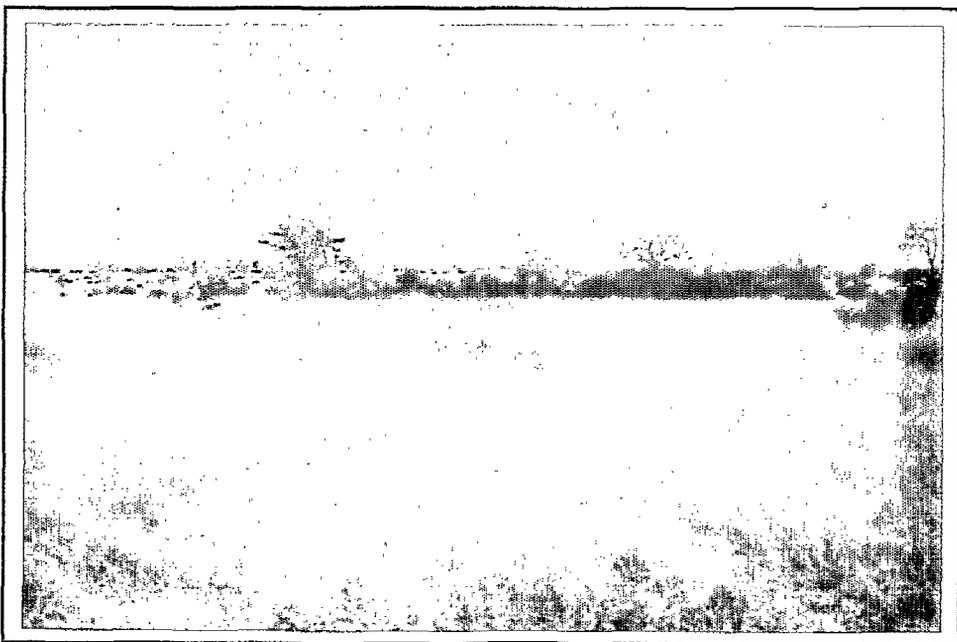


Photo 8 : Bosquet au spectre floristique diversifié sur bande dunaire entre les villages de Mbidi et Ganine dans le Ferlo (décembre 1988)

Les bandes dunaires sont colonisées par un tapis graminéen discontinu mais localement couvrant, piqueté de quelques arbustes et de quelques arbres isolés ou groupés en petits bosquets dans les creux intradunaires. Le peuplement ligneux est très ouvert. Ces unités sont colonisées par le piquetis lâche de *Balanites aegyptiaca* et *Boscia senegalensis* au nord et au sud par celui de *Sclerocarya birrea* et *Combretum glutinosum* (Photo 5). La composition floristique des groupements de ligneux varie d'une bande dunaire à l'autre et au sein des mêmes bandes dunaires :

Sur les bandes dunaires et dans la plaine interdunaire sableuse, nous distinguons trois types de groupements de ligneux en fonction des espèces qui les composent :

- les groupements à *Balanites aegyptiaca* dominant (Photo 6),
- les groupements à *Calotropis procera* dominant associé à *Adansonia digitata* (Photo 7),
- les groupements à composition floristique diversifiée : *Balanites aegyptiaca*, *Calotropis procera*, *Adansonia digitata*, *Acacia senegal*, *Combretum glutinosum*, *Combretum aculeatum*, *Ziziphus mauritiana* ... (Photo 8).

Les dépressions et couloirs interdunaires où l'eau peut s'accumuler au cours de la saison des pluies, sont occupés par des bosquets de végétation dense dominés par quelques grands individus (Photo 9). Le spectre floristique des arbres et des arbustes occupant les bordures des vendous est très large : *Balanites aegyptiaca*, *Guiera senegalensis*, *Boscia senegalensis*, *Dichrostachys cinerea*, *Commiphora africana*, *Calotropis procera*, *Dalbergia melanoxylon*, *Feretia apodanthera*, *Adansonia digitata*, *Acacia nilotica* var *adansonii*, *Acacia raddiana*, *Grewia bicolor*, *Acacia seyal*, *Combretum micranthum*, *Combretum aculeatum*, *Ziziphus mauritiana*, ... et compte même des espèces soudaniennes comme *Anogeissus leiocarpus* et *Mitragyna inermis*.

La plaine interdunaire sableuse est colonisée par un piquetis dense de ligneux associé à de petits bosquets circulaires répartis dans des dépressions de faible profondeur et peu espacées (Photo 10). La strate herbacée est très couvrante. On retrouve les trois types d'associations végétales précédemment décrites sur bandes dunaires :

- des bosquets dont la composition est variée : *Balanites aegyptiaca*, *Guiera senegalensis*, *Boscia senegalensis*, *Grewia bicolor*, *Leptadenia hastata*, *Calotropis procera*, *Acacia seyal*, *Acacia raddiana*, *Feretia apodanthera*, *Sclerocarya birrea*, *Cassia obtusifolia*, *Ziziphus mauritiana* ...
- des bosquets composés d'*Adansonia digitata* et de *Calotropis procera* dominants,
- ou encore des bosquets constitués de *Balanites aegyptiaca* exclusivement.

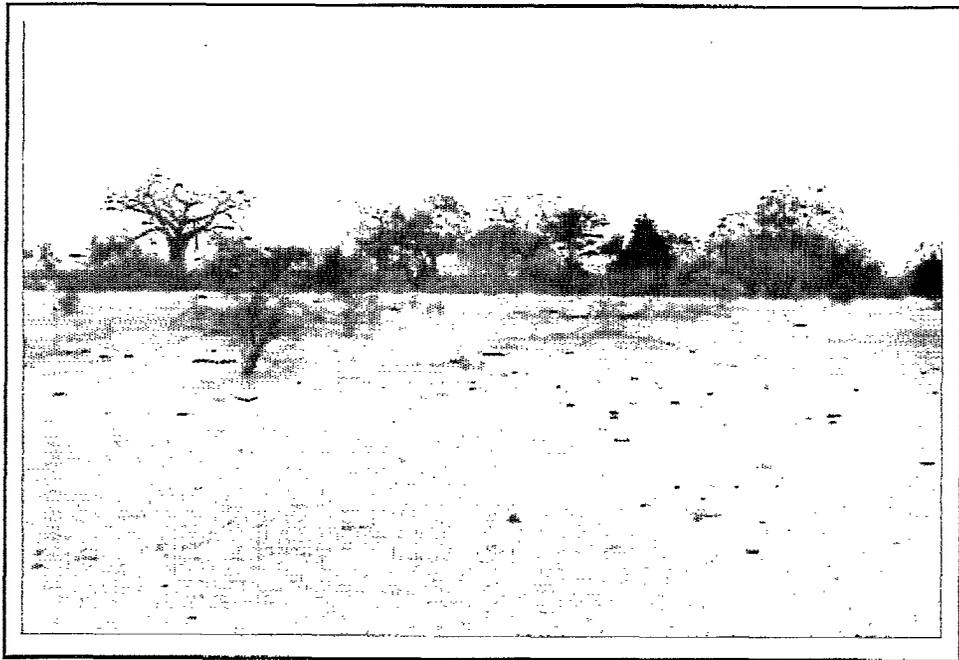


Photo 9 : Bosquet au spectre floristique diversifié dans un couloir interdunaire à l'est du village de Ganine dans le Ferlo (janvier 1990)



Photo 10 : Le vendou Tessékéré au sud du village de Tessékéré dans la plaine interdunaire du Ferlo (janvier 1990)

Entre ces fourrés, le couvert diffus est constitué de *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Grewia bicolor*, *Sclerocarya birrea*, *Combretum glutinosum*. Le sol de la plaine sableuse est sablo-argileux et induré en surface.

Enfin, la distribution des espèces varie du nord au sud du secteur étudié, selon un gradient pluviométrique, comme l'atteste la densité croissante de *Sclerocarya birrea* et de *Combretum glutinosum* au sud de la latitude de Vindou Thiengoli.

• **Les activités humaines :**

Jusqu'à l'ouverture du premier forage, à Dodji en 1950, le Ferlo était considéré comme un désert en raison de la rareté des points d'eau permanents. Ce désert du Ferlo était seulement fréquenté quatre à cinq mois par an par des pasteurs Peuls et leurs troupeaux transhumants au cours de la saison pluvieuse. De 1950 à 1980, 35 forages profonds (80-322 m) qui atteignent la nappe artésienne maestrichienne, ont été creusés. La création de ces forages a profondément bouleversé les pratiques pastorales en sédentarisant les pasteurs Peuls. Chaque forage a ainsi constitué une aire de polarisation où les campements se sont fixés et des villages se sont créés. Les transhumances vers le fleuve Sénégal et vers la vallée du Ferlo ont progressivement cessé. Ne subsiste plus aujourd'hui, qu'un micro-nomadisme de 10 à 20 km autour des forages en saison sèche.

Les densités de population et du bétail au Ferlo sont faibles (3 et 4 hts/km² respectivement, Courel, 1984). Cette faible pression anthropique et la présence d'un substrat sableux expliquent l'état relativement peu dégradé des pâturages du Ferlo eu égard à l'ensemble sahélien.

Sur la composition colorée du site du ferlo (Fig.10), on distingue :

- les sols sableux des bandes dunaires dénudés ou peu couvert d'herbacées dans les tons de jaune à gris,
- les sols sableux des bandes dunaires couverts d'un tapis herbacé dense en gris foncé-bleu,
- dans les couloirs interdunaires, les épandages de gravillons ferrugineux en bleu turquoise,
- la végétation ligneuse dans des tons allant du rouge au brun foncé,
- les auréoles de dénudation autour des forages en blanc,

Une trace de feu récente apparaît en bleu ardoise dans le quart SE de l'image.

6. LES STRUCTURES SPATIALES DU COUVERT LIGNEUX SUR LES IMAGES DES SITES ETUDIÉS :

Sur les images satellitaires, les variations de la taille, de la forme et de l'organisation spatiale des groupements d'arbres et d'arbustes se traduisent par des structures. La simple analyse visuelle des compositions colorées calculées sur les images Spot, nous permet dans un premier temps, de distinguer au sein des paysages étudiés plusieurs types de structure des groupements de ligneux. Trois grands types de structure, à l'aide desquels nous décrivons les différents modes d'organisation spatiale des groupements de ligneux perçus sur les images des sites étudiés (Fig.13 et 14), sont définis :

- la structure punctiforme, constituée d'éléments de forme sub-circulaire,
- la structure à bandes, constituée d'éléments de forme linéaire,
- la structure à agrégats, constituée d'éléments de taille et de forme variables.

Au sein de la structure punctiforme, nous distinguons :

- la structure punctiforme lâche, où les éléments sont largement espacés (cette structure est notée A),
- la structure punctiforme serrée, où les éléments sont faiblement espacés (B),
- la structure punctiforme orientée, où les éléments sont distribués selon une orientation (C).

Au sein de la structure en bandes, nous distinguons :

- la structure à petites bandes (D),
- la structure à grandes bandes (E),
- la structure à bandes hétérogènes, constituée à la fois de grandes bandes et de petites bandes (H).

La structure à agrégats est notée I.

6.1. Description des modes d'organisation spatiale des ligneux sur le site d'Oursi :

A chaque unité géomorphologique correspondent une ou plusieurs structures du couvert ligneux.

a) En milieu sableux :

- Sur les bandes dunaires, la distribution spatiale de la végétation est étroitement liée à la morphologie dunaire. On rencontre deux modes d'organisation spatiale : le piquetis et le bosquet. Les arbres et les arbustes sont répartis en piquetis sur l'ensemble de la topographie dunaire et/ou s'organisent en bosquets arborés et arbustifs dans les creux intradunaires ou sur les flancs des ondulations dunaires. Sur les bandes dunaires septentrionales, très peu de ligneux poussent à l'état isolé, ils sont concentrés en bosquets dans les creux intradunaires.

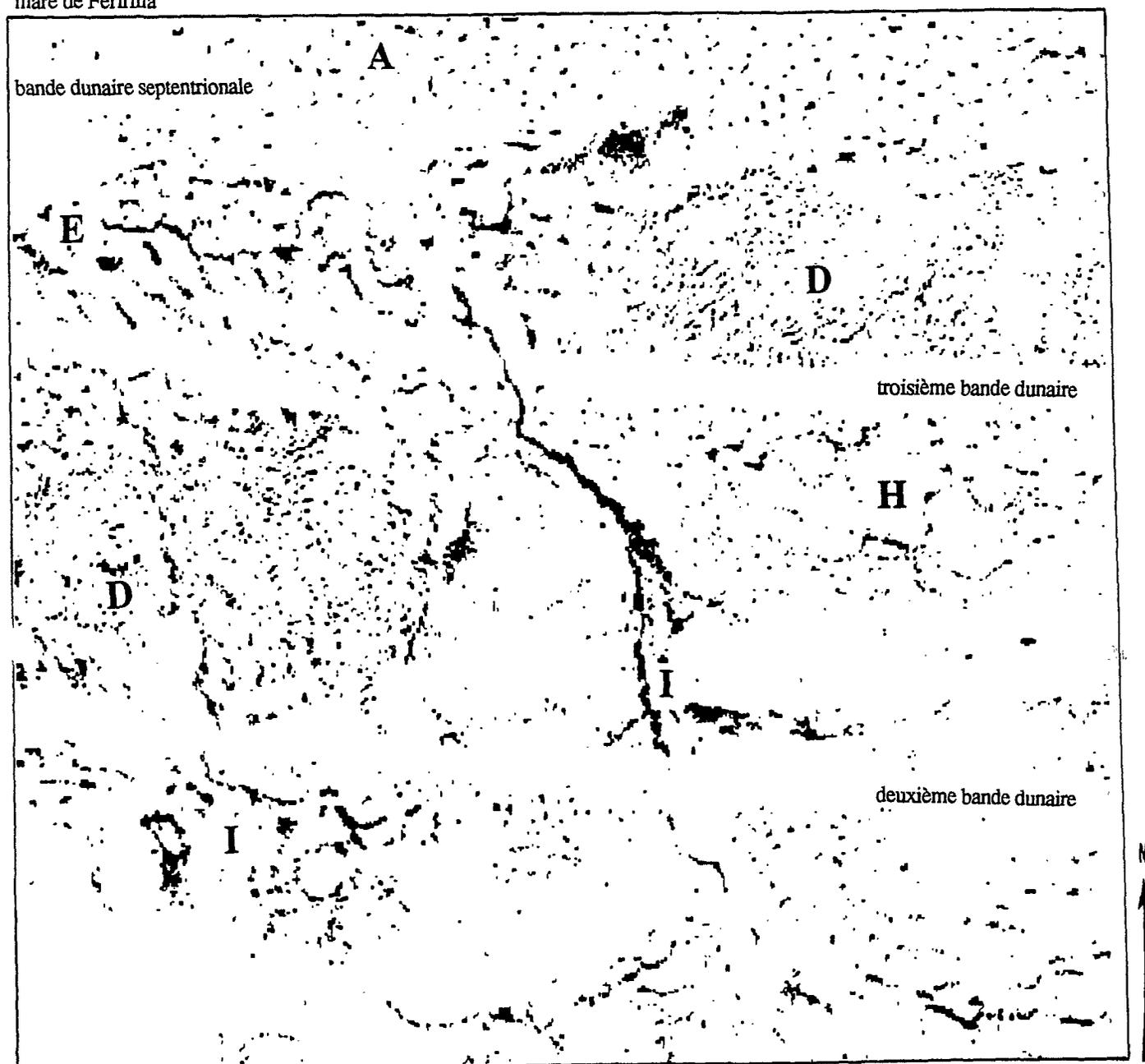
Par contre, la bande dunaire méridionale est colonisée par de petits bosquets de *Balanites monospécifiques* et un piquetis de *Balanites aegyptiaca* et de *Combretum glutinosum*. De plus, les bosquets ne sont pas toujours localisés dans les creux, mais bien souvent sur les flancs des ondulations dunaires.

Sur l'image satellitaire (Fig.13), le couvert ligneux des bandes dunaires est perceptible sous la forme d'une structure punctiforme lâche (A).

- Dans les plaines interdunaires à recouvrement sableux épais, les ligneux ont une répartition très discontinue. Ils s'organisent en groupements continus séparés par de larges plages où le couvert ligneux est très diffus. Leur répartition spatiale est souvent liée à la microtopographie des plaines interdunaires.

Des groupements denses de ligneux occupent les chenaux d'écoulement temporaire. On note deux orientations préférentielles : une orientation N-S qui correspond aux axes d'écoulement qui traversent toutes les unités topographiques en direction du nord et une orientation E-W, où les axes d'écoulement sont localisés de préférence au contact des bandes dunaires. Ces axes d'écoulement transversaux sont reliés aux axes sud-nord. Sur l'image, les groupements de ligneux sur axes d'écoulement temporaire sont perceptibles par le biais d'agrégats de forme linéaire plus ou moins ramifiés.

mare de Feririlia



A : structure punctiforme lâche
 D : structure à petites bandes
 E : structure à grandes bandes
 H : structure à bandes hétérogènes
 I : structure à agrégats

échelle :

0 1 2 km

Figure 13 : Les structures du couvert ligneux du site d'Oursi sur l'image Spot du 17/12/86 classée et binarisée ne contenant plus que les pixels correspondant aux groupements de ligneux

Au nord du village d'Oursi, dans la première plaine interdunaire, des petits bois se sont développés sur des mares temporaires, ils sont perceptibles sur les images sous la forme d'agrégats sub-circulaires.

Sur l'image satellitaire, l'organisation spatiale des groupements de ligneux de la plaine interdunaire sableuse se traduit par une structure à agrégats (I).

b) Sur les sols cuirassés ou à cuirasse subaffleurante des plaines interdunaires :

Les plaines interdunaires à épandages sableux peu épais et à cuirasse subaffleurante, sont colonisées par la brousse tigrée. La taille, la forme et l'espacement des bandes boisées varient localement selon le degré de dégradation du couvert ligneux. Sur l'image satellitaire (Fig.13), on distingue différentes structures au sein de la brousse tigrée :

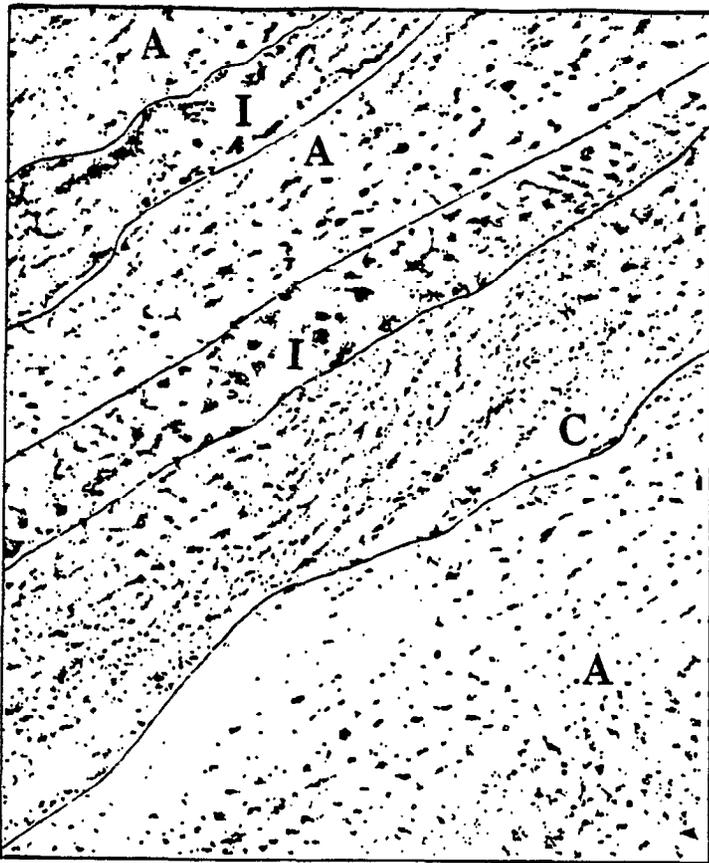
- au NW de la troisième bande dunaire : la structure à grandes bandes (E),
- au NE et au SW de la troisième bande dunaire : la structure à petites bandes (D),
- au SE de la troisième bande dunaire : la structure à bandes hétérogènes (H).

6.2. Description des modes d'organisation spatiale des ligneux sur le site du Ferlo :

a) Les bandes dunaires :

La distribution des arbres et des arbustes sur les bandes dunaires est à la fois diffuse et groupée. Les groupements de ligneux sont répartis dans les creux intradunaires résultant de l'interpénétration du modelé en bandes et du modelé transverse. La densité du couvert diffus et la taille des groupements de ligneux varient localement.

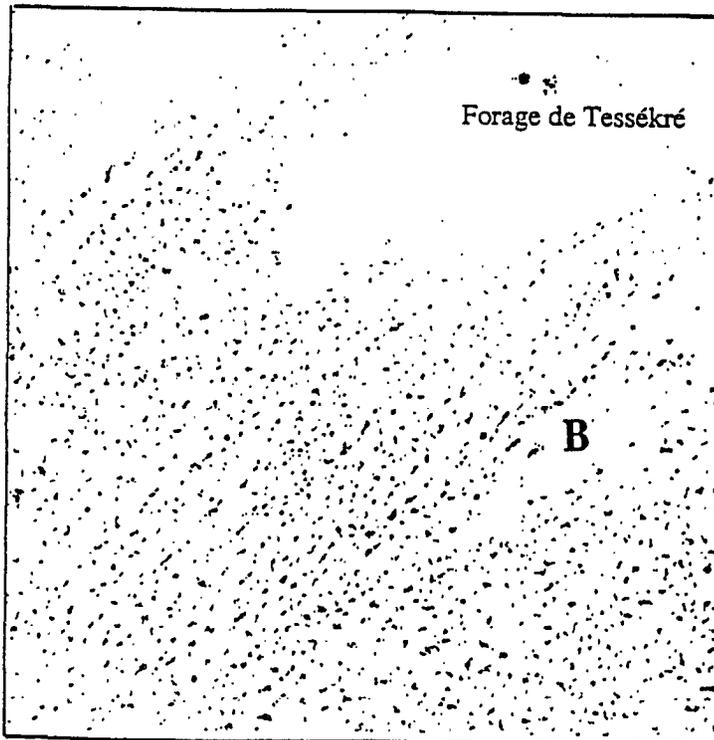
On rencontre des bosquets de petite taille dont le cortège floristique est quasi monospécifique (*Balanites aegyptiaca*) ou au contraire des fourrés assez touffus au cortège floristique très diversifié. Les bosquets et les fourrés sont localisés de préférence dans les creux intradunaires. Les arbres ont une distribution lâche sur le pourtour du creux intradunaire. Entre les bosquets et les fourrés, le couvert ligneux diffus est dense.



- Les structures punctiformes du couvert ligneux des bandes dunaires et les agrégats des couloirs interdunaires au SE du village de Mbidi

échelle :  0 1 2 km

A : structure punctiforme lâche
 B : structure punctiforme serrée
 C : structure punctiforme orientée
 I : structure à agrégats



- La structure punctiforme serrée du couvert ligneux dans la plaine interdunaire au SW du village de Tessékéré

Figure 14 : Les structures du couvert ligneux du site du Ferlo sur l'image Spot du 22/05/88 classée et binarisée ne contenant plus que les pixels correspondant aux groupements de ligneux

Localement, les bandes dunaires sont colonisées par des fourrés denses bien individualisés. Ces groupements de ligneux au spectre floristique très large, sont constitués de beaux individus. La concentration argileuse dans les creux est importante, certains groupements occupent des vendous. Entre ces groupements, il y a très peu d'arbustes, quelques *Boscia senegalensis*.

Cette distribution spatiale des bosquets et des fourrés se traduit sur l'image satellitaire (Fig.14) par une structure punctiforme lâche (A).

Dans les alignements des creux intradunaires des cordons NNE-SSW au relief plus accentué, s'étendent de petits fourrés, distribués en ligne. Ce semis linéaire de petits fourrés se traduit sur l'image satellitaire, par une structure punctiforme orientée (C).

b) Les couloirs interdunaires :

Cette unité se caractérise par la présence de gros fourrés ou vendous associés à un couvert très diffus. Ces fourrés sont isolés ou tendent à s'organiser en chapelet dont l'orientation NE-SW, épouse la morphologie dunaire. On distingue deux types de vendous : les vendous peu arborés, constitués d'une vaste surface argileuse et entourés de quelques arbres épars, et les vendous colonisés par de nombreux arbres et arbustes. Sur les images satellitaires (Fig.14), ces fourrés isolés ou organisés en chapelet orienté NE-SW, sont perceptibles par une structure à agrégats (I).

c) La plaine interdunaire sableuse :

La plaine interdunaire sableuse est colonisée à la fois par un couvert diffus dense et par de nombreux bosquets et fourrés, parfois localisés sur des vendous. La présence d'épandages sableux plus ou moins épais sur cette unité, introduit des nuances dans la répartition spatiale des ligneux, que traduisent les différentes structures punctiformes observées sur l'image satellitaire (Fig.14). On rencontre les trois types de structure punctiforme distingués précédemment : la structure punctiforme lâche (A), la structure punctiforme serrée (B), la structure punctiforme orientée (C).

D'une unité géomorphologique à l'autre, nous distinguons donc sur les images satellitaires des deux sites étudiés, les structures suivantes :

Sur les bandes dunaires :

- la structure punctiforme lâche (A),
- la structure punctiforme orientée (C).

Dans les couloirs interdunaires du Ferlo et dans la plaine interdunaire sableuse d'Oursi :

- la structure à agrégats (I).

Dans les plaines interdunaires à cuirasse subaffleurante d'Oursi :

- la structure à petites bandes (D),
- la structure à grandes bandes (E),
- la structure à bandes hétérogènes (H).

Dans la plaine interdunaire sableuse du Ferlo :

- la structure punctiforme lâche (A),
- la structure punctiforme serrée (B),
- la structure punctiforme orientée (C).

PARTIE II

**CARACTERISATION
DES PRINCIPALES UNITES DU PAYSAGE
ET IDENTIFICATION DES GROUPEMENTS
DE LIGNEUX SUR IMAGE SATELLITAIRE**

1. LA DEMARCHE ET LES OUTILS DE L'ANALYSE DES UNITES PAYSAGIQUES SUR IMAGES SATELLITAIRES :

L'objet de cette seconde partie consiste à mettre en évidence sur les images satellitaires, les différentes unités du paysage dont les groupements de ligneux. Notre démarche se compose de deux étapes :

- Dans un premier temps, nous tentons de caractériser à l'aide des données radiométriques, les grandes unités du paysage. L'analyse de ces données permet de distinguer au sein du paysage des surfaces ayant des propriétés radiométriques semblables ou proches que nous appelons **unités paysagiques**. L'association spatiale de plusieurs unités paysagiques forme un ensemble paysagique.
- Dans un deuxième temps, nous isolons les pixels correspondant aux groupements de ligneux des autres unités du paysage. Nous obtenons ainsi une image ne contenant plus que les groupements de ligneux, à partir de laquelle nous pourrions effectuer dans la partie III, l'analyse de leur structure spatiale.

1.1. Les principes de l'analyse des unités paysagiques sur les images satellitaires .

Comme nous l'avons vu dans la partie I, les paysages des deux sites étudiés, sont organisés en différentes unités géomorphologiques (bandes dunaires, espaces interdunaires) et d'une unité à l'autre, la structure spatiale du couvert ligneux change. Il s'agit maintenant de reconnaître sur les images satellitaires, les différentes unités du paysage et de tenter de caractériser leurs états de surface. Les états de surface des différentes unités paysagiques sont caractérisés à l'aide d'une analyse comparative, entre les données radiométriques des images et des mesures radiométriques effectuées au sol, sur les principaux états de surface observés sur les deux sites. La caractérisation des unités paysagiques sur images et au sol nous permettra ultérieurement d'analyser les relations existant entre les différents modes de distribution spatiale du couvert ligneux et les caractéristiques radiométriques et physiques des unités qu'ils occupent.

L'analyse des données satellitaires consiste à distinguer au sein des paysages étudiés, les régions ayant des caractéristiques radiométriques semblables ou proches, correspondant au sol à des états de surface spécifiques et présentant une certaine homogénéité à l'échelle de perception du satellite. La perception sur images satellitaires des états de surface définis et reconnus au sol, à une échelle différente et par le biais de la signature spectrale nous amène à donner deux définitions du terme **état de**

surface.

- Au sol, le terme état de surface recouvre deux composantes du milieu : le couvert végétal et les organisations pédologiques superficielles. Il peut désigner une seule "surface élémentaire", la juxtaposition de plusieurs, ou un système de surfaces élémentaires, à savoir un ensemble au sein duquel jouent des interactions. La "surface élémentaire" se définit, à un instant donné, par un ensemble homogène constitué par le couvert végétal, la surface du sol et sa microtopographie, les organisations pédologiques superficielles (Casenave et Valentin, 1987).
- Sur les images satellitaires, les états de surface sont définis par "l'ensemble des caractères propres à la surface de la terre, susceptibles d'être détectés depuis un satellite ou un avion" (Bruneau et Kilian, 1986). L'unité élémentaire des états de surface est le pixel. "Le pixel étant un intégrateur d'énergie, il est difficile de préciser la part respective de chaque élément composant cette surface dans le signal restitué" (Malek, 1989).

Cette intégration de divers éléments dans la réponse spectrale rend la dénomination des unités paysagiques souvent difficile. Lors de cette étude, la plupart des unités paysagiques perçues sur les images reçoivent pour identifiant le nom de l'unité géomorphologique et celui du lieu géographique, avec lesquels coïncide leur extension spatiale sur les images classées. L'identification des unités paysagiques à l'aide d'un critère géomorphologique plutôt qu'à l'aide de critères physiques (nature des états de surface), a été choisie d'une part, en raison de la difficulté de caractériser des secteurs par la spécificité de leurs états de surface au sol : ceux-ci sont peu nombreux mais forment des associations très variées localement, qu'il est difficile d'identifier précisément, comme nous l'avons dit précédemment. D'autre part, pour la clarté de l'analyse, l'identification des unités du paysage à l'aide de terme géomorphologique s'est avérée mieux adaptée : on remarque en effet, une certaine adéquation entre la distribution et les limites spatiales des unités paysagiques reconnues sur images avec celles des unités géomorphologiques décrites dans la partie I.

L'appellation des unités paysagiques à l'aide de critères géomorphologiques, ne rend pas compte des différences d'états de surface existant entre des unités géomorphologiques d'un même type, notamment entre les bandes dunaires. Ces différences se traduisent sur l'image, pour un même type d'unité géomorphologique, par plusieurs unités paysagiques ayant des caractéristiques radiométriques différentes.

1.2. Le choix d'une démarche non dirigée :

L'identification des principales unités du paysage et notamment des groupements de ligneux sur les images satellitaires est obtenue à l'aide d'une classification automatique. Effectuer une classification consiste à regrouper les données suivant des relations qui existent entre les observations. Ces liens sont définis en fonction de la description par un certain nombre de variables (ici les bandes spectrales). A l'aide des données satellitaires, notre objectif consiste à effectuer une partition de l'image en classes homogènes ayant des caractères spectraux semblables ou proches.

La démarche de classification adoptée est celle d'une classification non-dirigée : sur les compositions colorées, nous distinguons aisément les milieux sableux des milieux cuirassés, les groupements de ligneux, etc... Cependant, au sein de chacune de ces entités, nous avons pu constater au sol, la grande variété dans l'espace de leurs états de surface. La surface des bandes dunaires se caractérise par une alternance de sols nus encroûtés ou pulvérulents, de plages de tapis herbacé d'extension spatiale et de taux de recouvrement variables, la couleur du sable varie d'une bande dunaire à l'autre, ... De même, les groupements de ligneux se différencient par une grande variété de leur taux de recouvrement, de leur spectre floristique et des caractéristiques physiologiques et phénologiques des individus qui les composent. Si les états de surface varient fortement au sein de chaque composant du paysage cité ci-dessus, leurs limites spatiales sont aussi souvent difficiles à percevoir au sol. Cette hétérogénéité locale rend difficile l'identification et la discrimination a priori d'unités de référence en vue d'une démarche dirigée.

D'autre part, nous savons que cette hétérogénéité spatiale des états de surface s'accompagne de modifications rapides dans le temps sous l'effet des facteurs climatiques et anthropiques. La différence de date des missions sur le terrain et des prises de vue des images satellitaires dans le cadre de cette étude, a limité les possibilités de mise en relation directe des relevés faits au sol et des données satellitaires. A cela, s'ajoute la difficulté de se repérer sur le terrain et de localiser précisément une surface au sol par rapport aux coordonnées du pixel la représentant sur l'image.

Nous avons donc choisi d'interpréter a posteriori les unités paysagiques mises en évidence par les classifications non dirigées. Cette démarche offre l'avantage de traiter l'information satellitaire de manière plus objective (par le fait d'obtenir une individualisation des structures les plus fortes des données au sens des descripteurs

utilisés) et nous a même permis parfois, de percevoir certains états de surface pas ou mal analysés au sol ou sur les compositions colorées.

1.3. La méthode de classification dite des centres mobiles :

La méthode dite des centres mobiles (Anderberg, 1973, Hardigan, 1975) consiste à réaliser une partition de la population, en un ensemble K de classes, choisi a priori par l'opérateur, de telle façon que les classes obtenues soient les plus homogènes possible au sens de la variance (variance dans les classes (W)) et les plus différentes possible au sens de la variance (variance interclasse (B)). Elle tend à décomposer la variance totale T de la population tel que W soit minimum et B maximum ($T = W + B$) (Andrianasolo, 1987). Son fonctionnement est illustré par la figure 15.

Lors de cette étude, les classifications ont été effectuées en un nombre croissant de classes. Pour chaque nombre k de classes demandé, cinq essais successifs de partition des données ont été conduits. Parmi ces cinq essais, nous sélectionnons l'itération ayant l'inertie intra-classe la plus faible, ce qui est équivalent à la variance inter-classes la plus élevée. La partition dont l'inertie intra-classe est la plus faible, est extrapolée à l'ensemble de l'image à l'aide de la distance euclidienne : on calcule la distance euclidienne entre chaque élément (pixel) et le centre de gravité de chaque classe précédemment obtenue. Chaque élément est affecté à la classe la plus "proche".

- L'échantillonnage :

Les images satellitaires représentant un trop grand nombre de données, l'analyse des données est tout d'abord effectuée à partir des pixels d'une population-échantillon représentative. L'échantillonnage est de type systématique. On calcule la taille de l'échantillon à utiliser, en fonction du niveau de précision désiré et des variances des variables, à l'aide de la formule suivante :

$$n = \frac{(r^2 \cdot \text{var}(x))}{(I^2)/4}$$

où,

r = la valeur associée au niveau de précision désirée,

var(x) = la variance de la variable d'étude x,

I = l'amplitude de l'intervalle en nombre d'écart-type dans lequel la moyenne estimée doit se trouver autour de la moyenne réelle (inconnue) de la population (Andrianasolo, 1987).

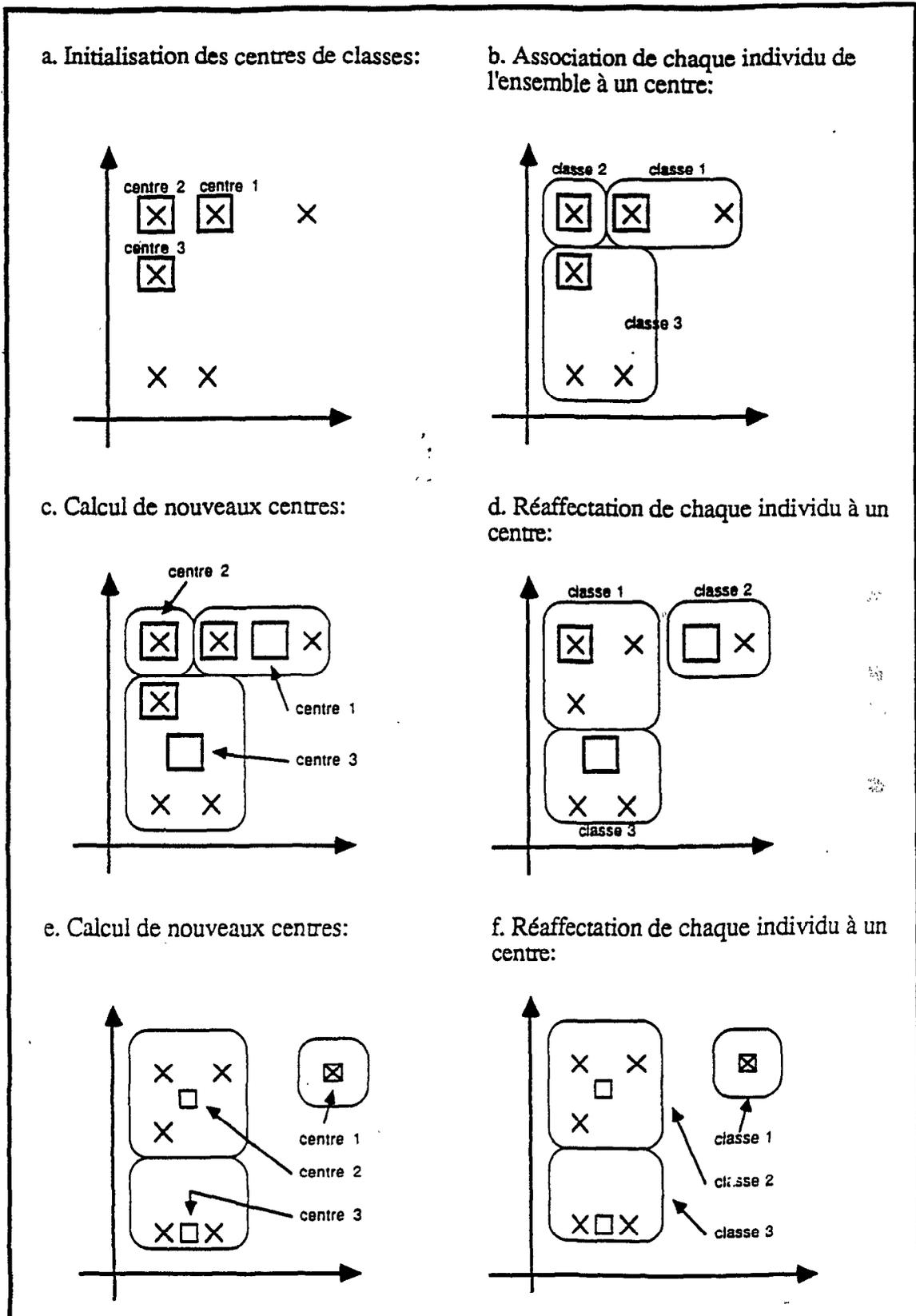


Figure 15 : Illustration de la méthode des centres mobiles à l'aide d'un exemple de partition de six individus en trois classes dans un espace à deux dimensions (Andrianasolo, 1988)

Dans notre application : le niveau de précision demandé étant de 95%, r vaut 1,96 ; $\text{var}(x) = \text{Sup}(\text{var}(x_i))$ tel que $i = (1,p)$: la variance la plus forte sur les p variables (canaux) est retenue (ici, la première composante principale) ; $I = 2$ écarts-type.

- *Le calcul du nombre maximal de classe :*

En théorie, il existe plusieurs méthodes possibles pour déterminer un tel nombre K maximal de classes. En particulier, K peut être égal à la taille n de l'échantillon. La démarche de découpage d'un histogramme en classes adoptée, est celle rappelée et préconisée par Andrianasolo (1987) qui est telle que :

$$K = 5 \text{ Log } n \text{ (logarithme en base } 10)$$

où,

n est l'effectif de l'échantillon représentatif.

Lors des applications, K varie entre 16 et 18 (Pour l'image de mai d'Oursi : $n = 3498$, $K = 17$; pour l'image de décembre d'Oursi : $n = 2583$, $K = 17$; pour l'image de mai de Mbidi : $n = 1794$, $K = 16$; pour l'image de mai de Namarel : $n = 4753$, $K = 18$; pour l'image de mai de Tessékéré : $n = 3848$, $K = 17$).

1.4. Les variables image :

Les classifications sont effectuées à partir des variables suivantes :

- les canaux bruts : XS1, XS2, XS3,
- l'indice de végétation, noté IV,
- les trois composantes principales issues de l'analyse en composantes principales calculée à partir des trois bandes spectrales Spot (1CP, 2CP, 3CP).

Le choix de ces variables résulte d'un plan d'expérience au cours duquel des classifications ont été effectuées successivement, à partir de différentes combinaisons de ces variables : les canaux bruts, les canaux bruts et l'indice de végétation, les composantes principales et enfin l'ensemble des variables. A l'issue de ces classifications, une comparaison visuelle entre la composition colorée et les images classées à l'aide de ces différentes combinaisons de variables, a été effectuée. A l'issue de cette comparaison, il est apparu que sur les images classées à partir de l'ensemble des variables, la structure du couvert ligneux était la mieux représentée. C'est à dire : les formes des entités de pixels correspondant aux groupements de ligneux sont moins empâtées et les groupements de ligneux de petite taille sont rendus en plus grand nombre sur ces images classées.

1.4.1 L'indice de végétation :

La biomasse photosynthétiquement active se distingue des sols nus et des végétaux secs par un comportement spectral spécifique, notamment dans le Rouge et le Proche Infra-Rouge. Le calcul d'un ratio entre ces deux bandes spectrales, appelé indice de végétation, permet de mettre en évidence sur les images satellitaires, la végétation en activité chlorophyllienne. Nous obtenons un nouveau canal sur lequel les valeurs sont réorganisées, depuis les pixels dont le comportement radiométrique sur les trois bandes spectrales est le plus éloigné d'une réponse spectrale de type chlorophyllien, aux pixels dont le comportement radiométrique en est le plus proche.

Cet indice permet d'estimer la quantité de matière végétale ou l'indice foliaire. L'indice foliaire représente la surface totale des feuilles contenues dans une colonne de hauteur égale au couvert et par unité de surface. La réflectance d'un couvert végétal est d'abord déterminée par l'indice foliaire, lequel en général, en période de croissance normale, est corrélé avec la concentration en chlorophylle (Barriou et al, 1985).

Nous utilisons ici l'indice de végétation proposé par Rouse et al, 1973, appelé aussi "Normalised Vegetation Index" (NVI), dont le ratio est le suivant :

$$NVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Dans le cas des données Spot, cet indice est calculé à l'aide des canaux XS2 et XS3 :

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

1.4.2. L'analyse en composantes principales :

L'analyse en composantes principales - appelée aussi transformée de Karhunen Loeve lorsqu'elle s'applique à des images - est utilisée ici dans le but d'accroître les contrastes de valeurs des images, en construisant un nouvel agencement des données satellitaires. Ce nouvel agencement des données est obtenu en calculant au sein du nuage de points les axes de variance maximale et en projetant les points dans un nouvel espace défini par ces axes, appelés axe factoriel ou composante principale. La première composante principale correspond à la plus grande dispersion du nuage, elle prend en compte le maximum d'information. Le deuxième axe factoriel et les suivants sont construits de manière orthogonale entre eux, ils prennent en compte successivement le maximum d'information résiduelle. La part de la variance expliquée

par chacun des axes factoriels est décroissante du premier au dernier. Le calcul de chaque axe factoriel permet de construire une nouvelle image où les valeurs sont réétalées et décorréliées. Leur histogramme plus large, apporte des possibilités de partition plus fine et plus contrastée.

Les néocanaux issus de l'analyse en composantes principales contiennent, dans le cas de la première composante principale plus d'information, ou, dans le cas des autres composantes principales, mettent en évidence certaines informations plus difficilement perceptibles sur les canaux bruts. Les deux premiers axes principaux comportent l'essentiel de l'information : l'axe 1 correspondant le plus souvent à une fonction du visible et l'axe 2 à une fonction du proche infrarouge (Girard, 1989).

Comme nous le verrons par la suite, lors de l'analyse des valeurs des centres de classes, ces variables nous ont permis dans certains cas, de discriminer entre elles des classes, dont les valeurs de centre sur les canaux bruts sont très proches. Cependant, l'interprétation de ces données est plus délicate, nous ne sommes plus en effet en présence de données de réflectance.

2. LES UNITÉS PAYSAGIQUES MISES EN ÉVIDENCE PAR LES CLASSIFICATIONS SUR LES SITES D'OURSI ET DU FERLO :

2.1. La méthode d'analyse des classes et d'identification des unités paysagiques :

Chaque classe ou unité paysagique est décrite par les valeurs des centres de gravité ou valeurs moyennes sur chaque variable. Ces valeurs sont différentes d'une classe à l'autre et pour un même thème varient en fonction du nombre de classes demandé. L'analyse successive des images classées issues des partitions en nombre croissant de classes, permet de mettre en évidence les principales unités paysagiques dont les valeurs moyennes sur les sept variables étudiées, de la ou des classes qui leur sont associées sont spécifiques. Les sept variables étudiées sont; nous le rappelons, le canal XS1, le canal XS2, le canal XS3, l'indice de végétation (IV), la première composante principale (1CP), la deuxième composante principale (2CP), la troisième composante principale (3CP). Ne sont analysées ici, que les classes ayant un large recouvrement spatial et/ou les classes correspondant à un thème intéressant ou tout du moins reconnu.

Lors de l'exposé, les valeurs moyennes des classes sont illustrées à l'aide de graphes représentant les valeurs moyennes sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV) des classes de l'image classée donnée en illustration (Fig.16, 17, 31, 34, 35). Ces valeurs sont représentées sous forme de courbes pour la commodité de la lecture.

Si l'on considère les valeurs moyennes d'une classe sur les canaux bruts, comme étant des valeurs moyennes de la luminance pour l'ensemble de la région couverte par cette classe, on peut alors tenter de mettre en relation, les valeurs moyennes des classes avec des valeurs de réflectance mesurées au sol sur des états de surface connus. La mise en relation des valeurs moyennes des classes avec les mesures radiométriques effectuées au sol, permet d'interpréter en terme d'état de surface, les valeurs moyennes des différentes unités paysagiques mises en évidence lors des classifications.

La mise en relation des valeurs moyennes des classes et des valeurs radiométriques mesurées au sol est menée de la façon suivante : les valeurs radiométriques enregistrées au sol sur des états de surface connus, sont analysées les unes par rapport aux autres. On étudie les valeurs enregistrées au sol sur chaque bande spectrale et le rapport de ces valeurs d'une bande à l'autre. On obtient ainsi une connaissance relative

des caractéristiques radiométriques de chaque état de surface distingués au sol. De la même façon, les valeurs moyennes des classes sont analysées les unes par rapport aux autres. A l'issue de ces deux analyses, on obtient une typologie des réponses radiométriques des différents états de surface au sol et des valeurs moyennes sur image que l'on peut comparer.

Les mesures radiométriques au sol ont été effectuées sur des parcelles ou des tronçons jugés représentatifs des principaux états de surface rencontrés sur les deux sites, à l'exception des groupements de ligneux, faute de moyens techniques adéquats. Elles ont été enregistrées à l'aide d'un radiomètre CIMEL à trois canaux, calibrés dans les longueurs d'onde des capteurs HRV du satellite SPOT (mode multispectral). Cet instrument permet de mesurer directement la réflectance des objets sous une ouverture angulaire de 12° . La tête de lecture est placée à une hauteur de deux mètres au dessus du sol, couvrant ainsi une surface d'environ $1,5 \text{ m}^2$. Ces mesures ont été effectuées à des heures proches de midi, où le soleil est au zénith.

Lors de l'exposé, nous étudierons d'abord les mesures radiométriques effectuées au sol, puis à la lumière de ces connaissances, de l'exposé théorique du comportement spectral des différents états de surface (§ 3.2., partie I) et de la connaissance du terrain, nous analyserons les valeurs moyennes des classes et tenterons de caractériser les états de surface des différentes unités paysagiques reconnues sur les images satellitaires.

2.2. Les principales unités paysagiques du site d'Oursi :

L'analyse des unités du paysage du site d'Oursi à l'aide des données satellitaires, est effectuée conjointement à partir des classifications en nombre croissant de classes interpolées à l'image de décembre et de celles interpolées à l'image de mai. De manière générale, les valeurs moyennes des classes varient moins en fonction du nombre de classes demandé, sur l'image de mai que sur l'image de décembre. De même qu'aux deux dates, les limites spatiales des classes sur les images classées varient peu, surtout pour les milieux cuirassés.

Sur les images classées (Fig.16 et 17), le paysage d'Oursi apparaît organisé en deux familles de classes correspondant aux deux ensembles paysagiques suivants :

- les milieux sableux,
- les milieux cuirassés.

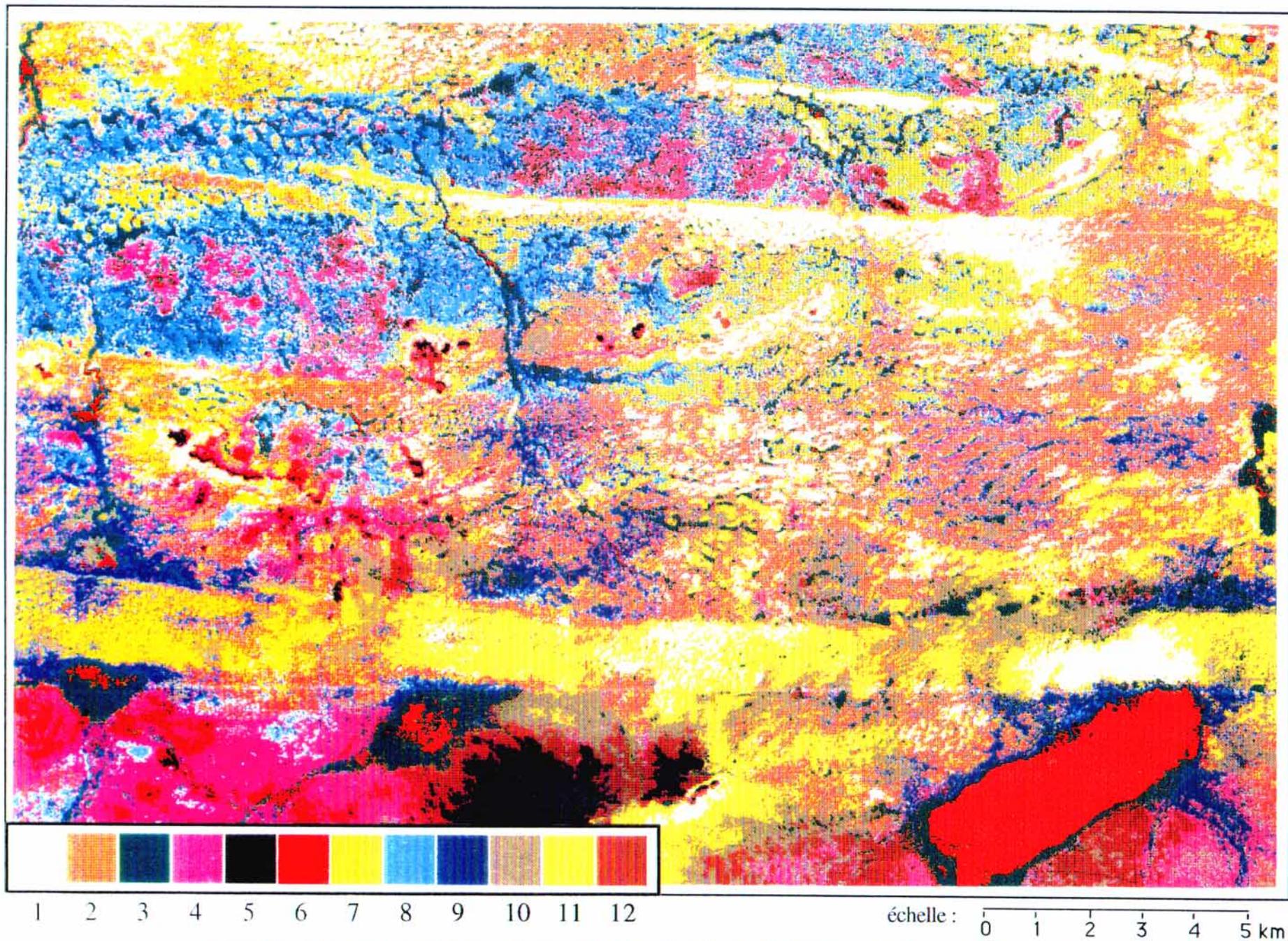


Figure 16 : L'image des unités paysagiques de décembre du site d'Oursi (image classée en 12 classes)

LEGENDE

- 1 - Sables vifs
- 2 - Plaines interdunaires sableuses méridionales
- 3 - Groupements de ligneux
- 4 - Centre des plaines interdunaires cuirassées
- 5 - Massif du Tin Edjar et buttes cuirassées
- 6 - Groupements de ligneux et végétation aquatique
- 7 - Bandes dunaires et plaines interdunaires sableuses septentrionales
- 8 - Plaines interdunaires cuirassées
- 9 - Groupements de ligneux
- 10 - Portions de la bande dunaire méridionale
- 11 - Bande dunaire méridionale et erg ancien
- 12 - Périphérie du massif du Tin Edjar et des buttes cuirassées

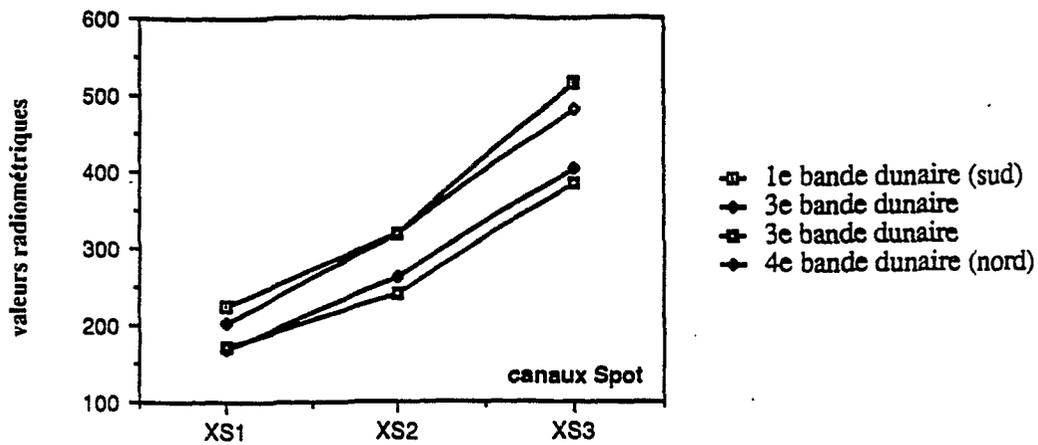
Figure 16 : L'image des unités paysagiques de décembre du site d'Oursi
(image classée en 12 classes)

2.2.1. Les milieux sableux du site d'Oursi :

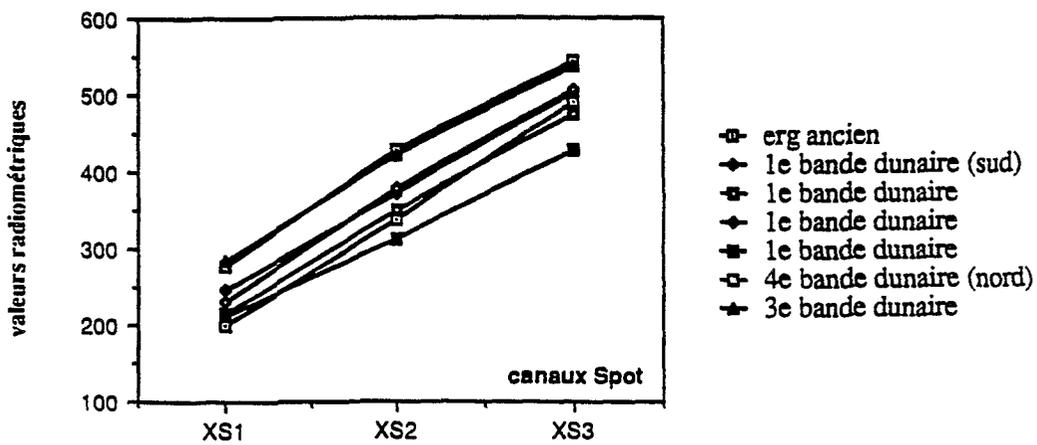
Des mesures radiométriques effectuées sur le terrain (novembre 1987), sur des parcelles représentatives des principaux composants des milieux sableux, nous donnent un aperçu du comportement spectral de leurs états de surface (Fig.18). Nous avons distingué trois principaux types d'états de surface :

- le sol sablo-argileux recouvert d'un tapis dense d'herbacées sèches,
 - le sol sablo-argileux couvert d'herbacées sèches piétinées,
 - le sol sablo-argileux à pellicule superficielle.
- La réponse radiométrique du sol sablo-argileux recouvert d'un tapis dense d'herbacées sèches (Fig.18) et notamment de *Cenchrus biflorus*, se caractérise par des valeurs croissantes de XS1 à XS3 avec une différence de valeur plus élevée entre XS2 et XS3. Les valeurs de réflectance de cet état de surface en XS1 et XS2 sont nettement inférieures à celles du sol sablo-argileux couvert d'herbacées piétinées.
 - La réponse radiométrique du sol sablo-argileux couvert d'herbacées piétinées (Fig.18) se caractérise par des valeurs régulièrement croissantes de XS1 à XS3. Les valeurs de réflectance enregistrées sur des parcelles des troisième et quatrième bandes dunaires, les plus septentrionales, sont plus élevées sur les trois canaux que celles mesurées sur des parcelles de la bande dunaire méridionale (première bande) et de l'erg ancien.
 - La réponse radiométrique du sol sablo-argileux à pellicule superficielle se caractérise par des valeurs régulièrement croissantes de XS1 à XS3 proches de celles du sol sablo-argileux couvert d'herbacées piétinées de la bande dunaire méridionale. On constate à nouveau des valeurs de réflectance plus élevées pour la parcelle de la bande dunaire la plus septentrionale (quatrième bande), par rapport à celles des parcelles de la bande dunaire méridionale (première bande), qui peuvent être liées à une couleur du sable plus réfléchissante. Des valeurs de réflectance mesurées sur une parcelle de la bande dunaire méridionale dont le sol sablo-argileux à pellicule superficielle présente des traces de ravinement, se caractérisent par des valeurs très faibles en XS1 et XS2.

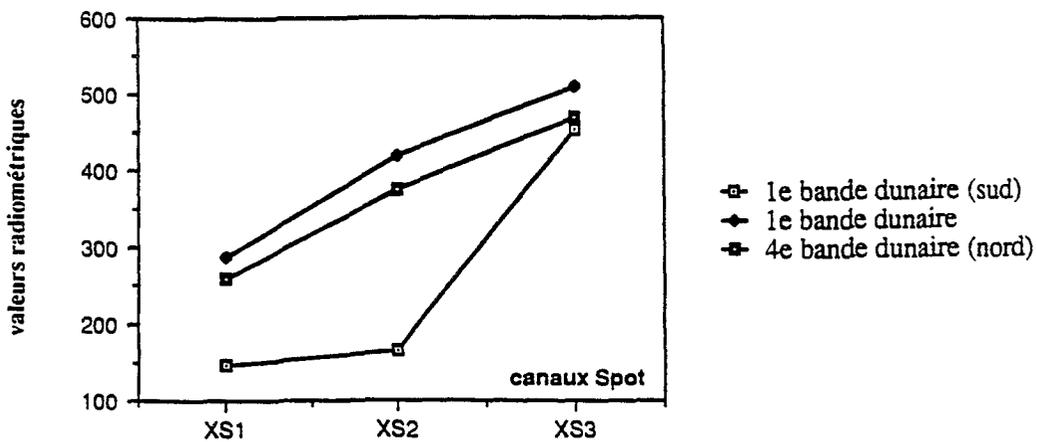
De manière générale, les mesures radiométriques effectuées au sol (Fig.18) mettent en évidence la réflectance plus élevée des sols sablo-argileux nus ou peu couverts, par rapport aux sols recouverts d'un tapis dense d'herbacées sèches, notamment en XS1 et XS2.



Sols sablo-argileux recouverts d'un tapis dense d'herbacées sèches



Sols sablo-argileux couverts d'herbacées sèches piétinées



Sols sablo-argileux à pellicule superficielle

Figure 18 : Les courbes des valeurs radiométriques mesurées sur le terrain de plusieurs états de surface des milieux sableux d'Oursi : les sols sablo-argileux recouverts d'un tapis dense d'herbacées sèches, les sols sablo-argileux couverts d'herbacées sèches piétinées, les sols sablo-argileux à pellicule superficielle

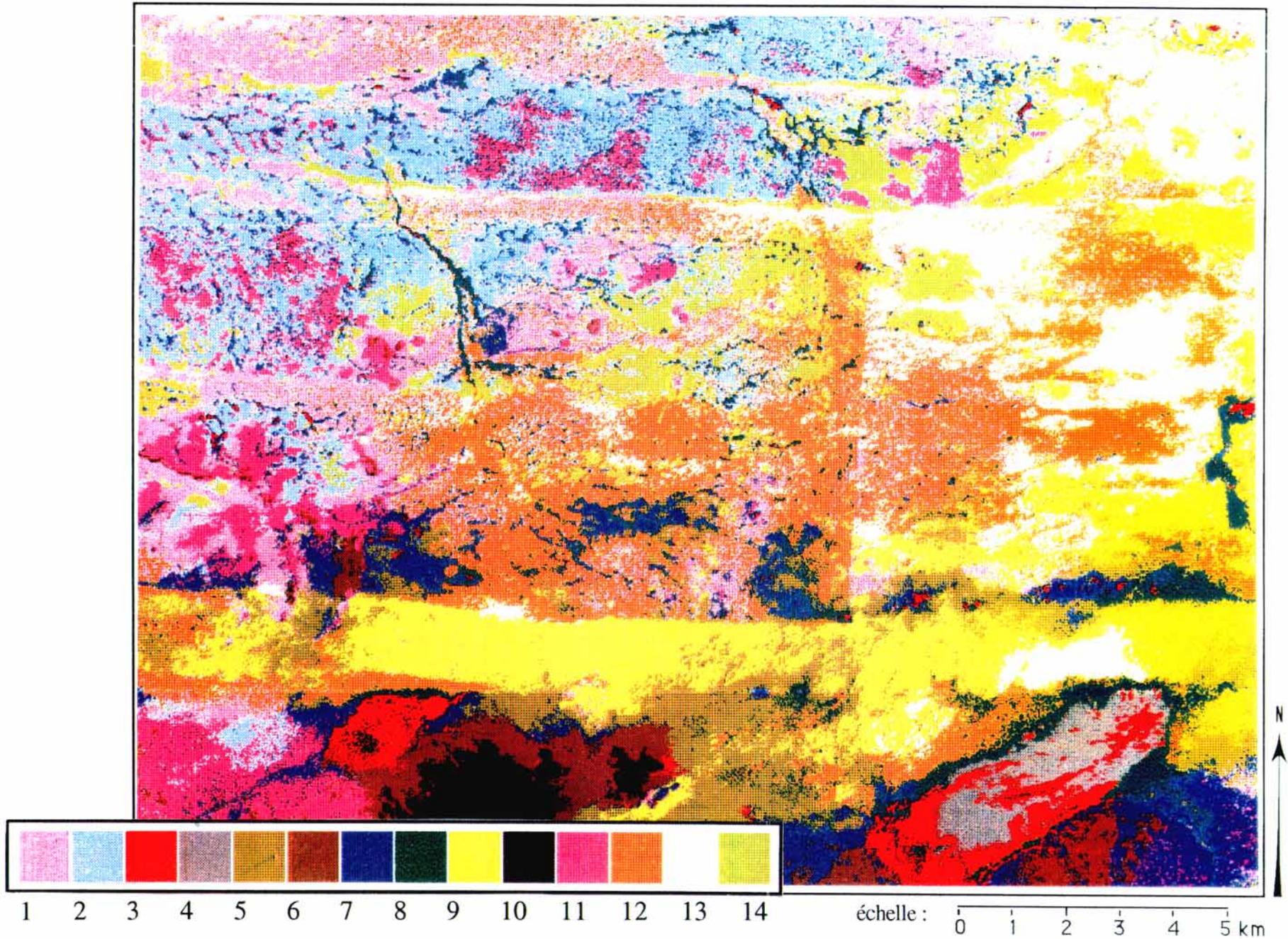


Figure 17 : L'image des unités paysagiques de mai du site d'Oursi (image classée en 14 classes)

LEGENDE

- 1 - Bandes dunaires septentrionales
- 2 - Plaines interdunaires cuirassées
- 3 - Groupements de ligneux et végétation aquatique
- 4 - Mare d'Oursi
- 5 - Portions de la bande dunaire méridionale
- 6 - Périphérie du massif du Tin Edjar et des buttes cuirassées
- 7 - Groupements de ligneux
- 8 - Groupements de ligneux
- 9 - Bande dunaire méridionale
- 10 - Massif du Tin Edjar et buttes cuirassées
- 11 - Centre des plaines interdunaires cuirassées
- 12 - Plaines interdunaires sableuses méridionales
- 13 - Sables vifs
- 14 - Plaines interdunaires sableuses septentrionales

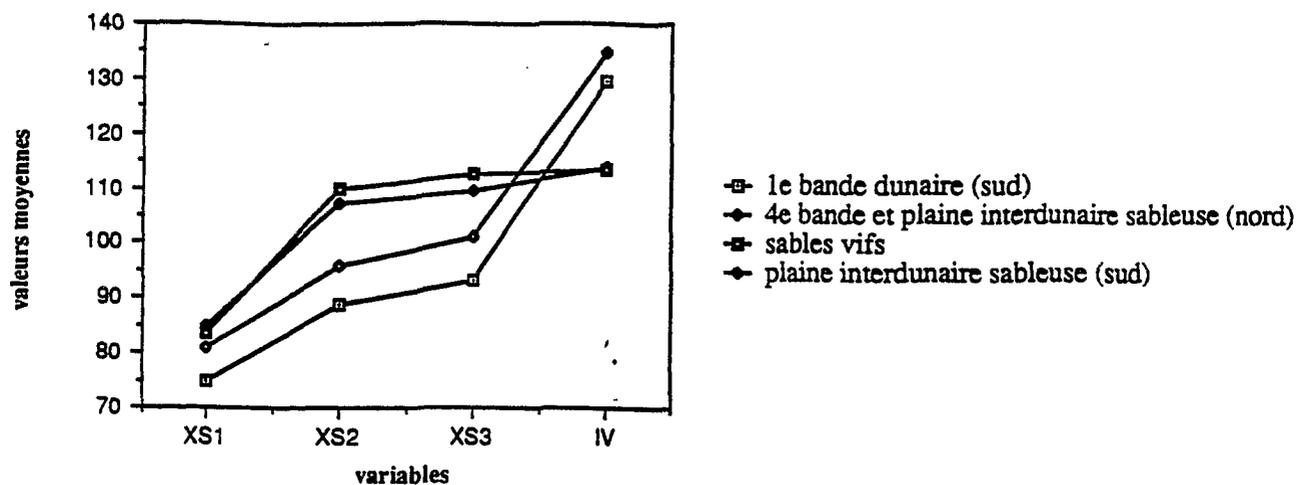
Figure 17 : L'image des unités paysagiques de mai du site d'Oursi (image classée en 14 classes)

Sur les images classées de décembre 1986 et de mai 1987 (Fig.16 et 17), la bande dunaire méridionale (première bande) et les bandes dunaires septentrionales (les trois autres bandes) apparaissent dans deux classes ou deux groupes de classes différents, selon le nombre de classes demandé.

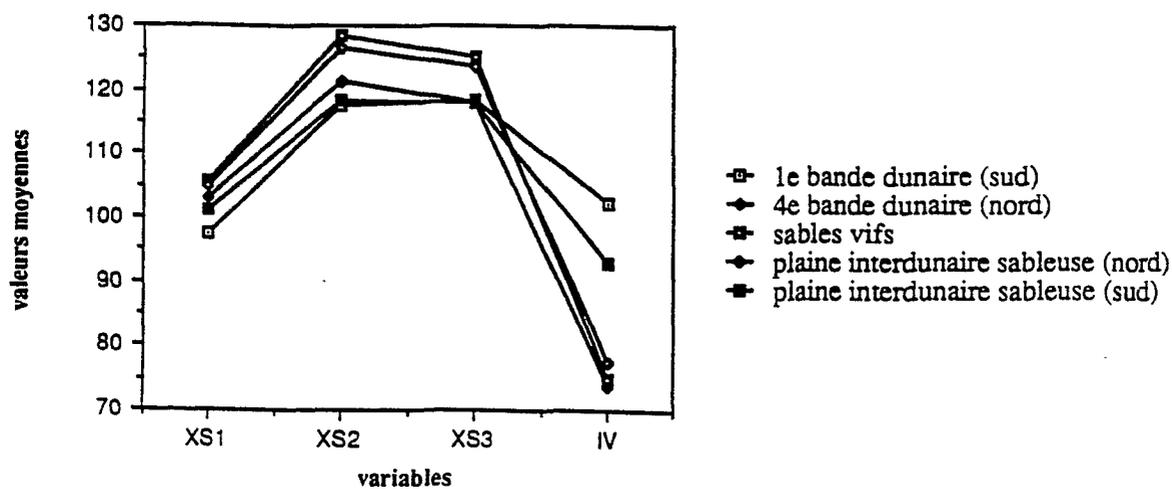
Aux deux dates, les valeurs moyennes sur les trois canaux bruts de la classe "**bandes dunaires septentrionales**" sont plus élevées que celles de la classe "**bande dunaire méridionale**". Sur l'image de décembre, les valeurs moyennes de ces deux classes sur l'indice de végétation, sont proches. Sur l'image de mai, les valeurs moyennes de la classe "bande dunaire méridionale" sur l'indice de végétation, sont supérieures à celles de la classe "bandes dunaires septentrionales" (Fig.19).

Les valeurs moyennes plus élevées sur les canaux bruts de la classe occupant les bandes dunaires septentrionales, par rapport à celles des bandes dunaires méridionales indiqueraient donc, par comparaison avec les mesures radiométriques effectuées au sol, des sols plus dénudés sur ces unités. En l'absence d'étude de l'état de la couverture herbacée au sol, à la même date que l'enregistrement de l'image satellitaire, nous ne pouvons émettre d'hypothèses à propos du développement de la couverture herbacée : nous savons que celui-ci est extrêmement changeant d'une année à l'autre en fonction de la distribution spatiale et temporelle des pluies.

Les mesures radiométriques effectuées sur le terrain, sur les sols nus ou peu couverts, indiquent pour les mêmes types d'états de surface, des valeurs de réflectance plus élevées sur les bandes dunaires septentrionales par rapport à celles de la bande dunaire méridionale. Ceci peut être lié à la couleur du sable, à des états de surface moins rugueux et donc plus réfléchissants sur les bandes dunaires septentrionales ... Les états de surface de la bande dunaire méridionale sont beaucoup plus hétérogènes par rapport à ceux des autres bandes dunaires : de nombreuses plages dénudées à pellicule superficielle et recouvertes de cyanophycées s'interpénètrent avec des plages de sables pulvérulents et des plages de sols recouvertes d'herbacées. Cette forte hétérogénéité des états de surface et le caractère moins réfléchissant des sols dénudés à pellicule superficielle et recouverts de cyanophycées, semblent expliquer les valeurs moyennes plus faibles sur les trois canaux bruts de la classe "bande dunaire méridionale". La présence d'un piquetis dense de ligneux constitué de *Combretum glutinosum* et *Balanites aegyptiaca* sur la bande dunaire méridionale, contribue aussi à cette grande hétérogénéité des états de surface. Sur les bandes dunaires septentrionales, le piquetis de ligneux entre les groupements de ligneux est beaucoup moins important.



Milieux sableux d'Oursi (décembre)



Milieux sableux d'Oursi (mai)

Figure 19 : Les valeurs moyennes des classes des milieux sableux d'Oursi sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 12 classes de l'image de décembre 86 et pour la partition à 14 classes de l'image de mai 87

Sur les images classées de l'image de mai 1986, les valeurs moyennes de la classe "bande dunaire méridionale" sur l'indice de végétation, sont plus élevées que celles de la classe "bandes dunaires septentrionales". Les groupements de ligneux situés dans la plaine interdunaire méridionale et sur la bande dunaire méridionale, ont une grande extension spatiale sur les images classées, par comparaison avec ceux de la partie septentrionale du site d'Oursi et ceux des mêmes secteurs sur les images classées de décembre. Au mois de mai 1986, 29,9 mm de pluies ont été enregistrés par la station météorologique de Jalafanka situé à moins de cinq kilomètres au sud de ces deux unités. Nous connaissons l'irrégularité spatiale des pluies en milieu sahélien. Les valeurs moyennes élevées sur l'indice de végétation et la grande extension spatiale des groupements de ligneux sur ces deux unités, semblent traduire la présence d'un couvert végétal vert qui devrait sa croissance aux premières pluies et dont le développement serait limité à ce secteur.

Sur les images classées, l'erg vif apparaît dans une classe différente que l'on appelle "**sables vifs**". Des portions des bandes dunaires et de la partie occidentale des plaines interdunaires sableuses sont aussi classés dans cette classe. Aux deux dates (Fig.19), les valeurs moyennes de la classe "sables vifs" sont sur les trois canaux bruts beaucoup plus élevées que celles de la classe "bande dunaire méridionale" et légèrement plus élevées que celles de la classe "bandes dunaires septentrionales". Sur l'image de décembre, les valeurs moyennes de la classe "sables vifs" sur l'indice de végétation, sont proches des deux classes occupant les bandes dunaires. Sur l'image de mai, les valeurs moyennes de la classe "sables vifs" sur l'indice de végétation, sont bien inférieures à celles de la classe "bande dunaire méridionale" et très proches de celles de la classe "bandes dunaires septentrionales". Ces valeurs élevées sur les canaux bruts mettent en évidence le caractère très réfléchissant de ces surfaces sableuses dénudées.

Au sein des plaines interdunaires sableuses, une frontière apparaît sur les images classées (Fig.16 et 17), selon une diagonale NE-SW, entre le domaine sableux septentrional et le domaine sableux méridional. La partie méridionale et occidentale correspond aux abords de la bande dunaire méridionale et à ceux du lit du Gountouré. On distingue deux classes :

- au nord, la classe "**plaine interdunaire sableuse septentrionale**",
- au sud, la classe "**plaine interdunaire sableuse méridionale**".

Sur les images classées de décembre les valeurs moyennes de la classe "plaine interdunaire sableuse septentrionale" sont confondues avec celles de la classe "bandes dunaires septentrionales" et proches de celles de la classe "sables vifs". Les valeurs

moyennes de la classe "plaine interdunaire sableuse méridionale" sont plus proches de celles de la classe "bande dunaire méridionale" (Fig.19).

Sur les images classées de mai, les valeurs moyennes de la classe "plaine interdunaire sableuse septentrionale", sont supérieures sur les trois canaux bruts, à celles de la classe "bandes dunaires septentrionales" et très proches de celles de la classe "sables vifs" sur toutes les variables (Fig.19). Les valeurs moyennes de la classe "plaine interdunaire sableuse méridionale" sont proches ou confondues avec celles de la classe "bande dunaire méridionale" sur toutes les variables. Sur l'indice de végétation, les valeurs moyennes de la classe "plaine interdunaire sableuse méridionale" élevées par rapport aux autres classes des milieux sableux, sont légèrement inférieures à celles de la classe "bande dunaire méridionale". Nous avons vu précédemment que ces valeurs pourraient être liées à une reprise du couvert végétal sur cette unité, grâce aux premières pluies de l'année.

La proximité des valeurs moyennes de la classe "plaine interdunaire sableuse septentrionale" et de celles de la classe "sables vifs", reflète la forte dégradation du couvert végétal sur cette unité et la forte proportion de surfaces dénudées, notamment à proximité de la mare de Ganadaori. Sur le terrain, ces unités sont colonisées par un piquetis lâche de *Balanites aegyptiaca*, les groupements de ligneux sont pratiquement absents et en novembre 1987, le tapis herbacé était très lâche. Par contre, sur la plaine interdunaire sableuse méridionale, la présence d'un couvert ligneux diffus, plus dense, se traduit par des valeurs moyennes de cette classe plus faibles sur les canaux bruts et plus élevées sur l'indice de végétation.

2.2.2. Les milieux cuirassés du site d'Oursi :

Cette unité lithologique couvre les plaines interdunaires de la partie ouest et nord du secteur étudié. Les sols des plaines interdunaires occupées par la brousse tigrée, apparaissent sur les images classées (Fig.16 et 17) dans deux classes dont les limites spatiales coïncident étroitement avec celles des surfaces occupées par la brousse tigrée :

- une classe occupant l'ensemble de cette unité et dont les limites correspondent étroitement aux aires couvertes par la brousse tigrée, appelée "**plaines interdunaires cuirassées**",
- une classe spatialement incluse dans la précédente classe, qui occupe ponctuellement le centre de cette unité, appelée "**centre des plaines interdunaires cuirassées**".

Sur les bandes nues des aires de brousse tigrée, nous avons distingué les états de surface suivants, sur lesquels nous avons procédé à des mesures radiométriques :

- les sols sablo-argileux à pellicule superficielle,
- les sols sablo-argileux recouverts de sables grossiers,
- les sols sablo-argileux couverts de gravillons ferrugineux.

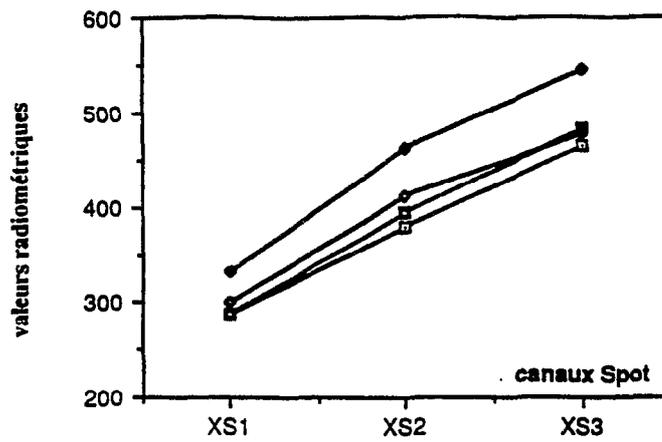
- La réponse radiométrique (Fig.20) des sols sablo-argileux à pellicule superficielle, se caractérise par les valeurs de réflectance sur les trois bandes spectrales les plus élevées, parmi les trois états de surface cités ci-dessus. Celles-ci sont régulièrement croissantes de XS1 à XS3. Ce comportement spectral est similaire à celui d'états de surface proches observés sur les bandes dunaires. Cependant, les valeurs radiométriques des sols sablo-argileux à pellicule superficielle des bandes nues de la brousse tigrée, sont légèrement plus élevées dans les trois longueurs d'onde, que celles enregistrées sur les mêmes sols sur bandes dunaires.

- Les valeurs de réflectance des sols sablo-argileux recouverts de sables grossiers sont croissantes de XS1 à XS3, avec une différence de valeurs plus élevée entre XS1 et XS2, qu'entre XS2 et XS3.

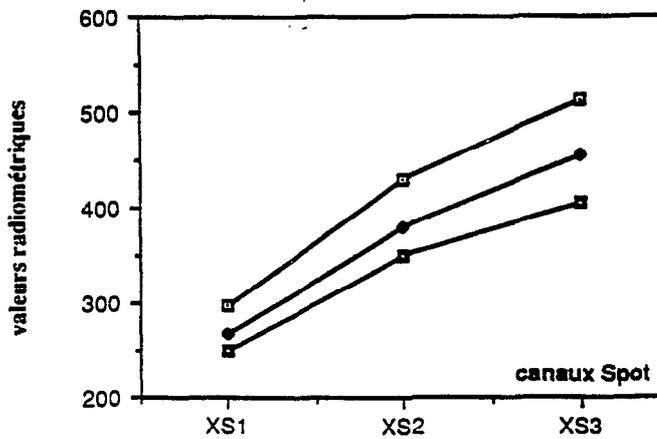
- Les sols sablo-argileux recouverts de gravillons ferrugineux, ont eux aussi une réponse radiométrique caractérisée par des valeurs croissantes de XS1 à XS3, mais avec une différence de valeurs plus faible entre XS2 et XS3, qu'entre XS1 et XS2. Les valeurs radiométriques de cette surface sont plus faibles sur les trois bandes spectrales que celles des autres composants.

Sur les images, les classes des milieux cuirassés (Fig.21) se caractérisent par des différences de valeurs moins élevées entre les trois canaux bruts, par rapport aux valeurs moyennes des classes des milieux sableux précédemment décrites. Cette réponse spectrale est proche de la réponse théorique des sols nus (Fig.5, partie I).

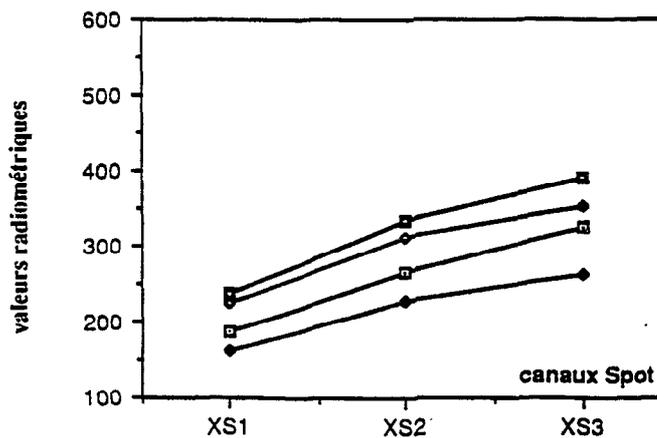
Ces deux classes ont aux deux dates des valeurs moyennes différentes sur toutes les variables. La classe "centre des plaines interdunaires cuirassées" se caractérise par rapport à la classe "plaines interdunaires cuirassées" par des valeurs moyennes bien plus faibles sur les trois canaux bruts et ceci aux deux dates. La mise en relation des faibles valeurs moyennes sur les trois canaux bruts de la classe "centre des plaines interdunaires cuirassées" avec les faibles valeurs de réflectance enregistrées au sol sur des surfaces recouvertes de gravillons ferrugineux, semblent indiquer la présence de



Sols sablo-argileux à pellicule superficielle

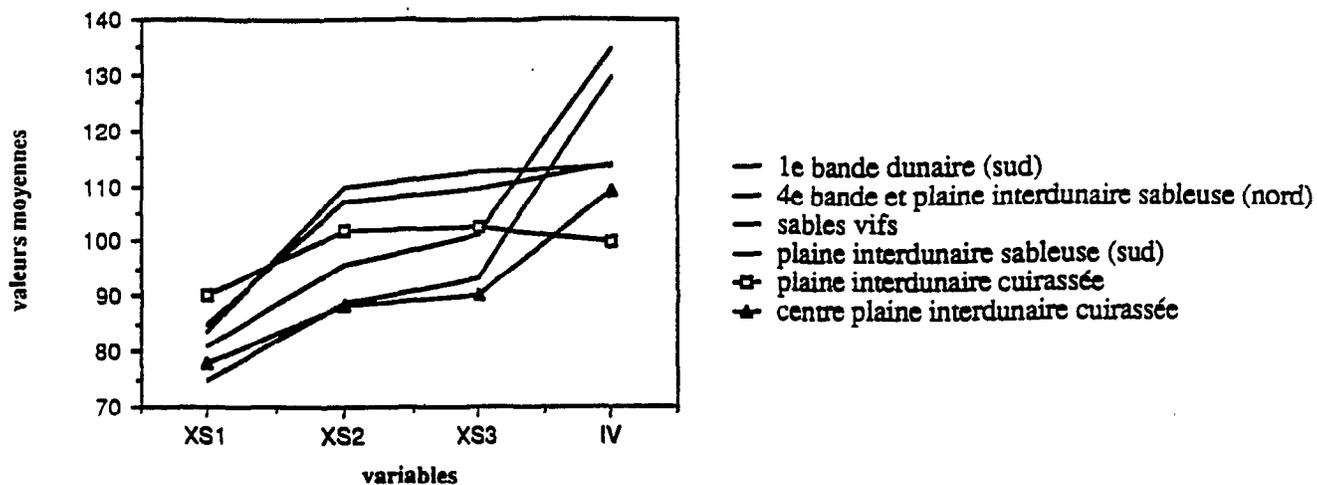


Sols sablo-argileux recouverts de sables grossiers

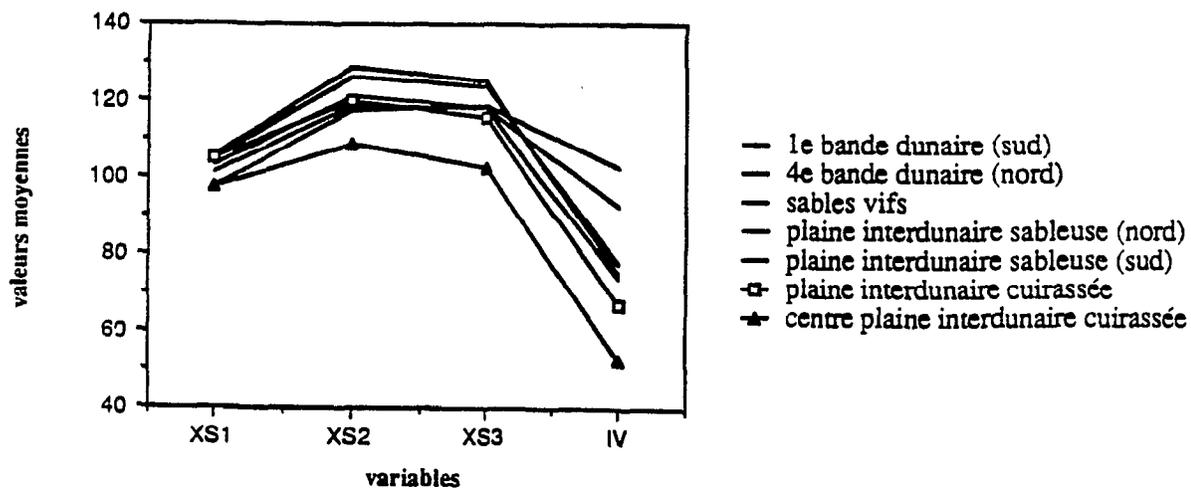


Sols recouverts de gravillons ferrugineux

Figure 20 : Les courbes des valeurs radiométriques mesurées sur le terrain de plusieurs états de surface des bandes nues des milieux cuirassés d'Oursi : les sols sablo-argileux à pellicule superficielle, les sols sablo-argileux recouverts de sables grossiers, les sols recouverts de gravillons ferrugineux



Milieux cuirassés d'Oursi (décembre)



Milieux cuirassés d'Oursi (mai)

Figure 21 : Les valeurs moyennes des classes des milieux cuirassés d'Oursi sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 12 classes de l'image de décembre 86 et pour la partition à 14 classes de l'image de mai 87

gravillons ferrugineux ou l'affleurement de la cuirasse dans les surfaces couvertes par cette classe.

Les valeurs moyennes de la classe "plaines interdunaires cuirassées" plus élevées sur les trois canaux bruts, traduisent la présence d'épandages et de placages sableux. Sur l'image de mai, les valeurs moyennes de cette classe varient plus fortement en fonction du nombre de classes demandé, par rapport à celles de la classe "centre des plaines interdunaires cuirassées". Sur l'image classée de décembre, une classe apparaît à la périphérie de la classe "plaines interdunaires cuirassées". Ces caractéristiques rendent compte d'une hétérogénéité plus forte des états de surface au sein de cette unité paysagique.

Sur le terrain, nous avons constaté que les épandages de gravillons ferrugineux sont présents sur les bandes nues les plus larges. Ils se rencontrent dans des faciès de brousse tigrée, où les bandes boisées ont une grande extension spatiale. Par contre les bandes nues des faciès de brousse tigrée composés de petits fourrés peu espacés, sont entièrement recouvertes par des épandages sablo-argileux.

Sur les images classées, la classe "centre des plaines interdunaires cuirassées" se rencontre en effet, sur les bandes nues des aires de brousse tigrée où les fourrés sont les plus épais et les plus espacés, à l'exception de l'aire de brousse tigrée à grandes bandes située au sud de la mare de Feririlia (Fig.8, partie I). Dans cette aire de brousse tigrée, la classe "centre des plaines interdunaires cuirassées" est peu représentée. A cet endroit, la plaine interdunaire est plus étroite et la bande dunaire septentrionale plus large. Les accumulations éoliennes semblent plus épaisses sur cette portion de la plaine interdunaire.

Les variations plus fortes des valeurs moyennes de la classe "périphérie des plaines interdunaires cuirassées", surtout représentée dans les faciès de brousse tigrée à petites bandes, peuvent être liées au pouvoir de résolution du satellite : les valeurs radiométriques enregistrées intègrent au sein du pixel, à la fois le sol nu et les frondaisons des petits fourrés.

2.2.3. Les groupements de ligneux sur le site d'Oursi :

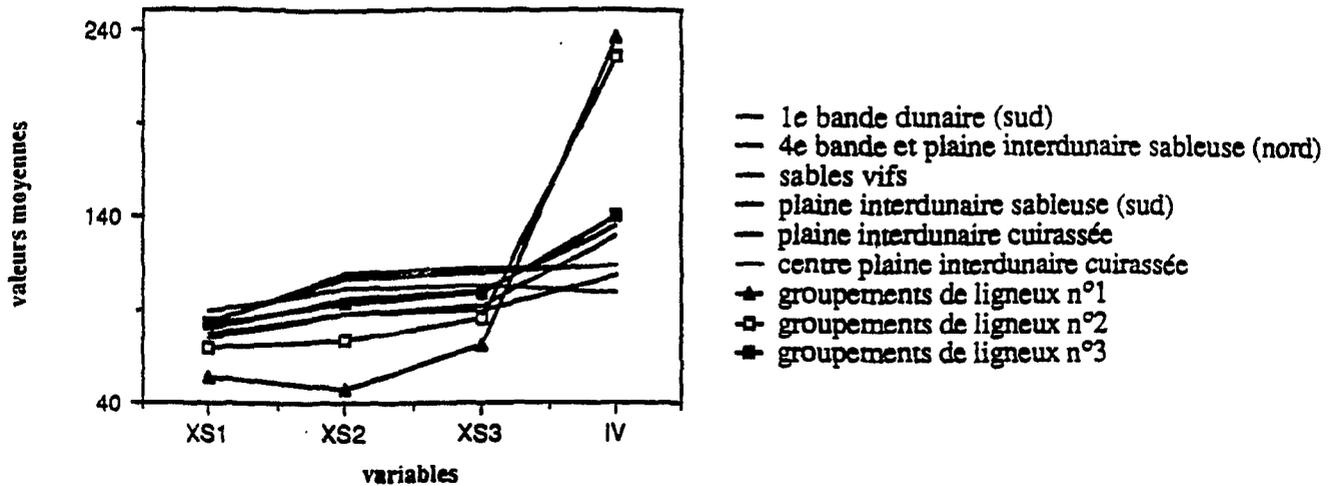
Les classifications non dirigées mettent en évidence, suivant le nombre de classes demandé, une, deux ou trois classes radiométriques correspondant à la classe thématique "groupements de ligneux". Nous analysons ici les valeurs moyennes des trois classes "groupements de ligneux" issues des partitions à plus de 10 classes.

Nous distinguons deux familles de classes :

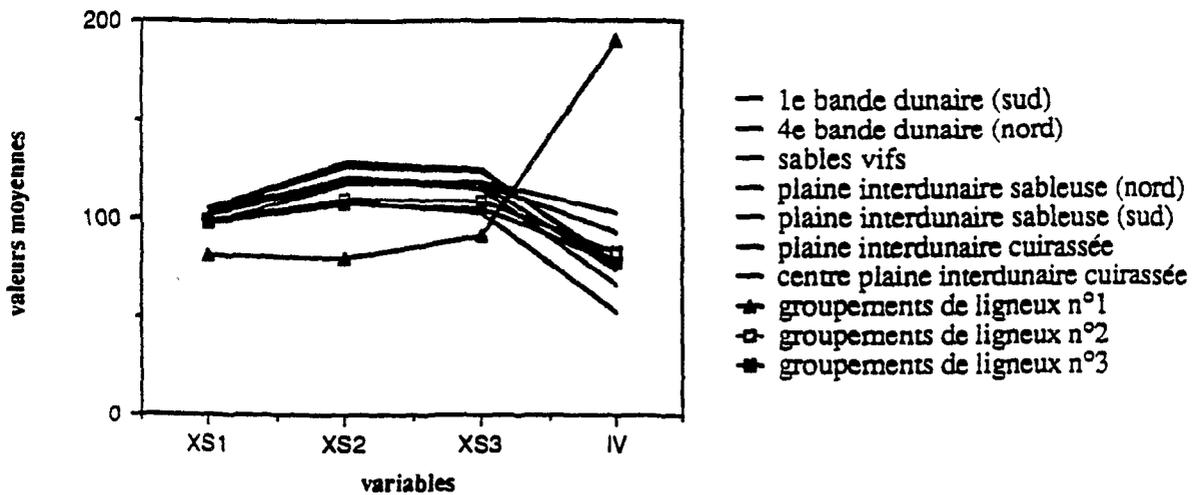
- une première classe dont les valeurs moyennes sur l'indice de végétation sont les plus élevées. Les valeurs moyennes de la classe "groupements de ligneux n°1" (Fig.22) sont plus faibles sur les canaux bruts que celles des deux autres classes. Cette classe se caractérise par des valeurs décroissantes de XS1 à XS2 et croissantes de XS2 à XS3. Cette tendance est particulièrement bien marquée sur l'image de décembre 1986. Les valeurs moyennes de cette classe varient peu sur les cinq essais et demeurent parfois semblables quand on modifie le nombre de classes demandé.

Sur les images classées, cette classe correspond aux mares permanentes et semi-permanentes (la mare de Dibissi, la mare de Tin Edjar et la mare d'Oursi, bien que la mare d'Oursi soit occupée en son centre par des herbacées et non par des arbres et des arbustes), aux axes des cours d'eau intermittents et aux centres des bosquets les plus épais (cette classe est représentée en rouge sur les figures 16 et 17). Comme nous l'avons vu dans la partie I, le spectre floristique des individus occupant les mares et le centre des bosquets épais est plus large et leur densité plus forte. Les gros groupements de ligneux sont occupés en leur centre par de grands individus et certaines espèces de type soudanien, à fort développement foliaire. Cette caractéristique influence la réponse spectrale de ces groupements de ligneux et se traduit par une réponse spectrale proche de la réponse typique d'une végétation verte (cf. & 3.2., partie I).

- une deuxième classe, regroupant en fait la classe "groupements de ligneux n°2" et la classe "groupements de ligneux n°3", se caractérise aux deux dates, par des valeurs moyennes plus élevées sur les trois canaux bruts que celles de la première classe. Sur l'image de décembre, les valeurs moyennes sont croissantes de XS1 à XS3. Sur l'image de mai, elles sont croissantes de XS1 à XS2, puis décroissantes de XS2 à XS3. Sur l'image de décembre, les valeurs moyennes de ces deux classes sur l'indice de végétation, sont légèrement inférieures à celle de la classe précédente, mais plus élevées par rapport à l'ensemble des classes générées par les classifications. Sur l'image de mai, les valeurs moyennes de ces deux classes sur l'indice de végétation, sont inférieures à celles de la classe "bande dunaire méridionale". Les valeurs moyennes de ces deux classes sont aux deux dates, différentes sur les trois composantes principales. Les valeurs moyennes de ces classes varient plus fortement d'une partition à l'autre, en fonction du nombre de classes demandé et notamment sur l'image de mai.



Unités paysagiques d'Oursi (décembre)



Unités paysagiques d'Oursi (mai)

Figure 22 : Les valeurs moyennes des classes des groupements de ligneux d'Oursi sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 12 classes de l'image de décembre 86 et pour la partition à 14 classes de l'image de mai 87

Sur les images classées, ces deux classes occupent la périphérie de la classe "groupements de ligneux n°1" dans les gros groupements de ligneux et les bosquets de taille moyenne (ces classes sont représentées en bleu et en vert sur les figures 16 et 17).

La répartition spatiale des classes, comme nous la percevons sur l'image classée de décembre 1986 (Fig.16) semble être liée à la densité du couvert ligneux et aux espèces ligneuses. La périphérie des gros groupements de ligneux et les petits bosquets sont occupés par des espèces de petite taille telles que *Boscia senegalensis* ou à faible développement foliaire telles que *Balanites aegyptiaca*. Leur densité est plus faible. Ces caractéristiques se traduisent par une réponse spectrale non caractéristique d'une végétation en activité chlorophyllienne, mais qui est néanmoins spécifique par rapport aux autres unités du paysage.

2.3. Les principales unités paysagiques du site du Ferlo :

Si la reconnaissance des ligneux a été possible sur l'image de décembre 1986, parce qu'ils ont une réponse radiométrique bien spécifique, l'analyse des unités paysagiques sur cette image, s'est avérée impossible en raison de la présence de nuages. La caractérisation des unités paysagiques des trois secteurs de l'image du Ferlo, à l'exception de celle des groupements de ligneux, a été menée exclusivement à partir des images classées calculées à partir de l'image de mai 1988.

Au sein de ce milieu sableux, nous distinguons :

- les classes se caractérisant par de faibles valeurs moyennes sur les trois canaux bruts.

Ces classes correspondent aux unités paysagiques suivantes :

- "le centre des bandes dunaires" des secteurs de Namarel et Tessékré,
- "la périphérie des bandes dunaires" des secteurs de Namarel et Tessékré,
- "la plaine interdunaire".

- Les classes ayant des valeurs moyennes élevées sur les trois canaux bruts :

- "les bandes dunaires orientées NE-SW" du secteur de Mbidi,
- "les bandes dunaires de la partie orientale" du secteur de Namarel,
- "les bandes dunaires orientées NNE-SSW" du secteur de Mbidi,
- "les auréoles autour des forages et des campements".

- Les classes dont les valeurs moyennes sont très élevées sur les canaux bruts et les plus faibles sur l'indice de végétation, comparativement aux valeurs moyennes de l'ensemble des classes analysées :

"les couloirs interdunaires" des secteurs de Namarel et Tessékéré,

"la périphérie des couloirs interdunaires" des secteurs de Namarel et Tessékéré.

- Les classes se caractérisant par les valeurs moyennes sur l'indice de végétation les plus élevées :

"les groupements de ligneux", représentés par deux classes.

- La classe se caractérisant par des valeurs moyennes les plus élevées sur l'indice de végétation, après les classes "ligneux" :

"les épandages sableux de la plaine interdunaire".

Cette typologie met en évidence sur la surface des trois secteurs étudiés, trois ensembles paysagiques dont les caractéristiques radiométriques sont propres :

- le secteur dunaire septentrional,
- le secteur dunaire méridional,
- la plaine interdunaire.

2.3.1. Le comportement spectral des principaux états de surface du Ferlo au sol :

Des mesures radiométriques au sol ont été effectuées en janvier 1990, sur des transects de quelques centaines de mètres, à l'aide d'un radiomètre CIMEL. Ces transects mettent en évidence plusieurs types de réponse radiométrique, caractéristiques des différents états de surface des unités paysagiques précédemment distinguées.

a) Sur les bandes dunaires :

Deux transects ont été mesurés :

- l'un à deux kilomètres au sud de Mbidi, au sommet d'une ondulation dunaire, sur sols dénudés ou peu couverts d'herbacées dans l'aire du secteur dunaire septentrional précédemment décrit (transect n°1, Fig.23),
- et le second sur les bandes dunaires au sud de Vindou Thiengoli, que nous apparentons au paysage des bandes dunaires du secteur dunaire méridional. Ce transect a été mesuré sur un tapis dense d'herbacées sèches au cortège floristique très diversifié : *Eragrostis tremula*, *Chloris prieuri*, *Cenchrus biflorus*, *Schoenefeldia gracilis*, *Tribulus terrestris* ... (transect n°2, Fig.24).

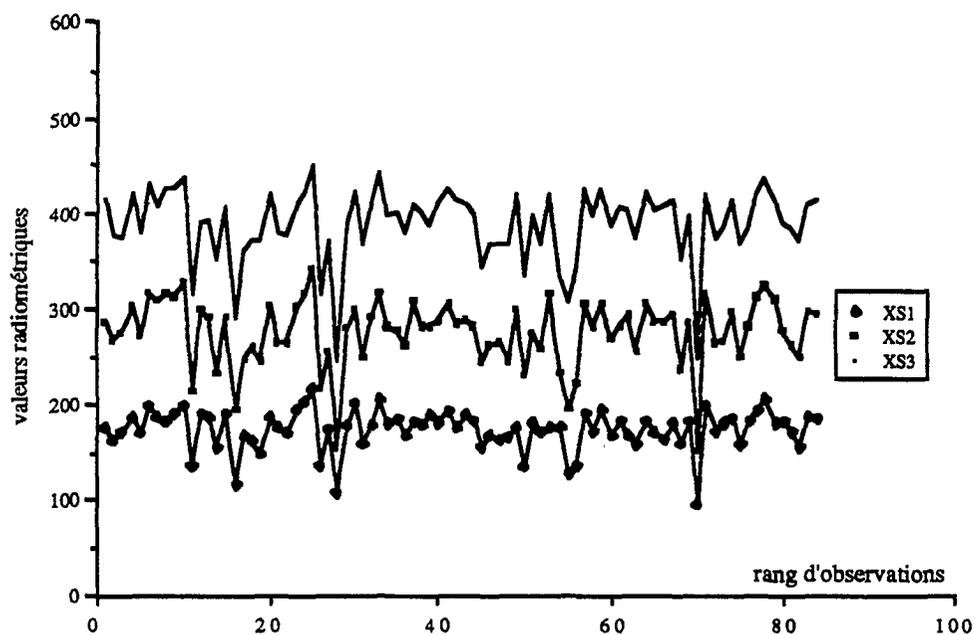


Figure 23 : Transect n°1 : sols sablo-argileux peu couverts d'herbacées au sommet d'une ondulation dunaire, à 2 km au sud du forage de Mbidi, dans le secteur dunaire septentrional (longueur = 400 m, orientation NNW-SSE)

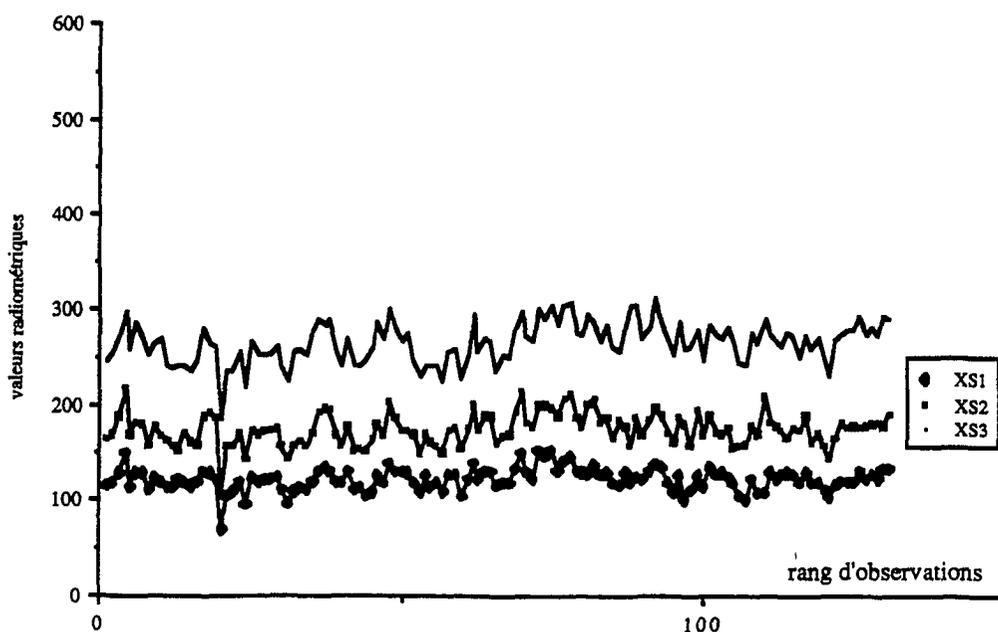


Figure 24 : Transect n°2 : sols sableux recouverts d'un tapis dense d'herbacées sèches au large cortège floristique, sur bandes dunaires au sud de Vindou Thiengoli, dans le secteur dunaire médian (longueur = 500 m, orientation NNW-SSE)

Le transect n°1, effectué au sommet d'une ondulation dunaire se caractérise par des valeurs moyennes régulièrement croissantes sur les trois bandes spectrales. On constate certaines fluctuations des valeurs enregistrées liées à la présence d'herbacées. Celle-ci se traduisant par une baisse des valeurs de réflectance sur les trois bandes spectrales. Les moyennes des valeurs radiométriques enregistrées lors du transect sont : en XS1 : 184, en XS2 : 283, en XS3 : 375. Sur la figure 30, les valeurs moyennes de réflectance de ce transect sont parmi les plus élevées, comparativement à celle des autres transects.

Les valeurs radiométriques du transect n°2, effectué sur un tapis dense d'herbacées sèches, croissent légèrement entre XS1 et XS2 et fortement entre XS2 et XS3. Elles sont nettement inférieures (leur moyenne en XS1 : 121, en XS2 : 174, en XS3 : 265) à celles du transect effectué sur sols dénudés et les plus faibles parmi celles des transects mesurés (Fig.30). Elles se caractérisent par leur forte stabilité, liée à des états de surface relativement homogènes.

b) Dans les couloirs interdunaires :

Les transects n°3 et n°4 (Fig.25 et 26) ont été effectués dans un couloir interdunaire du secteur de Namarel. Le transect n°3 (XS1 : 184, XS2 : 281, XS3 : 374) a été mesuré au coeur du couloir interdunaire. Le transect n°4 (XS1 : 174, XS2 : 276, XS3 : 389) a été mesuré au contact du couloir interdunaire et de la bande dunaire. Les valeurs radiométriques moyennes de ces deux transects sont très voisines : elles sont régulièrement croissantes de XS1 à XS3 et se caractérisent par des variations dans l'espace liées à la juxtaposition d'états de surface différents.

Les sols sablo-argileux nus du couloir interdunaire ont des valeurs radiométriques très élevées sur les trois bandes spectrales (les valeurs moyennes des portions de sols sablo-argileux du transect n°3 sont : en XS1 : 190, en XS2 : 291, en XS3 : 393). Les baisses de valeurs sont liées à la présence de touffes d'herbes sèches. Les valeurs moyennes de cette portion du transect sont les plus élevées parmi celles de tous les transects mesurés. Les valeurs de réflectance élevées s'expliquent par la plus forte proportion d'argiles qui compose les sols des couloirs interdunaires, par rapport à ceux des bandes dunaires et par la présence d'une pellicule superficielle à leur surface. Cette pellicule superficielle est constituée de l'agrégation des fines particules. Son épaisseur est d'environ un demi centimètre, sa surface est lisse et homogène et sa couleur claire. Ces caractéristiques se traduisent par de fortes valeurs de réflectance.

Les épandages de gravillons ferrugineux ont une réponse radiométrique dont les valeurs sont plus faibles sur les trois bandes spectrales que celles des sols sablo-argileux dénudés des bandes dunaires et des couloirs interdunaires (les valeurs moyennes en XS1 sont : 150, en XS2 : 236, en XS3 : 281). Mais surtout cet état de surface se caractérise par des valeurs radiométriques très fortement croissantes entre XS1 et XS2 et faiblement croissantes entre XS2 et XS3. La courbe des valeurs moyennes de cette portion du transect se différencie nettement de celles des autres transects (Fig.30).

Les valeurs radiométriques du transect n°5 (Fig.27) effectué dans un vendou, dans le couloir interdunaire près de Ganine diffèrent des deux transects ci-dessus. Les valeurs radiométriques, plus faibles sur les trois canaux bruts (en XS1 : 134, en XS2 : 193, en XS3 : 287), sont faiblement croissantes entre XS1 et XS2 et plus fortement croissantes entre XS2 et XS3. Les sols du vendou de Ganine sont composés d'une forte proportion d'argiles, ils sont dénudés et ont à leur surface une pellicule superficielle. Ces caractéristiques sont assez proches de celles de la portion de sols sablo-argileux dénudés du transect n°3 et cependant en raison d'une rugosité de surface beaucoup plus forte sur le sol du vendou que sur celui du couloir interdunaire du transect n°3 et d'une couleur du sol plus sombre, la réflectance de ces sols est très différente. Ces valeurs se rapprochent de celles des transects de la plaine interdunaire.

c) Dans la plaine interdunaire :

Le transect n°6 (Fig.28) a été effectué sur sols sableux recouverts d'un tapis herbacé lâche. Les valeurs radiométriques sont faiblement croissantes entre XS1 et XS2, puis fortement croissantes entre XS2 et XS3 (en XS1 : 135, en XS2 : 203, en XS3 : 310). Elles se caractérisent par leur forte irrégularité qui indique une forte hétérogénéité des états de surface.

Le transect n°7 (Fig.29) a été effectué dans l'aire du vendou Tessékéré. Les valeurs radiométriques de ce transect sont particulièrement faibles sur les trois canaux bruts (en XS1 : 110, en XS2 : 149, en XS3 : 236), comparativement aux autres transects. Elles croissent légèrement entre XS1 et XS2 et plus fortement entre XS2 et XS3. On remarque aussi leur forte stabilité. On ne distingue pas de différences importantes entre la réponse radiométrique des sols sablo-argileux au couvert herbacé lâche des abords du vendou et celle du sol très argileux et rugueux du centre du vendou. Sur le transect n°7, la réponse radiométrique d'un *Boscia senegalensis* proche de la réponse théorique d'un végétal vert apparaît de façon caractéristique.

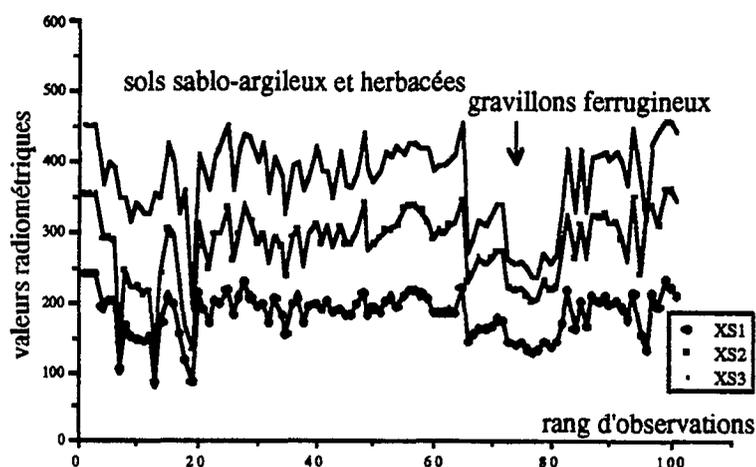


Figure 25 : Transect n°3 : couloir interdunaire à 6 km au sud du forage de Mbidi (longueur = 550 m, orientation SW-NE)

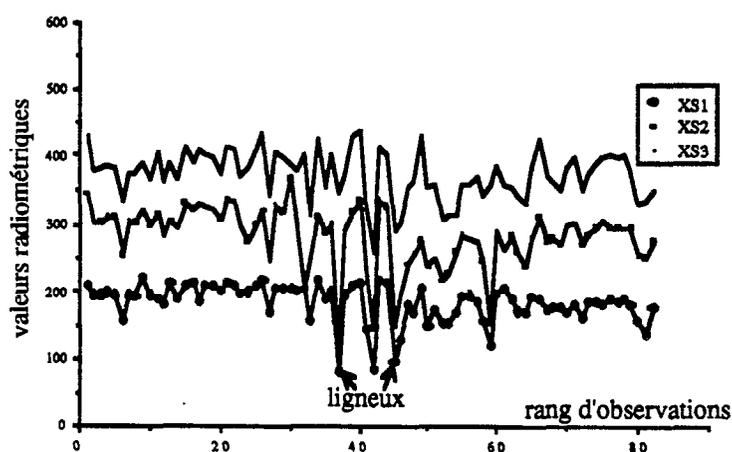


Figure 26 : Transect n°4 : contact entre le couloir interdunaire et la bande dunaire à 6 km au sud du forage de Mbidi (longueur = 600 m, orientation NNW-SSE)

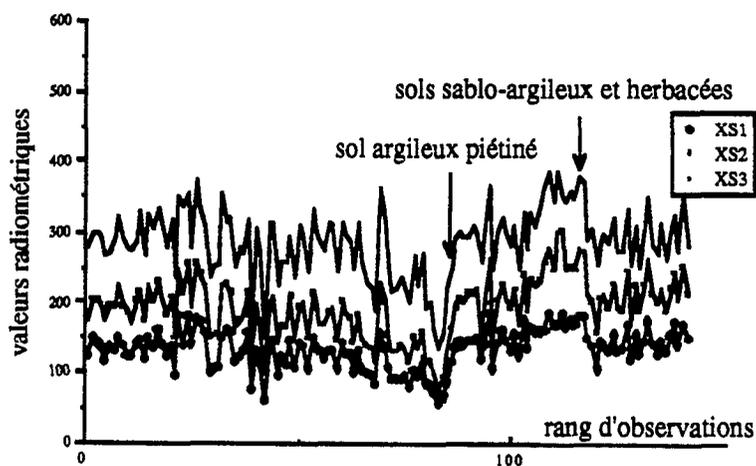


Figure 27 : Transect n°5 : sols sablo-argileux recouverts d'un tapis herbacé très discontinu de la plaine interdunaire, au sud du Forage de Tessékéré (longueur = 400 m, orientation SSW-NNE)

Les transects effectués dans la plaine interdunaire se caractérisent par leurs faibles valeurs sur les trois canaux, comparativement à celles des transects mesurés sur les sols sablo-argileux dénudés des couloirs interdunaires et des bandes dunaires. On remarque aussi l'allure légèrement concave de la courbe des valeurs moyennes de réflectance enregistrées sur les transects de la plaine interdunaire et sur le transect sur bandes dunaires recouvertes d'un tapis dense d'herbacées sèches (Fig.30). Ces faibles valeurs de réflectance sur les trois bandes spectrales et la similarité de l'allure de la courbe sur ces trois transects, met en évidence la présence d'un tapis herbacé assez couvrant. Même si dans le cas des transects effectués sur la plaine interdunaire, les fluctuations des valeurs radiométriques sur la longueur du transect mettent en évidence la discontinuité du tapis herbacé.

En conclusion, ces mesures radiométriques au sol, nous permettent de distinguer trois grands types de réponse radiométrique (Fig.30) :

- des valeurs radiométriques élevées et régulièrement croissantes sur les trois bandes spectrales : cette signature radiométrique est celle du transect n°1, mesuré sur les sols sablo-argileux dénudés ou peu couverts d'herbacées du secteur dunaire septentrional, des sols sablo-argileux des transects n°3 et n°4, mesurés dans le couloir interdunaire du secteur de Namarel.
- des valeurs radiométriques faibles sur les bandes spectrales et plus faiblement croissantes entre XS1 et XS2 qu'entre XS2 et XS3. Cette signature radiométrique caractérise le transect n°2, mesuré sur un tapis herbacé dense sur bandes dunaires, le transect n°5, mesuré dans le vendou de Ganine, et les transects n°6 et n°7, mesurés dans la plaine interdunaire. Nous remarquons que les valeurs radiométriques enregistrées sur le tapis dense d'herbacées sèches sur bandes dunaires, subissent moins de fluctuations sur la longueur du transect que celles des surfaces de la plaine interdunaire. Les mares argileuses à l'aspect de surface rugueux, ont une réponse radiométrique qui se différencie assez peu des sols sablo-argileux dénudés environnants.
- des valeurs radiométriques moyennes par rapport aux deux précédents types, caractérisés par des valeurs fortement croissantes entre XS1 et XS2 et plus faiblement croissantes entre XS2 et XS3. Cette signature radiométrique correspond à celle des épandages de gravillons ferrugineux.

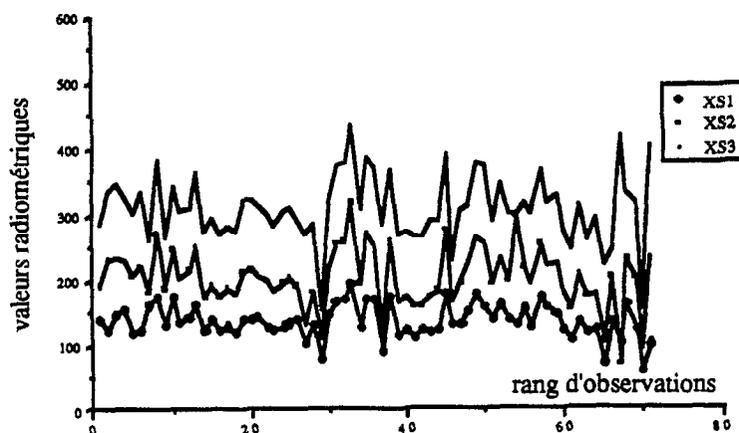


Figure 28 : Transect n°6 : La plaine interdunaire, à 3 km au sud du forage de Tessékéré

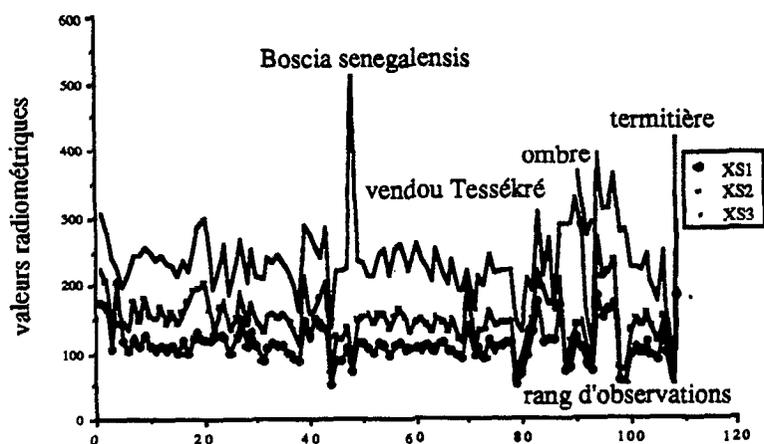


Figure 29 : Transect n°7 : Le vendou Tessékéré, dans la plaine interdunaire au sud de Tessékéré (longueur 600 m, orientation E-W)

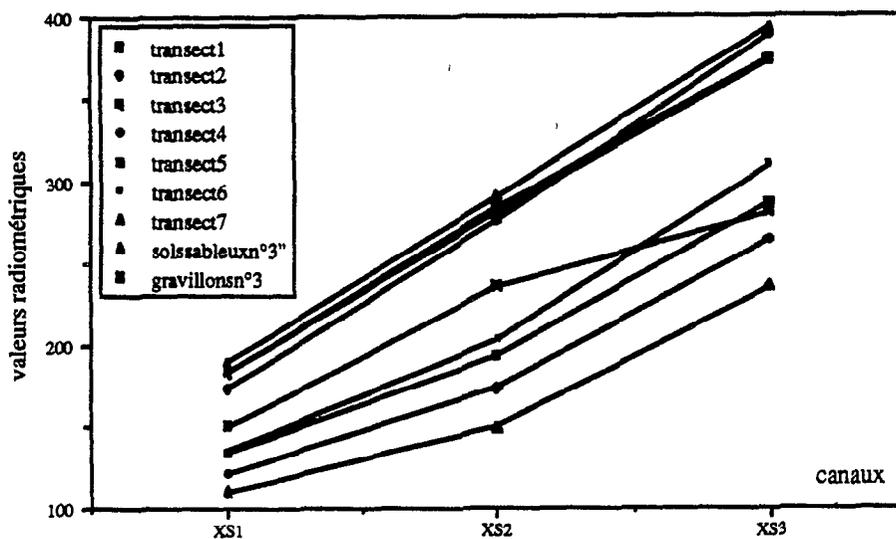


Figure 30 : Les valeurs radiométriques moyennes des transects effectués au sol au Ferlo en janvier 1990

2.3.2. le secteur dunaire septentrional sur le site du Ferlo :

Sur l'image classée du secteur de Mbidi (Fig.31), ce secteur dunaire se caractérise par la juxtaposition de bandes dunaires orientées NE-SW et de cordons dunaires orientés NNE-SSW d'une part, et d'autre part, par l'absence de couloirs interdunaires bien marqués : il n'y a pas de classes spécifiques aux espaces interdunaires. Ceux-ci sont perceptibles grâce à la taille plus grande des groupements de ligneux.

Les bandes dunaires orientées NE-SW de ce secteur sont occupées par une juxtaposition de classes dont les limites spatiales soulignent peu l'orientation dominante du modelé dunaire. Par contre, les cordons dunaires orientés NNE-SSW se distinguent nettement dans une classe (en orange sur l'image classée) dont la distribution spatiale épouse étroitement leur orientation.

Les classes occupant ce secteur, se caractérisent par les valeurs moyennes les plus élevées sur les trois canaux bruts, parmi toutes les classes analysées et de faibles valeurs sur l'indice de végétation (Fig.32). Ces caractéristiques témoignent d'une couverture herbacée plus clairsemée, que nous avons en effet constaté sur le terrain. Les valeurs moyennes sont fortement croissantes de XS1 à XS2 et plus légèrement croissantes de XS2 à XS3. On constate que ce rapport des valeurs radiométriques d'une bande spectrale à l'autre ne coïncide pas avec celui des valeurs radiométriques enregistrées sur le terrain sur bandes dunaires à sols sablo-argileux peu couverts.

Nous distinguons dans ce secteur :

- les bandes dunaires orientées NE-SW du secteur de Mbidi (Fig.31),
- les bandes dunaires orientées NE-SW de la partie orientale du secteur de Namarel (Fig.34),
- les cordons dunaires orientés NNE-SSW du secteur de Mbidi (Fig.31).

Sur le secteur de Mbidi, les bandes dunaires orientées NE-SW sont occupées par plusieurs classes dont les valeurs moyennes appartiennent à une même gamme de valeurs sur les canaux bruts et les trois composantes principales. Ces classes se différencient entre elles par des valeurs moyennes plus ou moins élevées sur l'indice de végétation. Ainsi la classe représentée en bleu pâle sur l'image classée (Fig.31) a les valeurs sur l'indice de végétation les plus élevées, puis les classes représentées en jaune et finalement les classes représentées en rose. La juxtaposition de ces classes dans l'espace, sans relation apparente avec le modelé dunaire, semble refléter des différences du taux de recouvrement herbacé et ligneux ou des états de surface des sols dénudés au sein de ces bandes dunaires.

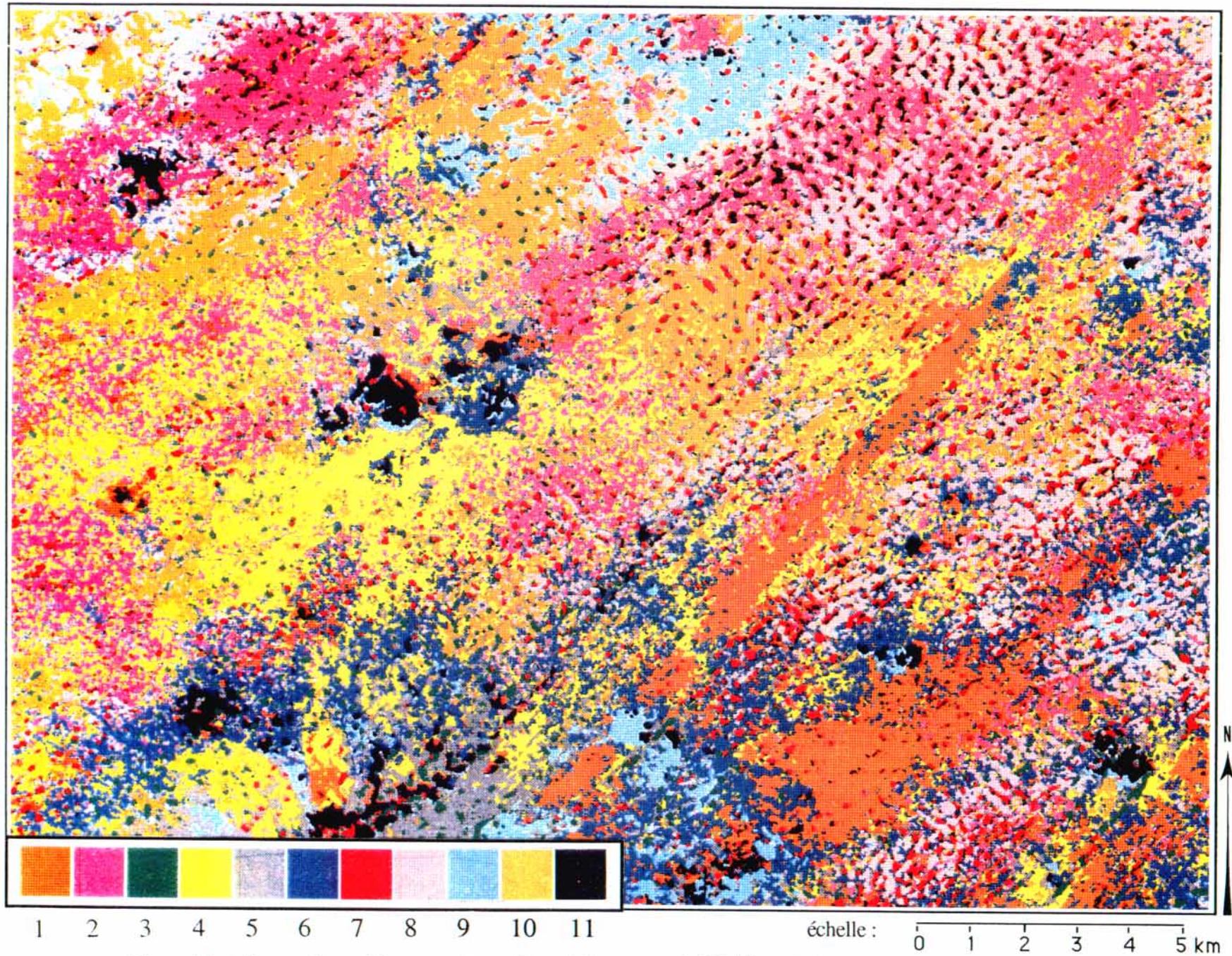


Figure 31 : L'image des unités paysagiques de mai du secteur de Mbidi au Ferlo (image classée en 11 classes)

LEGENDE

- 1 - Cordons dunaires orientés NNE-SSW
- 2 - Bandes dunaires orientées NE-SW
- 3 - Groupements de ligneux
- 4 - Bandes dunaires orientées NE-SW
- 5 - Environs du forage de Mbidi
- 6 - Bandes dunaires orientées NE-SW
- 7 - Groupements de ligneux
- 8 - Bandes dunaires orientées NE-SW
- 9 - Bandes dunaires orientées NE-SW
- 10 - Bandes dunaires orientées NE-SW
- 11 - Auréoles autour du forage de Mbidi et des campements

Figure 31 : L'image des unités paysagiques de mai du secteur de Mbidi au Ferlo
(image classée en 11 classes)

Sur l'image classée de Namarel (Fig.34), la classe occupant les bandes dunaires orientées NE-SW de la partie orientale (en jaune sur l'image classée), se caractérise par les valeurs les plus élevées sur les trois canaux bruts par rapport aux autres classes du secteur de Namarel et par de faibles valeurs sur l'indice de végétation. Ces valeurs rendent compte là aussi d'un couvert végétal peu couvrant, d'où le choix d'associer cette classe au secteur dunaire septentrional. La répartition spatiale de cette classe est très homogène : elle occupe toute la partie nord-orientale du secteur de Namarel.

Sur le secteur de Mbidi, les valeurs moyennes de la classe "cordons dunaires orientés NNE-SSW" sur les trois canaux bruts, sont inférieures à celles des classes des bandes dunaires orientées NE-SW (Fig.32). Les valeurs moyennes de cette classe sur l'indice de végétation appartiennent à la même fourchette de valeurs que les classes "bandes dunaires orientées NE-SW". On remarque aussi la distribution spatiale homogène de cette classe, notamment sur la grande dune de Mbidi située au NE du village. Sur le terrain, cette dune nous est apparue colonisée par un couvert ligneux très lâche, les groupements de ligneux sont pratiquement absents.

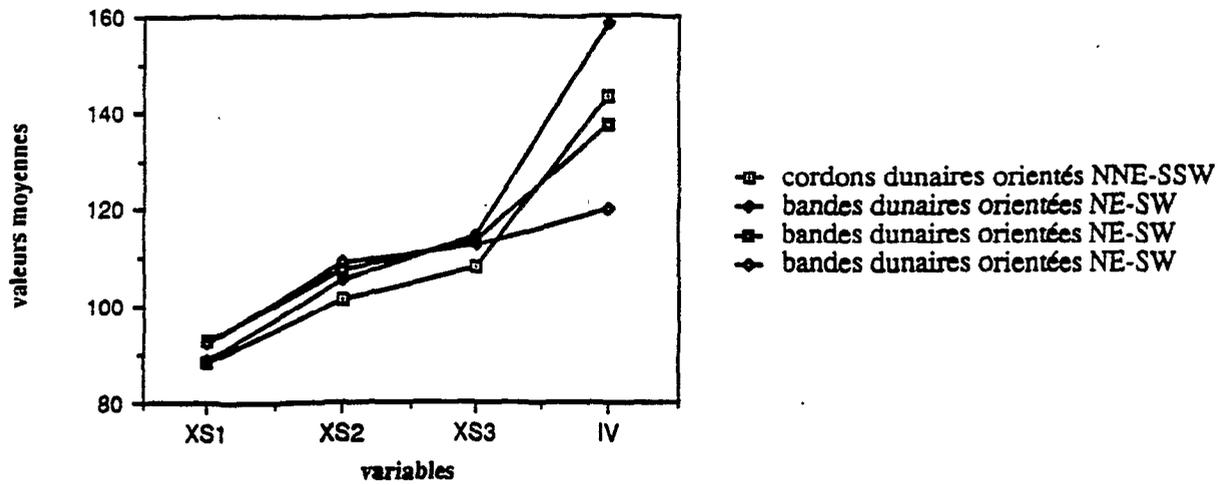


Figure 32 : Les valeurs moyennes des classes des bandes dunaires du secteur de Mbidi au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 11 classes de l'image de mai 88

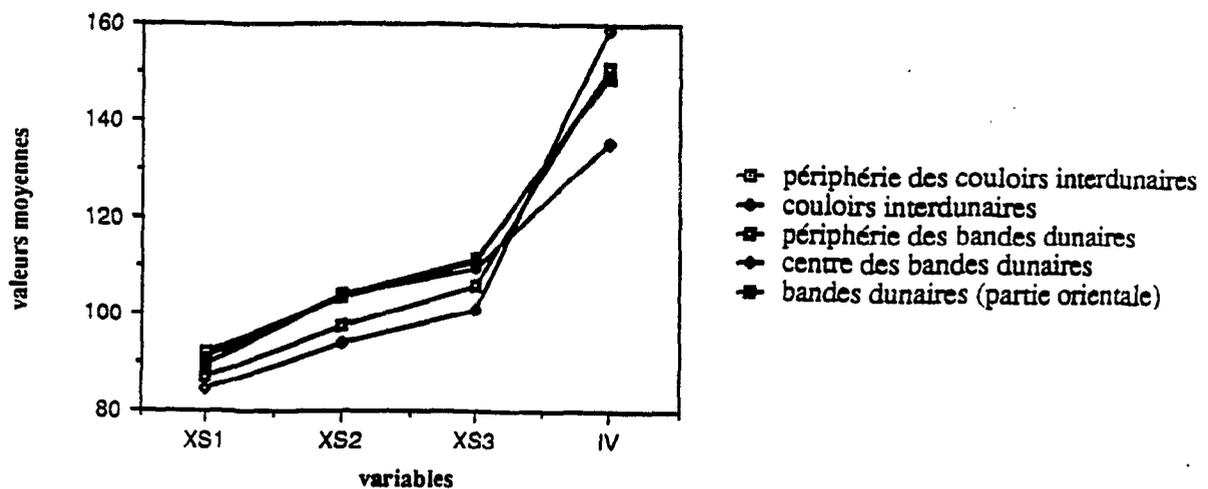


Figure 33 : Les valeurs moyennes des classes des bandes dunaires et des couloirs interdunaires du secteur de Namarel au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 10 classes de l'image de mai 88

2.3.3. le secteur dunaire méridional sur le site du Ferlo :

Sont regroupés dans cette région, le secteur de Namarel, à l'exception de la partie orientale, et la partie septentrionale du secteur de Tessékré (Fig.34 et 35). Contrairement au secteur dunaire septentrional, le secteur dunaire méridional se caractérise par la juxtaposition de classes distinctes occupant les bandes dunaires et les couloirs interdunaires, dont les limites spatiales soulignent nettement la prédominance de l'orientation NE-SW du modelé dunaire. Le modelé dunaire orienté NNE-SSW est uniquement perceptible par l'alignement des bosquets de ligneux. La distribution spatiale des classes se caractérise par leur emboîtement depuis la partie centrale des bandes dunaires vers le coeur des couloirs interdunaires. Cet emboîtement semble mettre en évidence une transition et des seuils au sein des états de surface entre ces deux unités topographiques.

a) Les bandes dunaires :

La classe "**centre des bandes dunaires**" se caractérise par des valeurs moyennes sur les canaux bruts les plus faibles parmi les classes analysées sur les images de mai 1988 de Namarel et de Tessékré (Fig.33 et 36). Les valeurs moyennes de cette classe sont régulièrement croissantes de XS1 à XS3. Les valeurs moyennes sur les canaux bruts de la classe "**périphérie des bandes dunaires**" sont légèrement plus élevées que celles de la classe "**centre des bandes dunaires**". Sur le secteur de Namarel, les valeurs moyennes sur l'indice de végétation de la classe "**périphérie des bandes dunaires**", sont supérieures à celles de la classe "**centre des bandes dunaires**" (Fig.33). Ces deux classes se caractérisent par des valeurs moyennes sur l'indice de végétation supérieures à celles des classes "**couloirs interdunaires**" et "**bandes dunaires orientées NE-SW**" de la partie orientale du secteur de Namarel. Sur le secteur de Tessékré, les valeurs moyennes sur l'indice de végétation de la classe "**périphérie des bandes dunaires**", sont inférieures à celles de la classe "**centre des bandes dunaires**" et des classes "**plaine interdunaire sableuse**" (Fig.36). Les valeurs moyennes des classes des bandes dunaires du secteur dunaire méridional, plus faibles sur les canaux bruts que celles du secteur dunaire septentrional, peuvent être mises en relation avec les faibles valeurs de réflectance enregistrées sur un tapis dense d'herbacées sèches dans le transect n°2. Au sol, cette unité est colonisée par une couverture herbacée continue ainsi que par un couvert ligneux diffus très dense composé des espèces suivantes : *Balanites aegyptiaca*, *Sclerocarya birrea*, *Combretum glutinosum* ... dont rendent compte les valeurs moyennes des classes des bandes

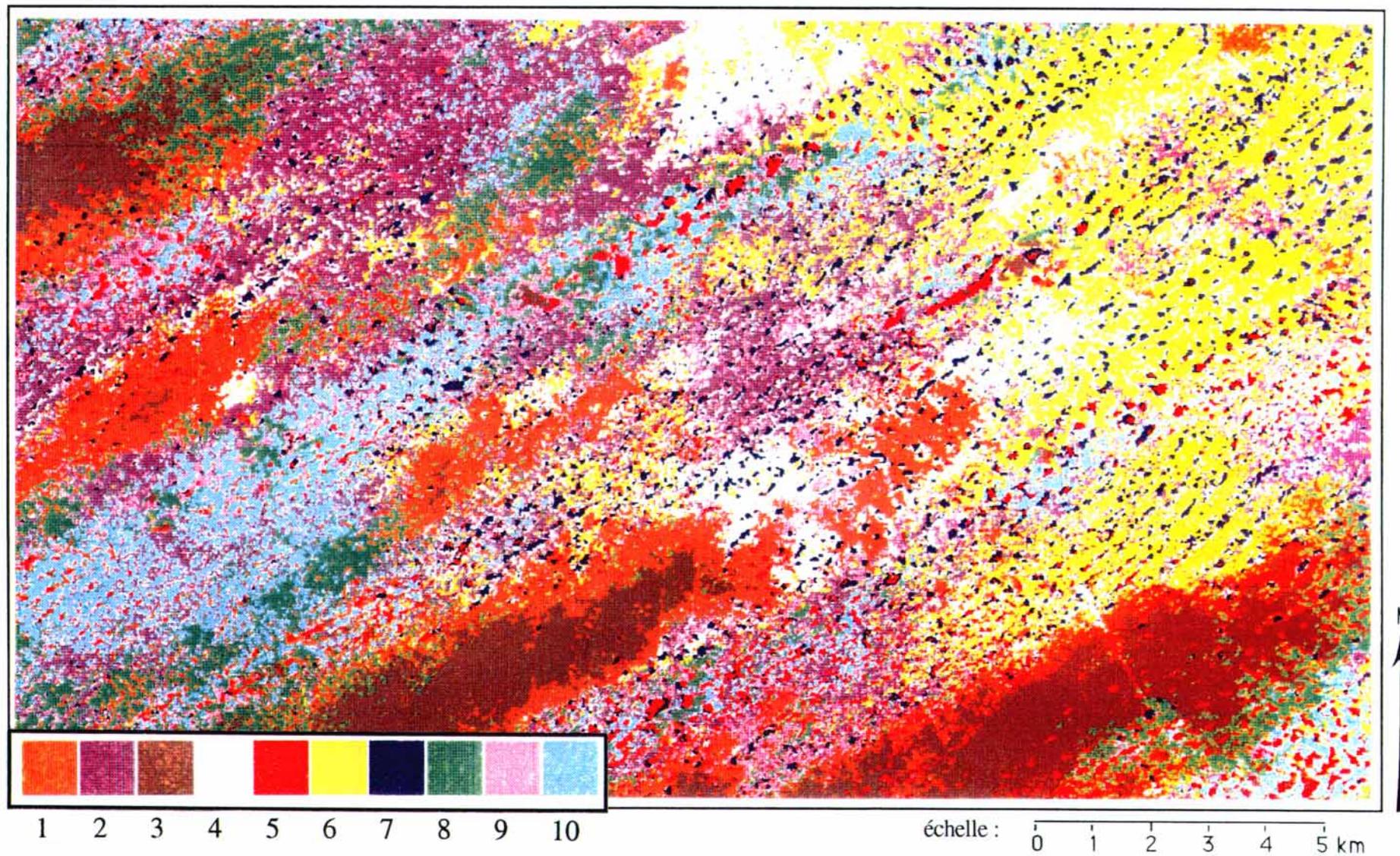


Figure 34 : L'image des unités paysagiques de mai du secteur de Namarel au Ferlo (image classée en 10 classes)

LEGENDE

- 1 - Couloirs interdunaires et bandes dunaires
- 2 - Contours des groupements de ligneux
- 3 - Périphérie des bandes dunaires et localement couloirs interdunaires
- 4 - Groupements de ligneux
- 5 - Bandes dunaires de la partie orientale
- 6 - Groupements de ligneux
- 7 - Auréoles autour du forage de Mbidi et des campements
- 8 - Centre des bandes dunaires
- 9 - Périphérie des couloirs interdunaires
- 10 - Périphérie des bandes dunaires

Figure 34 : L'image des unités paysagiques de mai du secteur de Namarel au Ferlo
(image classée en 10 classes)

dunaires de Namarel et de Tessékéré, plus élevées sur l'indice de végétation que celles des bandes dunaires du secteur de Mbidi.

La présence d'une classe occupant la partie centrale des bandes dunaires et d'une autre classe occupant les bordures des bandes dunaires, reflètent des variations existant au sein de la couverture végétale : au sol, dans la partie centrale des bandes dunaires, les ligneux ont une répartition spatiale en majorité diffuse. Les groupements de ligneux y sont pratiquement absents ou de très petite taille. Sur les bordures des bandes dunaires, des groupements de ligneux sont présents et le tapis herbacé est moins continu, des plages dénudées apparaissent. Les valeurs moyennes légèrement plus élevées sur les canaux bruts de la classe occupant la périphérie des bandes dunaires, par rapport à celles de la classe du centre des bandes dunaires, sont liées à une couverture végétale plus discontinue sur ces zones bordières.

b) Les couloirs interdunaires :

Sur l'image classée du secteur de Namarel (Fig.34), les couloirs interdunaires apparaissent dans deux classes, que nous appelons "couloirs interdunaires" et "périphérie des couloirs interdunaires". Sur l'image classée du secteur de Tessékéré (Fig.35), le couloir interdunaire situé au contact des bandes dunaires et de la plaine interdunaire, au nord du forage de Tessékéré, n'est pas représenté par une classe spécifique, mais par une juxtaposition de plusieurs classes dont certaines sont également représentées dans la plaine interdunaire. Néanmoins, nous attribuons à cette unité topographique la classe qui lui est la plus spécifique.

Sur le secteur de Namarel, les valeurs moyennes des classes "**couloirs interdunaires**" et "**périphérie des couloirs interdunaires**" sont parmi les plus élevées sur les canaux bruts, avec celles de la classe "bandes dunaires orientées NE-SW" de la partie orientale de ce secteur (Fig.33). Elles sont les plus faibles sur l'indice de végétation, parmi toutes les classes analysées de ce secteur. Les valeurs moyennes de la classe "périphérie des couloirs interdunaires" sont légèrement supérieures à celles de la classe "couloirs interdunaires" sur l'indice de végétation. Ces deux classes ont des valeurs moyennes différentes sur la première et la deuxième composantes principales.

Sur le secteur de Tessékéré, la classe "couloirs interdunaires" se caractérise par les valeurs moyennes les plus élevées sur les trois canaux bruts et par les valeurs moyennes sur l'indice de végétation les plus faibles parmi les classes analysées (Fig.36).

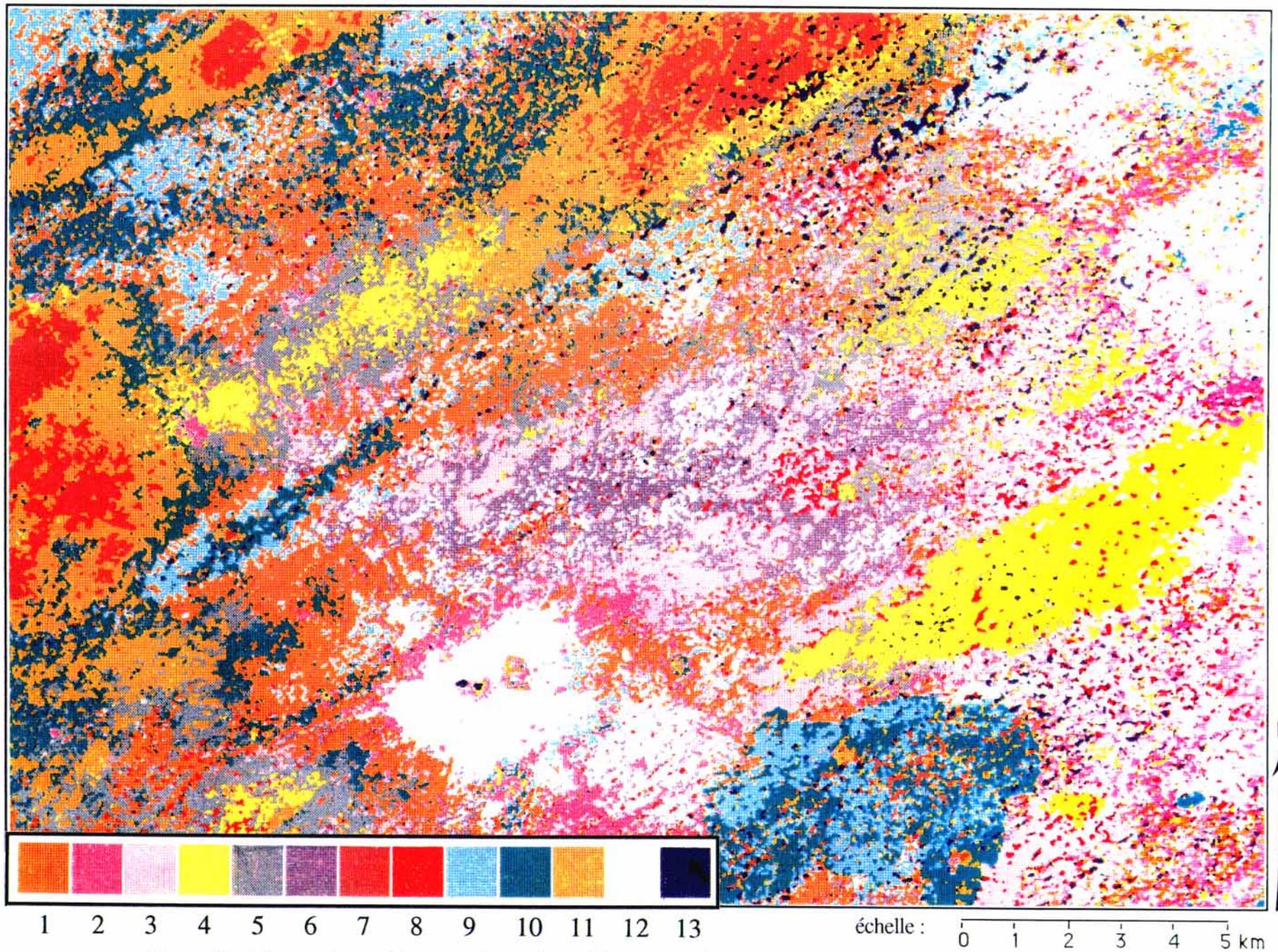


Figure 35 : L'image des unités paysagiques de mai du secteur de Tessékéré au Ferlo (image classée en 13 classes)

LEGENDE

- 1 - Plaine interdunaire et bandes dunaires
- 2 - Plaine interdunaire
- 3 - Plaine interdunaire
- 4 - Épandages sableux épais de la plaine interdunaire et bandes dunaires
- 5 - Périphérie des épandages sableux épais de la plaine interdunaire et des bandes dunaires
- 6 - Plaine interdunaire
- 7 - Centre des bandes dunaires
- 8 - Groupements de ligneux
- 9 - Couloirs interdunaires
- 10 - Périphérie des bandes dunaires
- 11 - Périphérie des bandes dunaires
- 12 - Auréoles autour du forage de Tessékéré et des campements
- 13 - Groupements de ligneux

Figure 35 : L'image des unités paysagiques de mai du secteur de Tessékéré au Ferlo (image classée en 13 classes)

Les propriétés radiométriques de ces classes sont proches de celles des sols sablo-argileux du couloir interdunaire du transect n°3. Elles traduisent l'existence d'états de surface très dénudés dans les couloirs interdunaires. En effet, les plages de sol nu réfléchissant sont très étendues dans cette unité topographique : au sol, le sol nous est apparu plus argileux et la répartition spatiale des herbacées est très contractée. Sur le secteur de Namarel, au sein des couloirs interdunaires, deux classes radiométriques sont perceptibles. La classe périphérique a des valeurs sur l'indice de végétation plus élevées, traduisant un taux de couverture végétale plus dense sur la périphérie des couloirs interdunaires qu'au coeur des couloirs interdunaires.

Sur les images classées (Fig.34 et 35), l'extension spatiale des classes "couloirs interdunaires" n'est pas étroitement limitée à cette unité topographique. Sur le secteur de Namarel, la classe "périphérie des couloirs interdunaires" occupe aussi des portions de bandes dunaires. Sur le site de Tessékré, contrairement aux bandes dunaires où les classes ont une distribution spatiale homogène, le couloir interdunaire est occupé par une succession de classes différentes. Ces caractéristiques mettent en évidence la forte hétérogénéité des états de surface de cette unité topographique et l'absence d'une spécificité des états de surface au sein des couloirs interdunaires.

Sur l'image classée du secteur de Namarel (Fig.34), les vendous sont occupés par la même classe que celle du centre des bandes dunaires. Cependant la nature des états de surface est totalement différente. Les mesures radiométriques effectuées au sol, ont montré de faibles valeurs de réflectance à la fois, sur les sols recouverts d'un tapis dense d'herbacées sèches des bandes dunaires et sur les surfaces argileuses et très rugueuses des vendous (transect n°5 et n°7), et la non spécificité de la réponse radiométrique de cet état de surface, par rapport aux surfaces environnantes.

Les surfaces recouvertes de gravillons ferrugineux n'apparaissent pas dans les classifications, malgré une réponse radiométrique spécifique comme l'ont montré les mesures radiométriques faites au sol, peut-être en raison de leur extension spatiale trop limitée ou encore de la densité trop faible des gravillons.

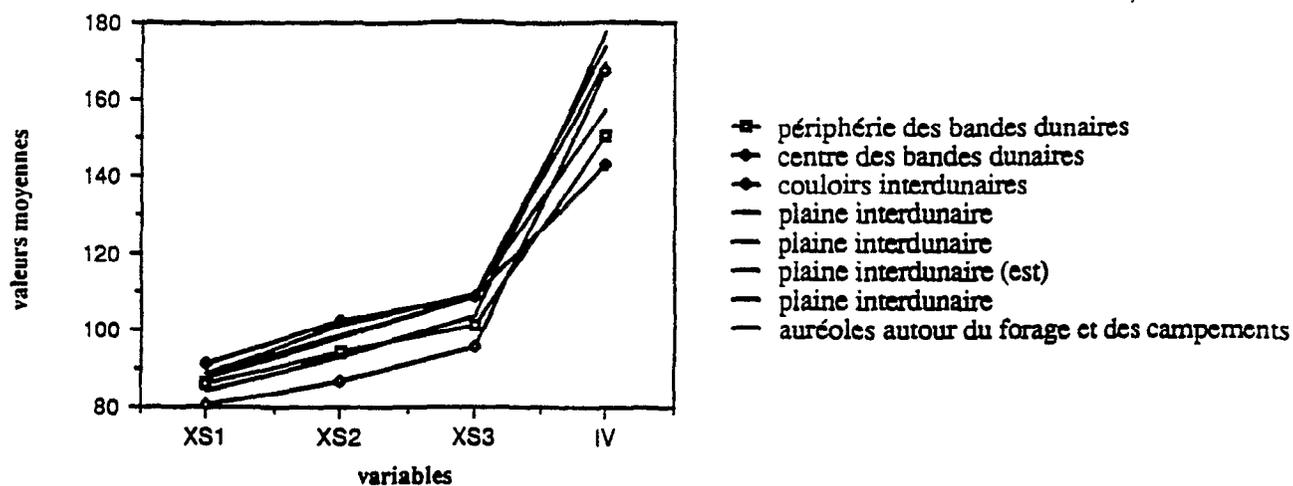


Figure 36 : Les valeurs moyennes des classes des bandes dunaires et des couloirs interdunaires du secteur de Tessékéré au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 13 classes de l'image de mai

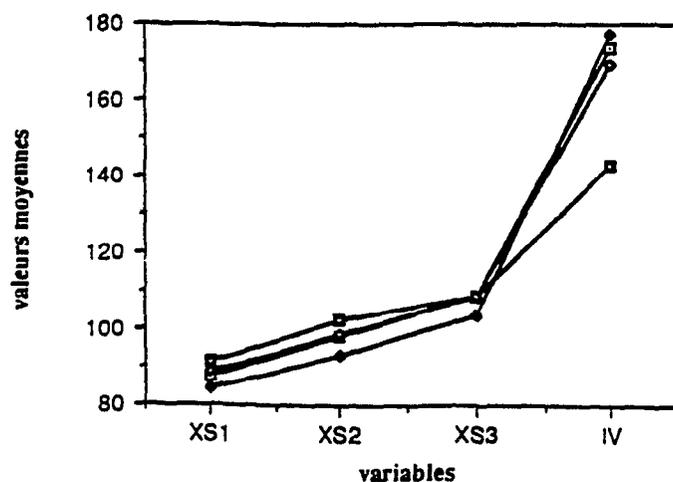


Figure 37 : Les valeurs moyennes des classes de la plaine interdunaire du secteur de Tessékéré au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 13 classes de l'image de mai 88

2.3.4. la plaine interdunaire sableuse sur le site du Ferlo :

La limite entre les bandes dunaires et la plaine interdunaire est très nette au nord et à l'est du forage de Tessékéré (Fig.35). Cette limite correspond à un long couloir interdunaire. A l'ouest du forage, la limite est plus diffuse, le couloir interdunaire est moins apparent et la taille des groupements de ligneux au sein du couloir interdunaire diminue. Par comparaison avec les secteurs dunaires situés au nord, la plaine interdunaire se caractérise par la présence de classes qui lui sont propres et par la forte hétérogénéité de leur distribution spatiale. Cet ensemble paysagique est occupé par une mosaïque de classes dont les valeurs moyennes sont très proches sur toutes les variables utilisées, à l'exception des épandages sableux épais dont la surface est occupée par une classe unique et d'extension spatiale homogène.

Les classes "**plaine interdunaire**" se caractérisent par des valeurs moyennes régulièrement croissantes de XS1 à XS3, plus faibles que celles des couloirs interdunaires et légèrement supérieures aux deux classes "centre des bandes dunaires" et "périphérie des bandes dunaires" (Fig.37). Les valeurs moyennes sur l'indice de végétation de ces classes appartiennent à la même fourchette de valeurs que celles de la classe "centre des bandes dunaires".

Les mesures radiométriques effectuées au sol dans la plaine interdunaire, indiquent des valeurs très faibles dans les trois bandes spectrales et la même originalité, constatée sur l'image, du comportement spectral de cette unité géographique par rapport aux autres unités. Elles montrent aussi une proximité des réponses radiométriques entre le transect mesuré sur bandes dunaires recouvertes d'un tapis dense d'herbacées sèches, et les transects mesurés dans la plaine interdunaire, recouvertes aussi d'un tapis dense d'herbacées sèches. Nous remarquons que le rapport des valeurs moyennes entre les variables des classes "plaine interdunaire", n'est pas le même que celui des valeurs moyennes des transects mesurés sur cette unité.

Les valeurs moyennes des classes de la plaine interdunaire sur les canaux bruts et l'indice de végétation, proches de celles de la classe du centre des bandes dunaires du secteur méridional, indique une couverture végétale diffuse assez dense. Au sol, le couvert ligneux diffus est particulièrement dense et le tapis herbacé bien développé. Cette unité géographique se caractérise par une couverture végétale plus dense par rapport aux deux précédents secteurs. La couverture herbacée est cependant moins couvrante dans la plaine interdunaire par rapport aux bandes dunaires.

Les valeurs radiométriques enregistrées sur le transect n°6 se caractérisent par de fortes

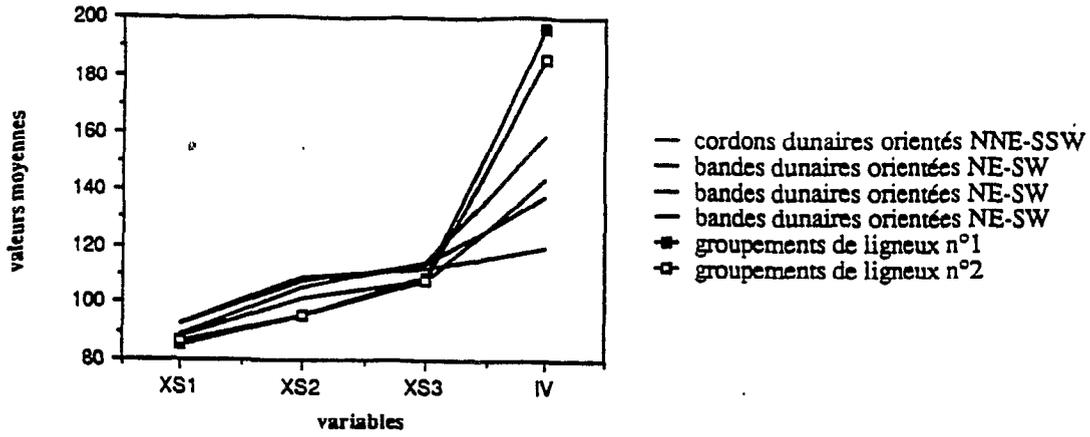
variations locales, que l'on peut mettre en relation avec la forte hétérogénéité de la distribution spatiale des classes dans la plaine interdunaire. Ces variations soulignent la forte hétérogénéité spatiale des états de surface au sein de cette unité géomorphologique.

A ces classes occupant l'ensemble de la plaine interdunaire sont ponctuellement juxtaposées d'autres classes. On distingue :

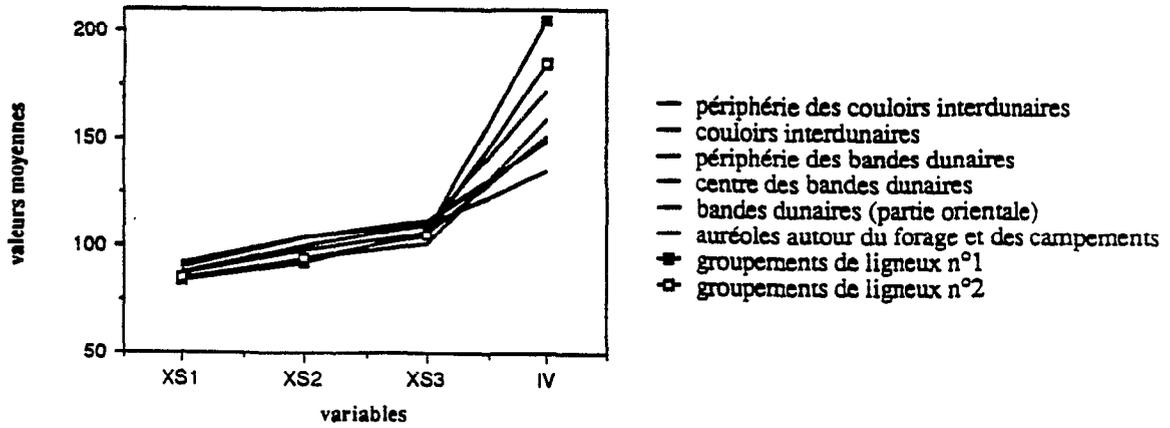
- Une trace de feu récente, présente sur l'image de mai 1988 et non sur celle de décembre 1986. Cette trace de feu est occupée par les trois classes désignées précédemment : "centre des bandes dunaires", "périphérie des bandes dunaires" et "périphérie des couloirs interdunaires". Sur l'image classée du secteur de Tessékré (Fig.35), ces trois classes sont imbriquées en une mosaïque de petites plages de valeurs différentes.
- Les épandages sableux épais et une portion de la bande dunaire située au nord du forage de Tessékré sont occupés par une classe qui leur est spécifique. Les valeurs moyennes de cette classe sur les canaux bruts et l'indice de végétation, appartiennent à la même fourchette de valeurs que les classes "groupements de ligneux", elles sont différentes sur la deuxième composante principale. Cette classe a sur l'image classée, une large extension spatiale homogène, qui nous permet de la différencier des classes "groupements de ligneux" dont l'extension spatiale est au contraire caractérisée par sa discontinuité. Ces valeurs semblent mettre en évidence la présence d'un couvert végétal assez dense sur ces épandages sableux.

Enfin, sur les images classées des trois secteurs étudiés (Fig.31, 34 et 35), on distingue autour des forages, des plages occupées par une ou deux classes de distribution spatiale homogène, que nous appelons "**auréoles autour des forages et des campements**". Cette classe se caractérise par des valeurs moyennes très élevées sur les trois canaux bruts, régulièrement croissantes de XS1 à XS3 et assez élevées sur l'indice de végétation, bien qu'au sol, ces surfaces apparaissent le plus souvent totalement dénudées et rugueuses en raison du piétinement du bétail plus important dans ces aires. Ces caractéristiques au sol ne nous permettent pas d'expliquer les valeurs élevées de cette classe sur l'indice de végétation.

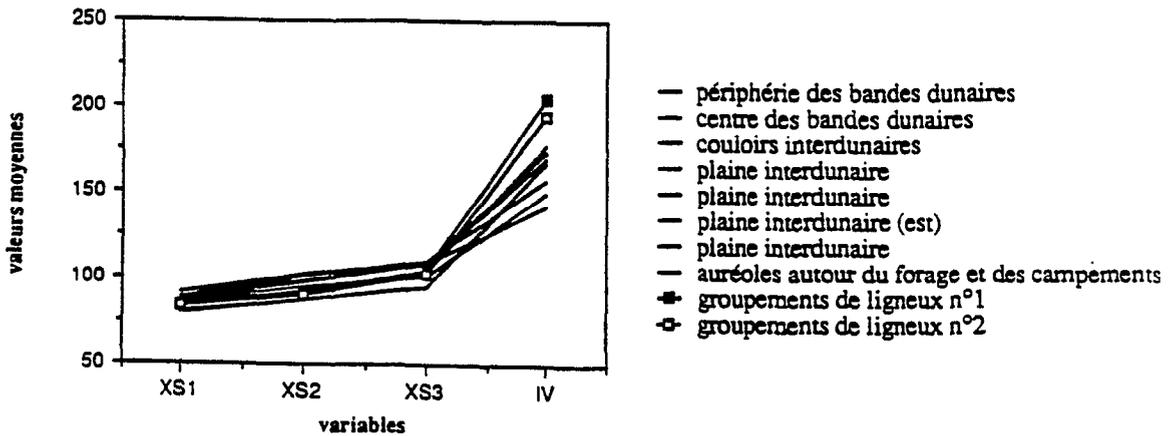
On remarque que cette même classe occupe ponctuellement les contours des groupements de ligneux sur les trois secteurs analysés et localement des portions des bandes dunaires et de la plaine interdunaire.



Unités paysagiques de Mbidi



Unités paysagiques de Namarel



Unités paysagiques de Tessékéré

Figure 38 : Les valeurs moyennes des classes des groupements de ligneux au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour les partitions en 11 classes sur les secteurs de Mbidi et Namarel et la partition en 13 classes sur le secteur de Tessékéré, effectuées à partir de l'image de mai 88

2.3.5. Les groupements de ligneux sur le site du Ferlo :

Les classifications non dirigées mettent en évidence deux classes radiométriques correspondant à la classe thématique "groupements de ligneux" sur les images classées issues des partitions à plus de 10 classes. Les valeurs moyennes de ces deux classes "groupements de ligneux" se différencient de celles des autres classes par de faibles valeurs en XS1 et XS2. Elles croissent peu de XS1 à XS2 et fortement de XS2 à XS3. Enfin, elles sont nettement plus élevées sur l'indice de végétation que celles des autres classes (Fig.38).

Nous distinguons :

- une première classe appelée "groupements de ligneux n°1", dont les valeurs moyennes sur l'indice de végétation sont les plus élevées. Sur les images classées, cette classe correspond aux centres des bosquets les plus épais (cette classe est représentée en rouge sur les figures 31, 34 et 35) ;
- une deuxième classe appelée "groupements de ligneux n°2", qui se caractérise sur tous les sites étudiés par une valeur moyenne sur l'indice de végétation encore très élevée, par rapport à l'ensemble des classes, et légèrement inférieure à celle de la classe précédente. Les valeurs moyennes de cette classe, croissantes de XS1 à XS3, semblent indiquer un taux de recouvrement inférieur par rapport aux groupements de ligneux de la première classe et/ou une activité chlorophyllienne moindre. Elles peuvent aussi être liées à des espèces ligneuses différentes. Les valeurs moyennes de cette classe varient plus fortement d'une partition à l'autre, en fonction du nombre de classes demandé. Sur les images classées, cette classe, correspond aux contours externes des gros bosquets ainsi qu'aux petits groupements de ligneux (cette classe est représentée en vert sur les figures 31, 34 et 35).

2.4. Les conclusions générales de l'analyse des classifications :

L'analyse des données radiométriques à l'aide des classifications non dirigées, permet de percevoir des différences d'états de surface entre les différentes unités géomorphologiques distinguées dans la partie I (bandes dunaires, espaces interdunaires), mais aussi au sein de mêmes unités et notamment entre les bandes dunaires.

a) Sur le site d'Oursi :

Les classifications mettent en évidence les unités paysagiques suivantes :

- Au sein des bandes dunaires :
 - Les bandes dunaires septentrionales, caractérisées par de fortes valeurs moyennes sur les canaux bruts et de faibles valeurs sur l'indice de végétation ;
 - La bande dunaire méridionale, caractérisée par de plus faibles valeurs moyennes sur les canaux bruts, par rapport à la classe précédente et de faibles valeurs sur l'indice de végétation (à l'exception du cas particulier de l'image de mai, où les valeurs moyennes de cette classe, élevées sur l'indice de végétation, semblent liées à la présence d'un tapis végétal vert, suite aux premières pluies de l'année). Ces propriétés radiométriques sont liées à des états de surface moins réfléchissants, en raison notamment de nombreuses plages de sols à pellicule superficielle et à la présence d'un couvert ligneux diffus plus dense sur la bande dunaire méridionale que sur les bandes dunaires septentrionales ;
 - L'erg vif et les portions des bandes dunaires les plus dénudées sont classées dans une classe propre dont les valeurs moyennes sont les plus élevées sur les canaux bruts et les plus faibles sur l'indice de végétation, rendant ainsi compte du caractère très réfléchissant de ces surfaces.
- Dans les plaines interdunaires, on distingue deux ensembles paysagiques, les plaines interdunaires sableuses et les plaines interdunaires cuirassées :
 - Au sein des plaines interdunaires sableuses, les classifications ont mis en évidence un domaine septentrional dont les valeurs moyennes sont plus élevées sur les canaux bruts et plus faibles sur l'indice de végétation que celles du domaine méridional. Ces valeurs moyennes traduisent une dégradation du couvert végétal plus forte au nord et notamment aux abords de la mare de Ganadaori par rapport à la partie méridionale.
 - Les plaines interdunaires cuirassées sont occupées par deux classes : une classe qui se caractérise par de faibles valeurs sur les trois canaux bruts, traduisant ainsi la

présence d'épandages de gravillons ferrugineux ou l'affleurement de la cuirasse. Cette classe occupe le centre de cette unité topographique. Et une seconde classe dont les valeurs moyennes plus élevées sur les canaux bruts, reflètent la présence de sols sablo-argileux. Cette classe occupe l'ensemble de cette unité topographique .

b) Sur le site du Ferlo :

Les classifications mettent en évidence la présence de trois secteurs :

- Le secteur dunaire septentrional (secteur de Mbidi et partie orientale du secteur de Namarel) : les classes occupant ce secteur se caractérisent par des valeurs moyennes élevées sur les canaux bruts et faibles sur l'indice de végétation. Ces valeurs traduisent l'existence d'un couvert ligneux diffus peu dense et d'une couverture herbacée clairsemée. Le modelé dunaire de ce secteur est composé de la juxtaposition de bandes dunaires orientées NE-SW remodelées en système transverse et de cordons orientés NNE-SSW. Cette interpénétration de différentes orientations se traduit par un modelé dunaire confus et mamelonné : la distribution spatiale des classes sur ce secteur, soulignent peu les orientations dunaires, à l'exception des cordons orientés NNE-SSW.
- Le secteur dunaire méridional (secteur de Namarel et nord du secteur de Tessékéré) se caractérise par la succession de classes depuis le centre des bandes dunaires jusqu'au coeur des couloirs interdunaires. Les valeurs moyennes des classes occupant les bandes dunaires sont faibles sur les canaux bruts et élevées sur l'indice de végétation. Ces valeurs traduisent un état du couvert végétal touffu sur les bandes dunaires : le couvert ligneux diffus est dense ainsi que le couvert herbacé. Les valeurs moyennes des classes correspondant aux couloirs interdunaires sont élevées sur les canaux bruts et faibles sur l'indice de végétation. Ces valeurs reflètent l'état du couvert végétal très contracté dans les couloirs interdunaires, où les aires environnant les groupements de ligneux sont colonisées par un tapis herbacé très discontinu. Les ligneux poussant à l'état isolé sont peu nombreux.
- La plaine interdunaire sableuse se caractérise par la spécificité des classes qui l'occupe et par l'hétérogénéité de leur distribution spatiale. Les valeurs moyennes des classes de la plaine interdunaire sont faibles sur les canaux bruts et plus élevées sur l'indice de végétation. Ces valeurs traduisent la présence d'un couvert végétal assez dense, composé d'un couvert ligneux diffus important et d'un tapis herbacé assez couvrant. Au sol, la végétation a une répartition spatiale très irrégulière dont semble rendre compte la distribution spatiale des classes sur cette unité.

La caractérisation des états de surface dominants des unités paysagiques, à l'aide des mesures radiométriques faites au sol, s'est avérée limitée. Les valeurs radiométriques enregistrées par le satellite, ne varient pas toujours de la même façon, d'un canal à l'autre, que celles mesurées sur le terrain. Et pour des états de surface proches, les courbes des valeurs radiométriques enregistrées au sol, sont parfois différentes : c'est le cas des épandages de gravillons ferrugineux sur le site d'Oursi et de ceux du Ferlo. Malgré tout, la mise en relation de l'analyse comparative des valeurs moyennes sur images, avec celle des mesures radiométriques au sol, accompagnées de la connaissance du terrain, permettent de caractériser globalement les états de surface des unités paysagiques les unes par rapport aux autres. Cette constatation justifie a posteriori l'utilisation d'une méthode non dirigée.

Les néo-variables utilisées lors de ces classifications, ont apporté des possibilités de partition plus fines : les classes correspondant aux groupements de ligneux se distinguent des autres classes, par des valeurs plus élevées sur l'indice de végétation. L'utilisation des composantes principales permet au thématique d'analyser plus finement les proximités ou dissemblances, existant entre plusieurs classes ayant des valeurs moyennes très proches sur les canaux bruts. Ainsi, lors de l'analyse, nous avons pu distinguer certaines classes grâce aux différences de valeur existant entre les valeurs moyennes sur l'une ou plusieurs des composantes principales.

Le second apport des classifications non dirigées réside dans la mise en évidence des surfaces correspondant aux groupements de ligneux d'une part, et dans l'extraction de leurs caractéristiques radiométriques, d'autre part. Cette analyse des classes radiométriques fait ressortir la réponse spectrale spécifique des groupements de ligneux, par rapport aux autres unités du paysage. Elle rend compte aussi de la non uniformité du comportement spectral des groupements de ligneux sur les sites étudiés : ceux-ci apparaissent dans deux classes sur le site du Ferlo et trois classes sur le site d'Oursi, pour les partitions à plus de dix classes. Les classes correspondant aux groupements de ligneux se caractérisent par des valeurs faibles sur les canaux XS1 et XS2 et les valeurs les plus élevées sur l'indice de végétation. Sur les deux sites, on distingue deux types de classes correspondant aux groupements de ligneux :

- une première classe dont les valeurs sur les canaux bruts sont les plus faibles et les plus élevées sur l'indice de végétation. Le rapport des valeurs moyennes du canal XS1 au canal XS3 est proche de celui de la courbe spectrale théorique d'une végétation verte (cf. § 3.2., partie I). Sur les images classées, cette classe occupe les gros groupements de ligneux, parfois localisés sur les mares temporaires.

- une seconde classe correspondant sur le site d'Oursi à deux classes et sur le site du Ferlo à une seule classe, qui se caractérise par des valeurs moyennes légèrement plus élevées sur les canaux bruts par rapport à la première classe et moins élevées sur l'indice de végétation. Les valeurs moyennes de cette classe sont régulièrement croissantes sur les trois canaux bruts. Cette classe occupe la périphérie des gros groupements de ligneux et les petits bosquets.

Ce comportement spectral moins typique d'une végétation en activité chlorophyllienne s'explique pour plusieurs raisons : l'activité chlorophyllienne des ligneux en saison sèche et notamment au mois de mai, est ralentie. D'autre part, à l'échelle de résolution du satellite, le groupement de ligneux constitue une entité très hétérogène en raison du caractère plurispécifique des peuplements ligneux et des différents éléments les composant : les ligneux, les herbacées sèches aux dates étudiées, la litière, le sol, les ombres ... , de la variété des stades phénologiques des différentes espèces ligneuses et des variations du taux de recouvrement.

Enfin, les résultats de ces classifications ne font pas ressortir d'association entre l'une des classes "groupements de ligneux" et l'une des structures ligneuses précédemment décrites : structure punctiforme, structure en bandes ... (cf. § 6, partie I). Indépendamment de la distribution dans l'espace des groupements de ligneux, une relation apparaît entre les différentes classes "groupements de ligneux" et la taille des groupements de ligneux. Les groupements de ligneux les plus épais sont occupés en leur centre par la classe "groupements de ligneux n°1" dont les valeurs moyennes sur l'indice de végétation sont les plus élevées. La périphérie de ces gros groupements de ligneux et les petits bosquets sont occupés par les classes "groupements de ligneux n°2" dont les valeurs moyennes sur l'indice de végétation sont les plus faibles. Cette distribution spatiale des classes "groupements de ligneux" est liée au taux de recouvrement plus élevé des ligneux au coeur des bosquets par rapport à la périphérie et à la présence de grands individus et d'espèces à développement foliaire plus important.

3. CONSTRUCTION DE L'IMAGE DES GROUPEMENTS DE LIGNEUX :

3.1. Les principes de l'élaboration de l'image des groupements de ligneux :

Les classifications en nombre croissant de classes effectuées à partir des images satellitaires, ont permis d'obtenir des images classées sur lesquelles nous pouvons identifier les pixels correspondant aux groupements de ligneux.

La reconnaissance des classes correspondant aux groupements de ligneux sur les images classées est très aisée, en raison de leur distribution spatiale spécifique par rapport aux autres classes. Celle-ci se caractérise, et ceci dès les partitions en petit nombre de classe, par sa structure punctiforme et agrégative composée de petits éléments, comme nous l'avons décrite dans la partie I (Fig.13 et 14, p. 55 et 57). A l'inverse, les classes autres que celles correspondant aux groupements de ligneux, apparaissent sur les images classées, sous la forme de grandes plages continues et sans forme spécifique. La reconnaissance des classes correspondant aux groupements de ligneux s'effectue par un examen visuel de la distribution spatiale de chaque classe sur les images classées.

Sur chaque image classée issue des partitions en nombre k de classes, le nombre et les coordonnées des pixels classés en "ligneux" varient sensiblement. Les pixels correspondant aux groupements de ligneux ne se distinguent pas toujours par des valeurs radiométriques bien différenciées de celle des autres composants du paysage, en raison des variations du taux de recouvrement du couvert ligneux, des espèces et de leur état phénologique. Ses variations, particulièrement sensibles sur la périphérie des bosquets où le taux de recouvrement est plus faible, se traduisent sur les images classées par des fluctuations des limites spatiales des groupements de ligneux .

Il s'agit donc maintenant, de déterminer parmi les images classées issues des partitions en nombre k de classes, l'image classée sur laquelle les classes correspondant aux groupements de ligneux offre la meilleure représentation de ce thème. C'est à dire l'image sur laquelle, chacune des entités "groupements de ligneux" figure, indépendamment de leur extension spatiale. Nous rappelons ici, que l'objectif de ce travail est d'étudier les variations de la structure spatiale des groupements de ligneux au sein des différentes unités du paysage. Il ne s'agit pas en effet, d'analyser le taux de recouvrement des ligneux en milieu sahélien. Nous ne cherchons pas à obtenir une image correspondant aux surfaces exactes occupées par les groupements de ligneux, mais une image offrant la localisation des groupements de ligneux la plus complète.

Dans un premier temps, la qualité de la représentation des groupements de ligneux sur les images classées, est appréciée par comparaison visuelle avec la composition colorée. Cette comparaison nous permet de déceler les erreurs grossières, mais ne nous permet pas de juger finement de la qualité de la représentation spatiale des groupements de ligneux sur les images classées. Pour cela, nous avons recours à d'autres sources de référence.

La validation des images classées à l'aide de mesures au sol a été écartée, premièrement, en raison de la difficulté de fixer les limites des groupements de ligneux sur le terrain : la vision latérale du paysage que nous avons au sol, ne permet pas de percevoir des limites spatiales franches dans le couvert ligneux. Très fréquemment, la densité des arbres et des arbustes décroît de façon progressive autour des groupements de ligneux, à l'exception de la brousse tigrée où les bandes boisées se distinguent nettement par rapport aux bandes nues et de certains bosquets bien individualisés sur bandes dunaires.

De plus, les groupements de ligneux se caractérisent au sol par une grande diversité de leur composition, de leur densité et des stades phénologiques des espèces qui les composent. La caractérisation des groupements de ligneux au sol supposerait d'effectuer une analyse comparative entre ces diverses caractéristiques et les valeurs radiométriques enregistrées sur l'image. La conduite d'une telle analyse dépasse le cadre de cette étude. Enfin, l'absence de moyens de repérage précis au sol par rapport à l'image, réduit les possibilités de mise en relation directe des limites spatiales des groupements de ligneux au sol avec celles des ensembles de pixels connexes leur correspondant sur les images.

Une autre démarche a été adoptée pour déterminer l'image des groupements de ligneux offrant la meilleure représentation. Des images classées, nous ne conservons que les pixels classés en "groupements de ligneux". L'image des pixels correspondant aux groupements de ligneux est binarisée. Ces images classées et binarisées sont comparées avec d'autres sources d'information : des photographies aériennes, dans le cas du site d'Oursi, ou une image satellitaire d'une autre date, dans le cas du site du Ferlo. Ces deux documents nous offre une vue verticale du couvert ligneux à une échelle ou à une date différentes que nous pouvons comparer avec la structure des groupements de ligneux rendues par les images classées.

a) Sur le site d'Oursi :

Pour chacun des sites étudiés, nous disposons de deux images prises à deux moments différents de la saison sèche. Sur le site d'Oursi, l'identification des ligneux sur l'image de mai 1987 n'a pas fourni de résultats satisfaisants : la densité du couvert ligneux plus faible à Oursi qu'au Ferlo, se traduit sur les images classées par un petit nombre de pixels classés en "groupements de ligneux", qui par comparaison visuelle avec la composition colorée nous a semblé peu représentatif de l'état du couvert ligneux sur ce site. D'autre part, certaines plages de pixels sont classées en "groupements de ligneux" alors que sur la composition colorée et au sol, elles ne correspondent pas à des groupements de ligneux. Nous avons donc recherché une autre source d'information pour déterminer l'image classée de l'image de décembre 1986 offrant la meilleure représentation des groupements de ligneux : il s'agit des photographies aériennes au 1. 50 000 de la mission de simulation Spot de 1981 (IGN) numérisées. Compte tenu du peu d'années (5 ans) qui séparent la date de prise de vue des photographies aériennes, de celle de l'image satellitaire du 17/12/86 et de la relative stabilité temporelle du couvert ligneux, nous estimons que la photographie aérienne peut être utilisée pour valider l'image classée.

Les photographies aériennes offrent l'avantage de fournir une vue verticale de la distribution des arbres et des arbustes dans l'espace. Sur les photographies aériennes, les arbres et les arbustes sont identifiables en tant que tels. Les groupements de ligneux sont délimités à l'aide d'une photo-interprétation. Les photographies aériennes numérisées sont binarisées : seuls les pixels correspondant aux arbres et aux arbustes sont conservés. Nous obtenons ainsi une représentation de la structure du couvert ligneux à une échelle intermédiaire par rapport à l'image satellitaire, que nous pouvons comparer avec les images satellitaires classées et binarisées.

La détermination de l'image classée offrant la meilleure représentation des groupements de ligneux à l'aide des photographies aériennes, est effectuée de la façon suivante : on calcule l'intersection sur des fenêtres-test entre - les images classées et binarisées ne contenant plus que les pixels classés en "groupements de ligneux", issues des partitions à k classes de l'image Spot de décembre - et - les photographies aériennes numérisées et binarisées, ne contenant plus que les pixels correspondant aux groupements de ligneux - (Fig.39). L'image classée comptant la plus forte proportion de pixels "groupements de ligneux" communs aux deux images (l'image satellitaire classée et la photographie aérienne) est sélectionnée.

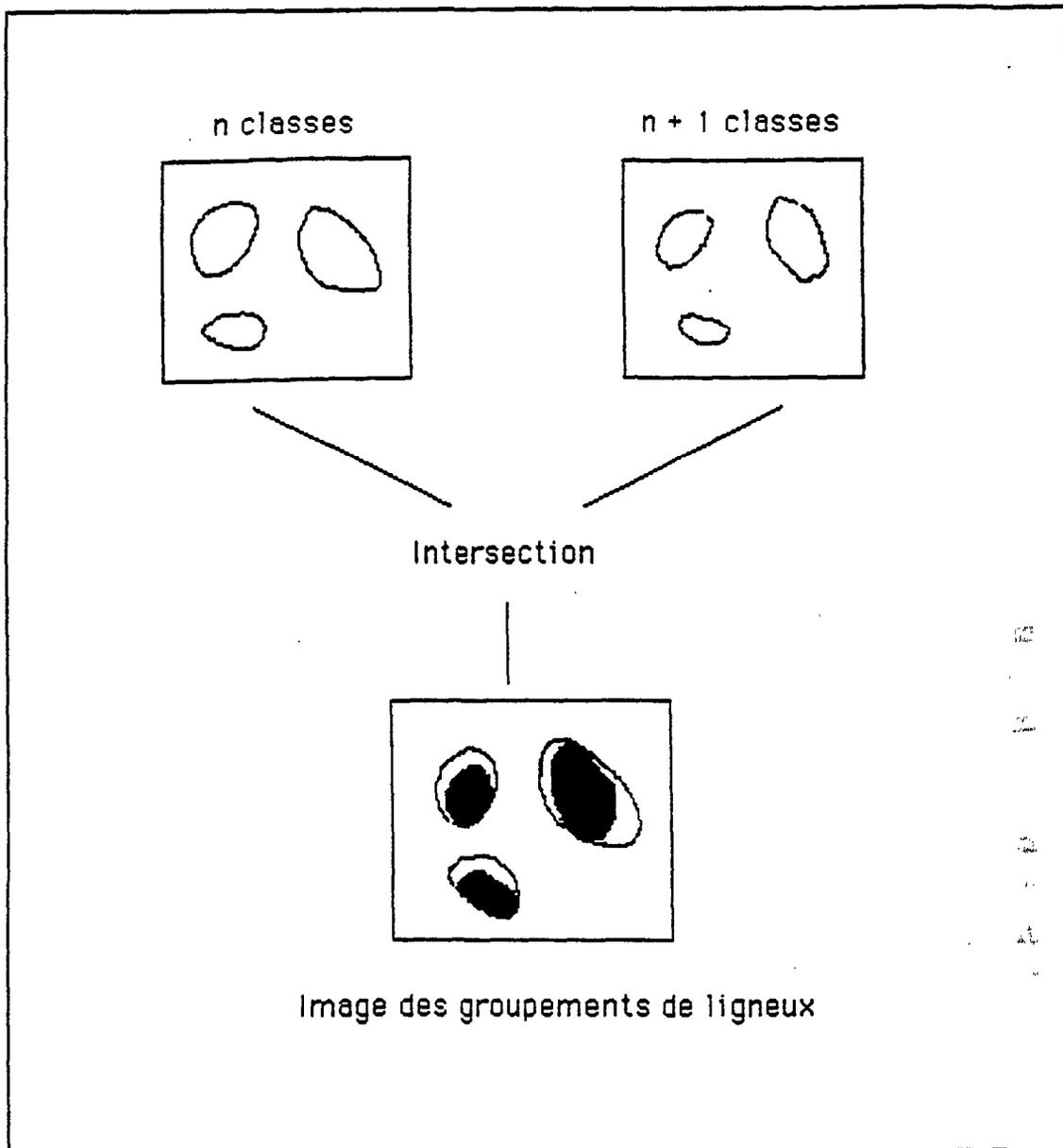


Figure 39 : Illustration de l'élaboration de l'image des groupements de ligneux à l'aide du calcul de l'intersection entre l'image classée et l'image de référence, binarisées ne contenant plus que les pixels correspondant aux groupements de ligneux (Sur le site d'Oursi, l'image de référence est la photographie aérienne ; sur le site du Ferlo, l'image satellitaire classée d'une autre date)

Le critère de l'intersection permet d'une part, de vérifier la qualité de la localisation des entités de pixels connexes classés en "groupements de ligneux", en prenant en compte leur distribution spatiale. D'autre part, cette opération ensembliste, en raison de ses propriétés de commutativité ($X \cap Y = Y \cap X$), d'associativité ($(X \cap Y) \cap Z = X \cap (Y \cap Z)$) et d'idempotence ($X \cap X = X$), autorise les comparaisons entre plusieurs images simultanément.

b) Sur le site du Ferlo :

Dans ce cas, l'image des groupements de ligneux est construite à partir des images classées et binarisées ne contenant plus que les pixels correspondant aux groupements de ligneux, de l'image de décembre 1986 et de celles de mai 1988.

L'élaboration de l'image des groupements de ligneux s'effectue en deux phases :

- Dans une première phase, à chaque date, l'image des groupements de ligneux offrant la meilleure représentation est déterminée de la façon suivante : les images classées issues des partitions en 7 classes et plus sont comparées à l'aide d'une fonction "et logique" ou intersection qui calcule la proportion de pixels communs de chaque image classée à toutes les images. L'image classée ayant la plus forte proportion de pixels communs à toutes les images classées issues des partitions en nombre croissant de classes, est sélectionnée. Nous considérons que plus un pixel est classé en "groupements de ligneux" lors des classifications, plus il est possible que ce pixel corresponde en effet à un groupement de ligneux au sol. Le seuil minimal des 7 classes correspond à une représentation satisfaisante de la structure des groupements de ligneux, d'après une comparaison visuelle avec la composition colorée.
- Dans une deuxième phase, on calcule l'intersection entre les deux images classées et binarisées de décembre 1986 et de mai 1988 sélectionnées à l'étape précédente. L'image issue de l'intersection des deux images classées et binarisées des deux dates, constitue l'image des groupements de ligneux. L'intersection entre l'image classée issue de la partition optimale de décembre et celle de mai, est calculée sur des fenêtres de 400 / 400 pixels. La taille de ces fenêtres a été choisie pour éviter les distorsions introduites par le recalage entre les deux images satellitaires de date différente.

La construction de l'image des groupements de ligneux s'appuie sur deux images prises à deux ans d'intervalle et à deux moments différents de l'année. Les ligneux ont entre les deux dates un comportement spectral différent, lié à des fluctuations de leur taux de recouvrement au sol qui peuvent être survenues dans l'intervalle mais surtout

aux variations de l'état phénologique entre ces deux dates. Néanmoins, leur comportement spectral est spécifique et contrastant avec leur environnement, comme l'a mis en évidence l'analyse des classifications.

3.2. Le choix de l'image des groupements de ligneux sur le site d'Oursi :

Dans une première étape, des fenêtres-test sont délimitées sur les photographies aériennes numérisées en teintes de gris, au sein des différentes unités géomorphologiques et des structures du couvert ligneux distinguées dans la partie I (Fig.40). Les pixels correspondant aux groupements de ligneux sont identifiés par photo-interprétation. Les fenêtres-test sont binarisées, nous ne conservons que les pixels correspondant aux groupements de ligneux et aux individus isolés dont la taille est supérieure au pouvoir de résolution de la photographie aérienne (échelle : 1.50 000), que nous appelons "groupements de ligneux". Chaque pixel de la photographie aérienne numérisée a pour dimension 70/70 microns ce qui correspond à environ 3,5 m au sol. Les fenêtres-test sont superposées aux régions correspondantes de l'image SPOT classée et binarisée et agrandies six fois. Leur taille correspond à un carré d'environ 50 pixels Spot de côté, soit environ 1 kilomètre de côté au sol. La détermination de l'image classée offrant la meilleure représentation des groupements de ligneux s'effectue en calculant l'intersection entre les photographies aériennes et les images classées et binarisées.

Les fenêtres-test suivantes ont été délimitées :

- sur les bandes dunaires (Fig.41) :
 sur la bande dunaire septentrionale (quatrième bande) : A4,
 sur la troisième bande dunaire : AW3, AE3,
 sur la bande dunaire méridionale (première bande) : AW1, AC1, AE1 ;
- dans la plaine interdunaire sableuse (Fig.42) : IS1, IS2, IS3 ;
- dans la plaine interdunaire à brousse tigrée (Fig.43 et 44) : DW1, DW2, DW3, DW4, DN1, DN2, HE1, HE2.

A chaque superposition d'une fenêtre-test de photographie aérienne et de la fenêtre-test correspondante de l'image Spot classée, binarisée et agrandie, on comptabilise le nombre de pixels "groupements de ligneux" de l'image Spot, le nombre de pixels "groupements de ligneux" de la photographie aérienne numérisée et le nombre de pixels "groupements de ligneux" communs aux deux images. L'image classée offrant la meilleure représentation des groupements de ligneux est déterminée à l'aide du rapport R suivant :

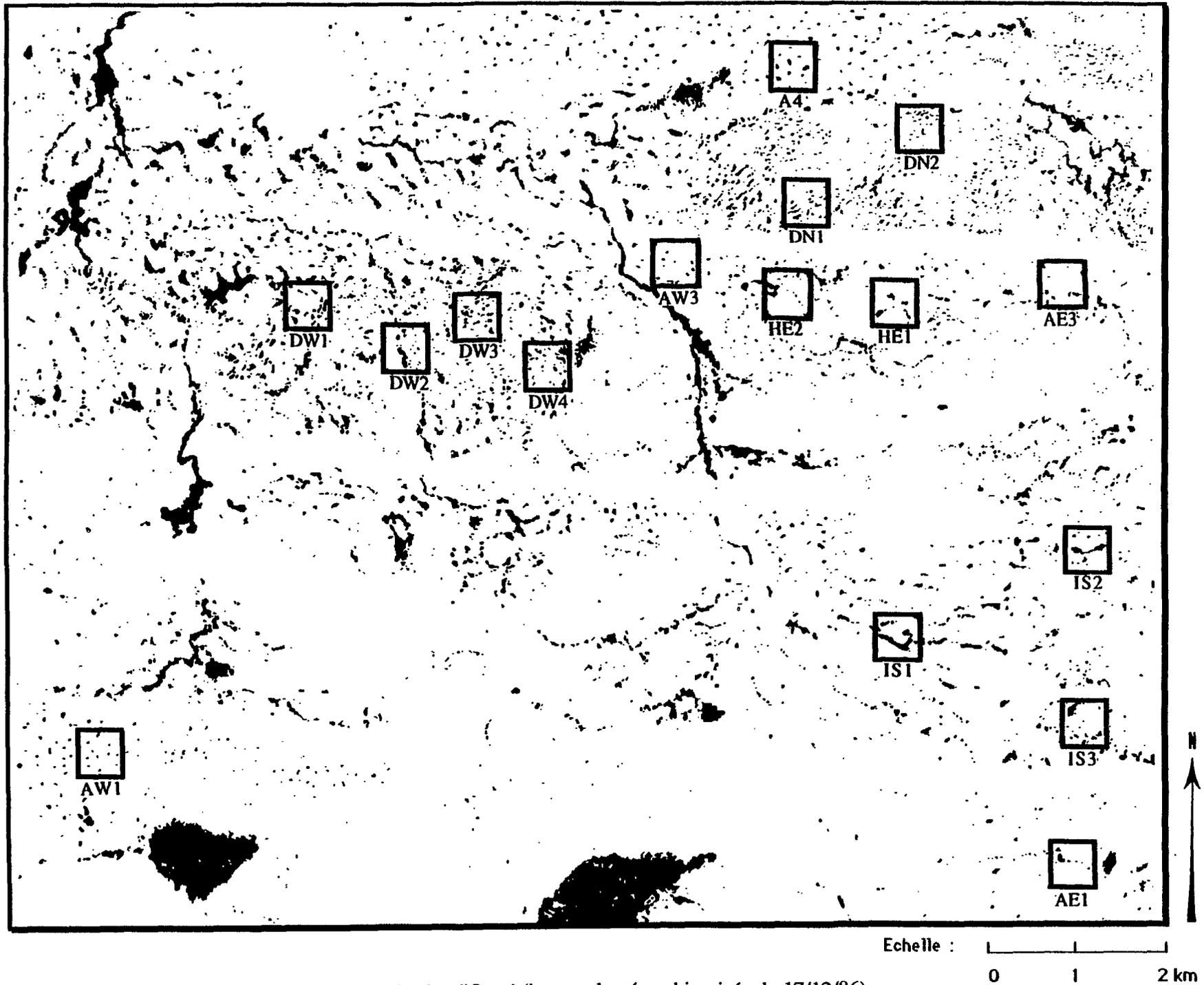


Figure 40 : Localisation des fenêtres-test sur le site d'Oursi (image classée et binarisée du 17/12/86)

$$R = \frac{(A / B)}{(C / D)}$$

où,

A = les pixels communs aux deux images,

B = les pixels non communs des photographies aériennes,

C = les pixels communs aux deux images,

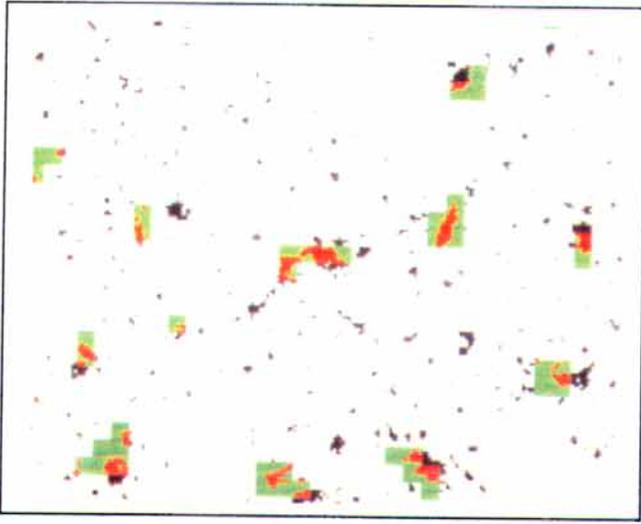
D = les pixels non communs de l'image satellitaire.

L'optimum recherché est un résultat proche de 1, pour éviter la tendance à la sur-extension spatiale des groupements de ligneux sur l'image satellitaire classée : sur les images classées comptant le plus de pixels classés en "groupements de ligneux", la distribution spatiale de ces pixels devient plus atypique : on n'observe pas de façon systématique un épaissement de la taille des groupements de ligneux, mais la présence de grandes plages qui ne correspondent plus à des groupements denses de ligneux.

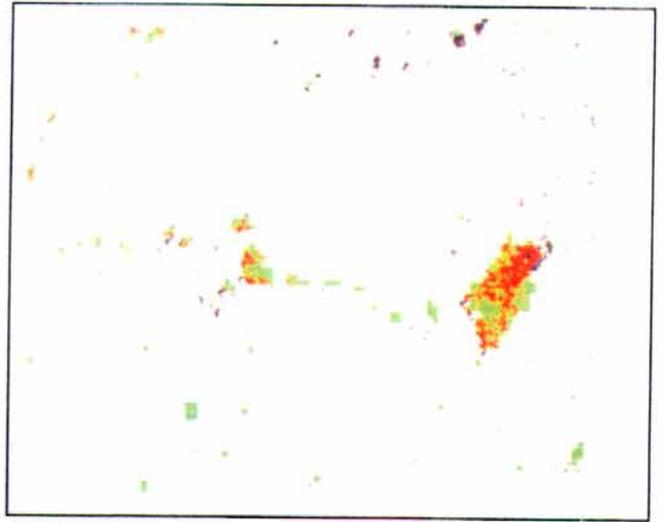
Le calcul de la moyenne des résultats de cet indice sur les différentes fenêtres-test pour chaque partition à k classes (Tableau 2), désigne la classification en douze classes comme offrant la meilleure représentation des groupements de ligneux.

Images classées issues des partitions en :	R
7 classes	1.833
8 classes	1.527
9 classes	2.063
10 classes	1.181
11 classes	1.127
12 classes	1.086
13 classes	1.117
14 classes	1.094
15 classes	1.365
16 classes	1.830
17 classes	1.374

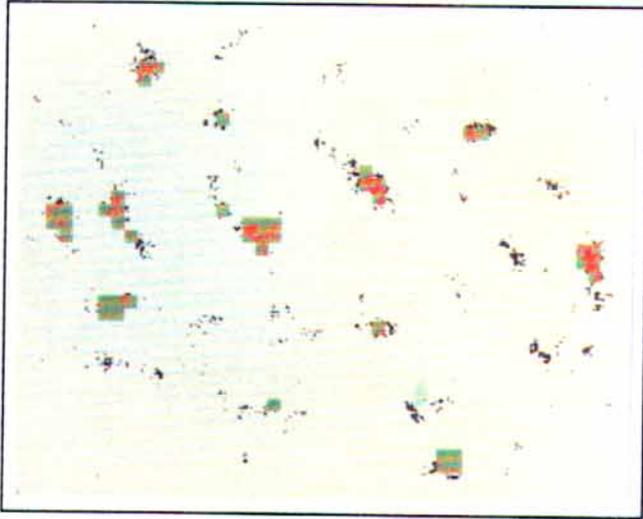
Tableau 2 : La moyenne de l'indice R calculé sur les différentes fenêtres-test pour les partitions de 7 à 17 classes



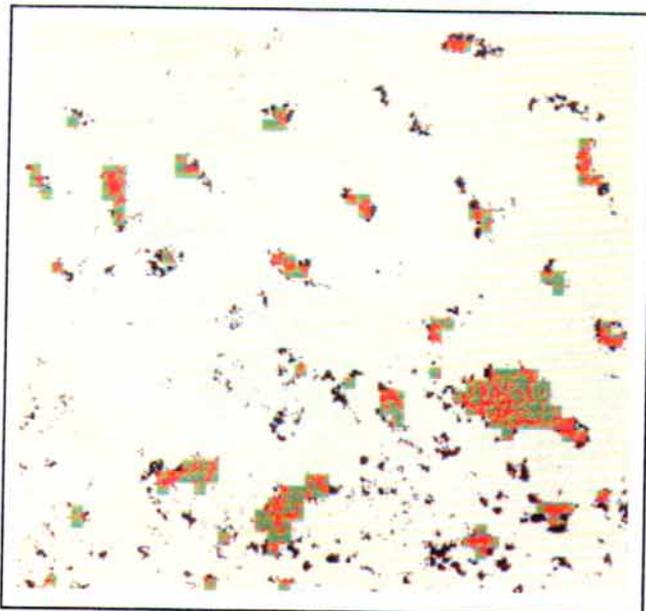
Fenêtre-test AW1



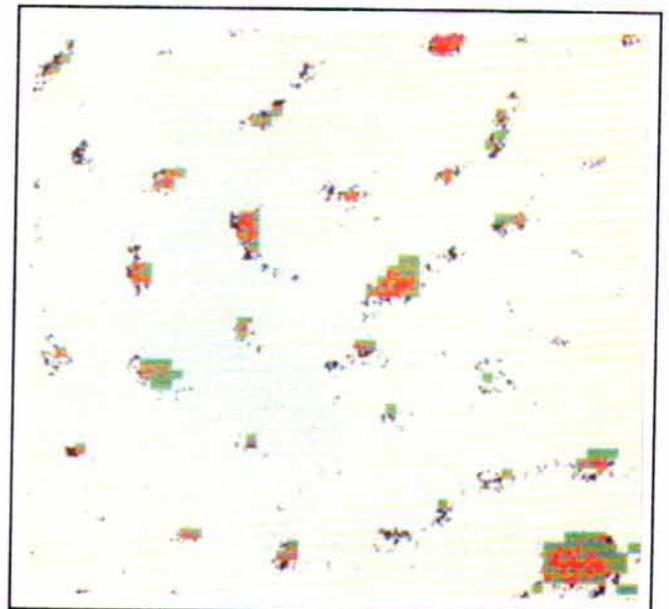
Fenêtre-test AE1



Fenêtre-test AW3



Fenêtre-test AE3



Fenêtre-test A4

Figure 41 : Les fenêtres-test délimitées sur les bandes dunaires du site d'Oursi

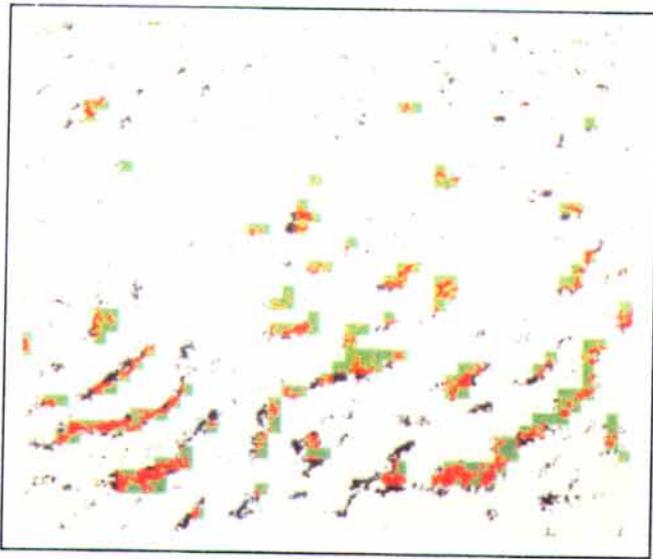
La superposition des photographies aériennes et de l'image satellitaire permet d'appréhender la représentation du couvert ligneux sur image satellitaire par rapport à celle des photographies aériennes. L'extension spatiale des groupements de ligneux sur les images classées varie d'une structure des groupements de ligneux à l'autre. La moyenne de l'indice R calculé pour chaque fenêtre-test, sur les onze opérations de superposition des images classées issues des partitions en nombre croissant de classes (de 7 à 17 classes) et des photographies aériennes, nous permet de l'évaluer :

Parcelles-test	moyenne de l'indice R calculé sur les images classées issues des partitions de 7 à 17 classes
AW1	1.343
AE1	1.732
AW3	1.300
AE3	0.551
A4	1.914
IS1	2.928
IS2	1.964
IS3	1.240
DN1	1.408
DN2	0.772
HE1	1.389
HE2	0.595
DW1	2.895
DW2	1.562
DW3	0.975
BTW4	1.328

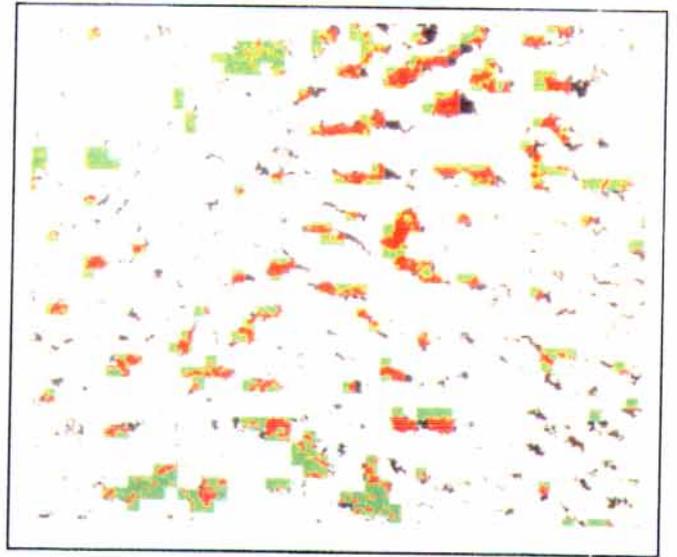
Tableau 3 : La moyenne de l'indice R sur les images classées de 7 à 17 classes du site d'Oursi pour chaque fenêtre-test

(la moyenne de la fenêtre-test BD1W est de 1.343 pour l'ensemble des classifications, mais pour les images classées en 7, 8, 9, 16, 17 classes, la moyenne des indices calculés est de 2.007, et pour les images classées de 10 à 15 classes, de 0.681)

Les résultats de l'indice R soulignent les grandes différences existant entre le taux d'occupation des groupements de ligneux, sur image et sur photographie aérienne, en fonction de la localisation de la fenêtre-test et du type de structure des groupements de ligneux analysé. Ces différences sont liées :



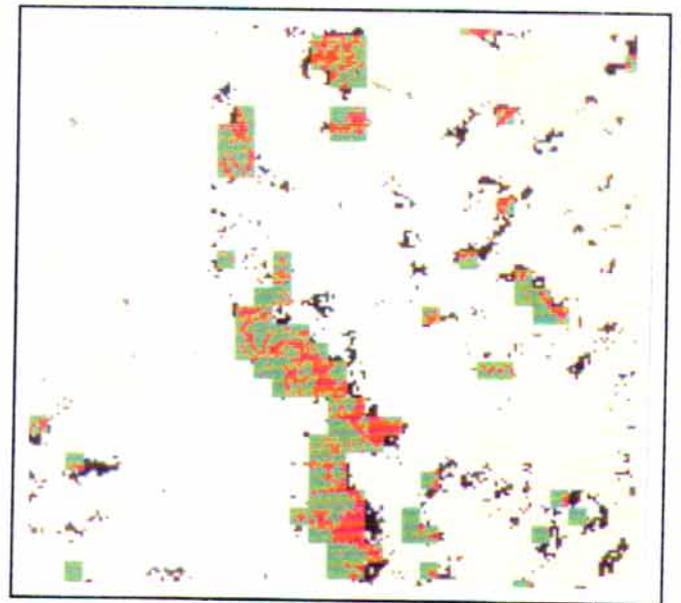
Fenêtre-test DN1



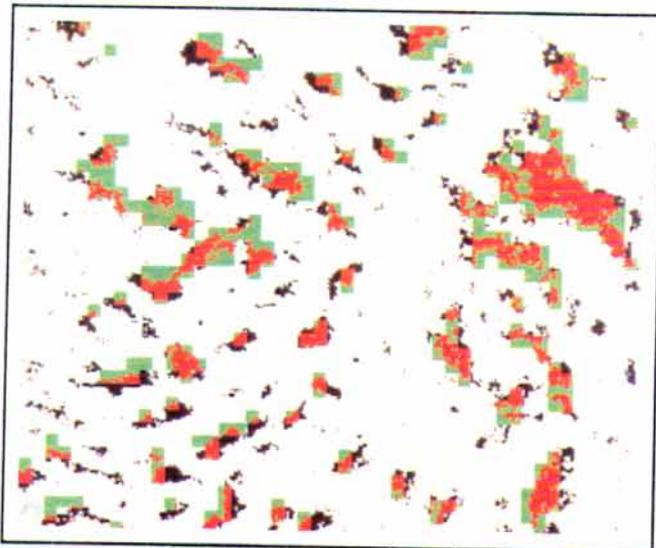
Fenêtre-test DN2



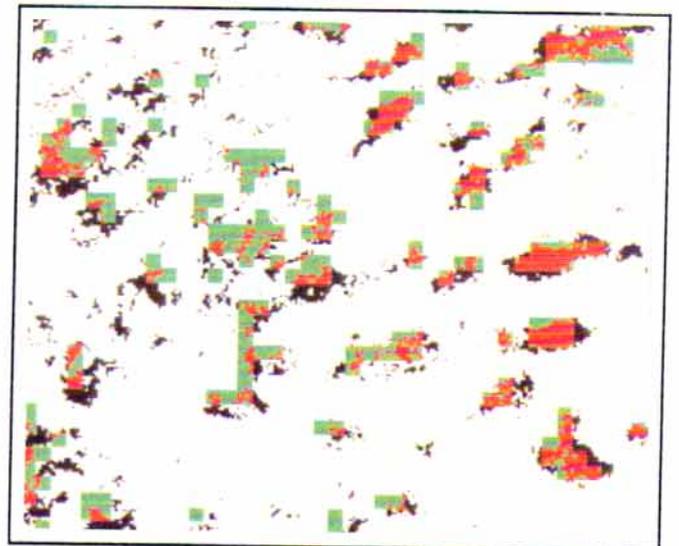
Fenêtre-test DW1



Fenêtre-test DW2



Fenêtre-test DW3



Fenêtre-test DW4

Figure 45 : Les fenêtres-test délimitées dans la brousse tigrée du site d'Oursi

- A la taille des groupements de ligneux :

La taille du bosquet doit être proche de celle de la surface prise en compte par le pixel, pour que celui-ci soit représenté sur l'image satellitaire. Les bandes boisées de brousse tigrée (DN1, DN2) dont la largeur avoisine ou dépasse celle du pouvoir de résolution Spot (20 m) sont bien représentées sur l'image classée, à l'inverse de nombreux petits fourrés des fenêtres-test : HE1, HE2, AW3, AE3, de taille inférieure au pouvoir de résolution du satellite, qui n'apparaissent pas sur l'image classée.

Les fenêtres-test, pour lesquelles la moyenne de l'indice R est inférieure à 1, sont occupées par des groupements de ligneux dont l'extension spatiale sur les images satellitaires est supérieure à celle présente sur la photographie aérienne correspondante. Ces fenêtres-test, correspondent à des régions où, dans un cas, le couvert ligneux est assez faible (AE3, HE2), où dans un autre cas, le couvert ligneux est dense (DW3, DN2). Mais surtout, ces régions sont occupées par de gros groupements de ligneux dont l'extension spatiale est sur-représentée sur l'image satellitaire. Les fenêtres-test dont la moyenne de l'indice R est inférieure à 1, sont composées d'une forte proportion de petits groupements de ligneux qui, en raison de leur petite taille, n'apparaissent pas sur l'image satellitaire.

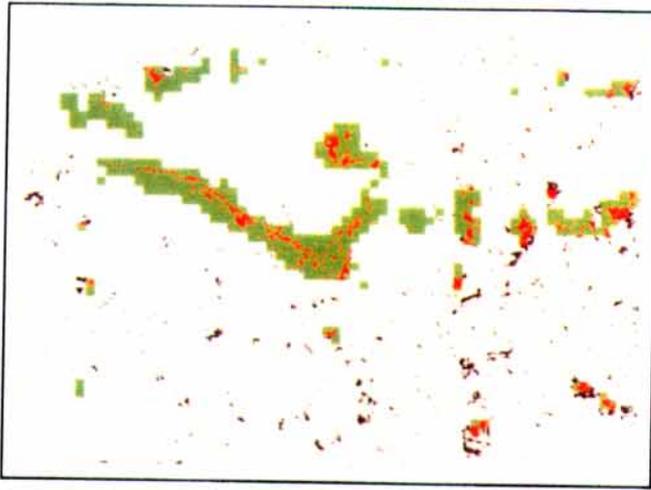
- A l'espacement entre les groupements de ligneux et au degré de concentration du couvert ligneux :

Les bosquets des bandes dunaires, répartis dans les creux intradunaires, sont bien individualisés les uns des autres. Ces petites unités sont bien représentées sur l'image satellitaire et leur extension spatiale est même surévaluée (A4).

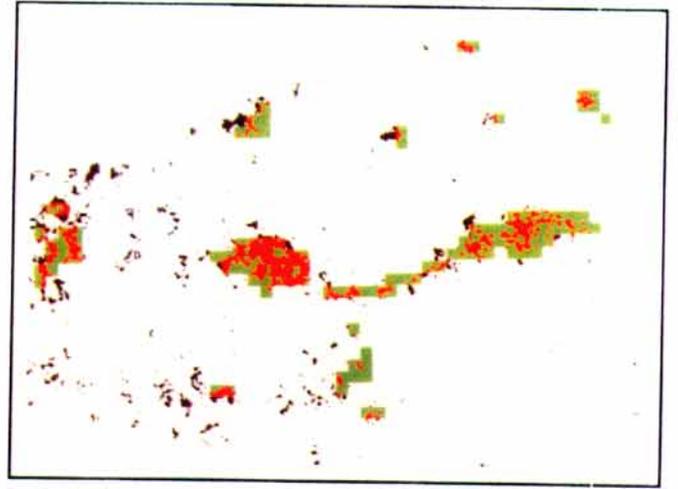
La connexité de plusieurs bosquets, comme sur la fenêtre-test AE1, se traduit sur l'image classée par un agrégat continu, dont l'extension spatiale est surévaluée par rapport à la surface couverte par ces mêmes bosquets sur la photographie aérienne. Ainsi dans la plaine interdunaire sableuse au nord du village d'Oursi, même si les bosquets sont de très petite taille, leur alignement et leur promiscuité se traduisent par une surévaluation de l'extension spatiale de ces groupements de ligneux sur l'image classée.

- Aux caractéristiques radiométriques :

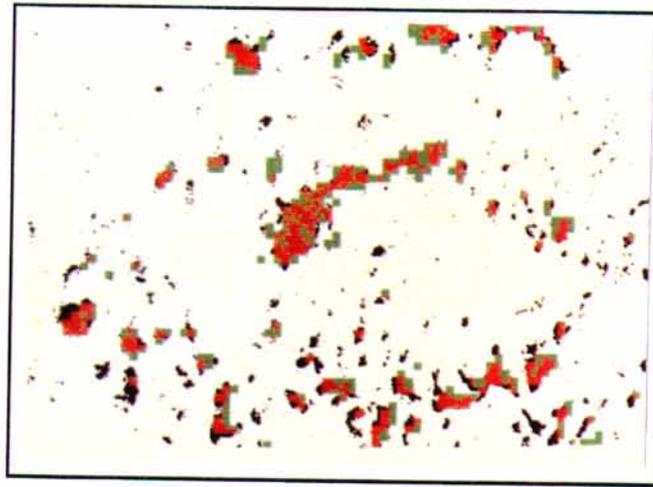
Sur la bande dunaire située au nord de la mare de Dibissi (AW1), les groupements de ligneux sont de petite taille, de taille inférieure à ceux de la bande dunaire septentrionale, à faible taux de recouvrement et composés en grande majorité de *Balanites aegyptiaca*.



Fenêtre-test IS1

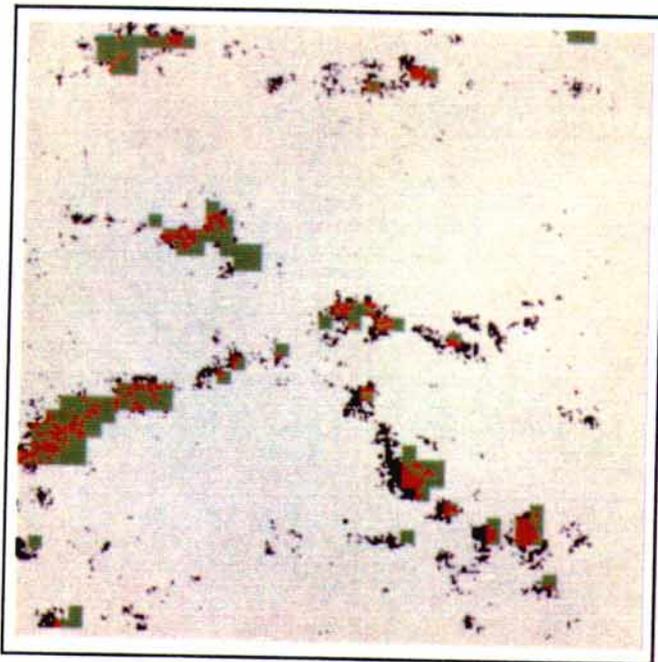


Fenêtre-test IS2

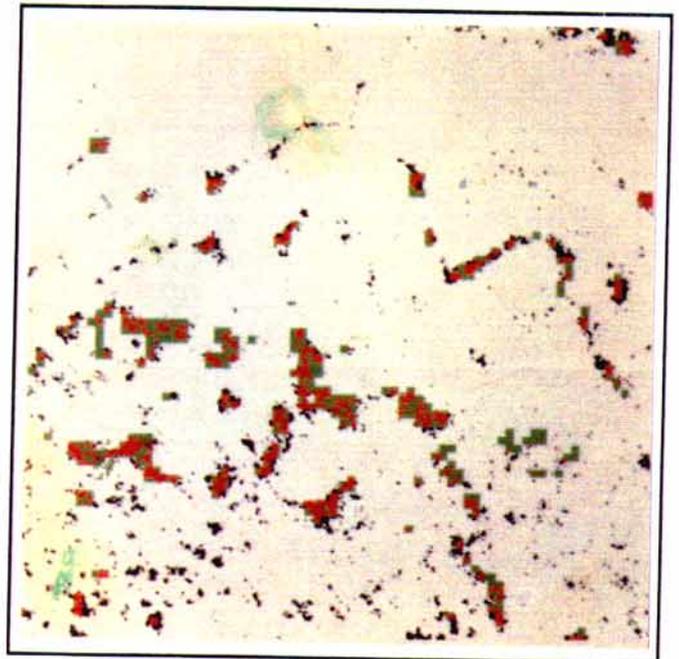


Fenêtre-test IS3

Figure 43 : Les fenêtres-test délimitées dans la première plaine interdunaire sableuse du site d'Oursi



Fenêtre-test HE1



Fenêtre-test HE2

Figure 44 : Les fenêtres-test délimitées dans la brousse tigrée du site d'Oursi

Ces caractéristiques se traduisent par des valeurs radiométriques situées à la frange des classes "groupements de ligneux". Le nombre de pixels classés en "groupements de ligneux", sur cette unité, varie fortement d'une partition à l'autre.

L'estimation de la qualité de la représentation des groupements de ligneux sur les images satellitaires classées par un indice global, présente un biais parce que celui-ci est influencé par la proportion relative de petits et de gros fourrés (DN1, DN2) et par leur répartition spatiale. Par exemple, sur la fenêtre DW3, le nombre de groupements de ligneux et leurs superficies, sont sous-représentés sur l'image classée car la proportion de petits fourrés est grande par rapport à celle des gros fourrés.

En conclusion, la comparaison des images classées avec les photographies aériennes apporte des résultats nuancés, pour plusieurs raisons :

- Des changements au sol peuvent être survenus entre 1981 (date de prise de vue des photographies aériennes) et 1986 (image satellitaire), ce qui justifierait des différences d'extension spatiale des groupements de ligneux observées entre les deux documents.
- L'image satellitaire et la photographie aérienne fournissent deux types d'information différents : la photographie aérienne nous renseigne sur le taux de recouvrement des frondaisons ligneuses. La réponse radiométrique des groupements de ligneux sur l'image satellitaire est liée au taux de recouvrement, mais surtout à l'état physiologique et phénologique des végétaux les occupant. Elle intègre aussi d'autres composants tels que le sol nu, qui sur les photographies aériennes, est mieux différencié. Nous nous heurtons au problème de la comparaison de la représentation d'un objet hétérogène (ligneux, sols,...) dont la réponse radiométrique sur les images satellitaires n'est pas toujours aisément identifiable, avec celle des photographies aériennes où les ligneux sont reconnaissables en tant que tels.
- La différence d'échelle entre les deux types d'images limite aussi les possibilités de comparaison. Sur les photographies aériennes, la délimitation des surfaces occupées par des ligneux peut être effectuée avec un degré de détail, qui n'apparaît pas sur les images satellitaires. La reconnaissance des petits groupements de ligneux de taille inférieure au pouvoir de résolution du satellite, nécessiterait une étude plus fine des valeurs radiométriques enregistrées. Néanmoins, cette analyse ne nous permettrait pas d'identifier sur les images satellitaires, la structure de ces petits groupements de ligneux.

Malgré ces différences d'informations fournies par l'une et l'autre image, la superposition des images Spot classées et des photographies aériennes, permet de

déterminer l'image des groupements de ligneux à partir de laquelle sera effectuée l'analyse de leur structure. Cette image est issue de la partition en 12 classes.

3.3. La construction de l'image des groupements de ligneux sur le site du Ferlo :

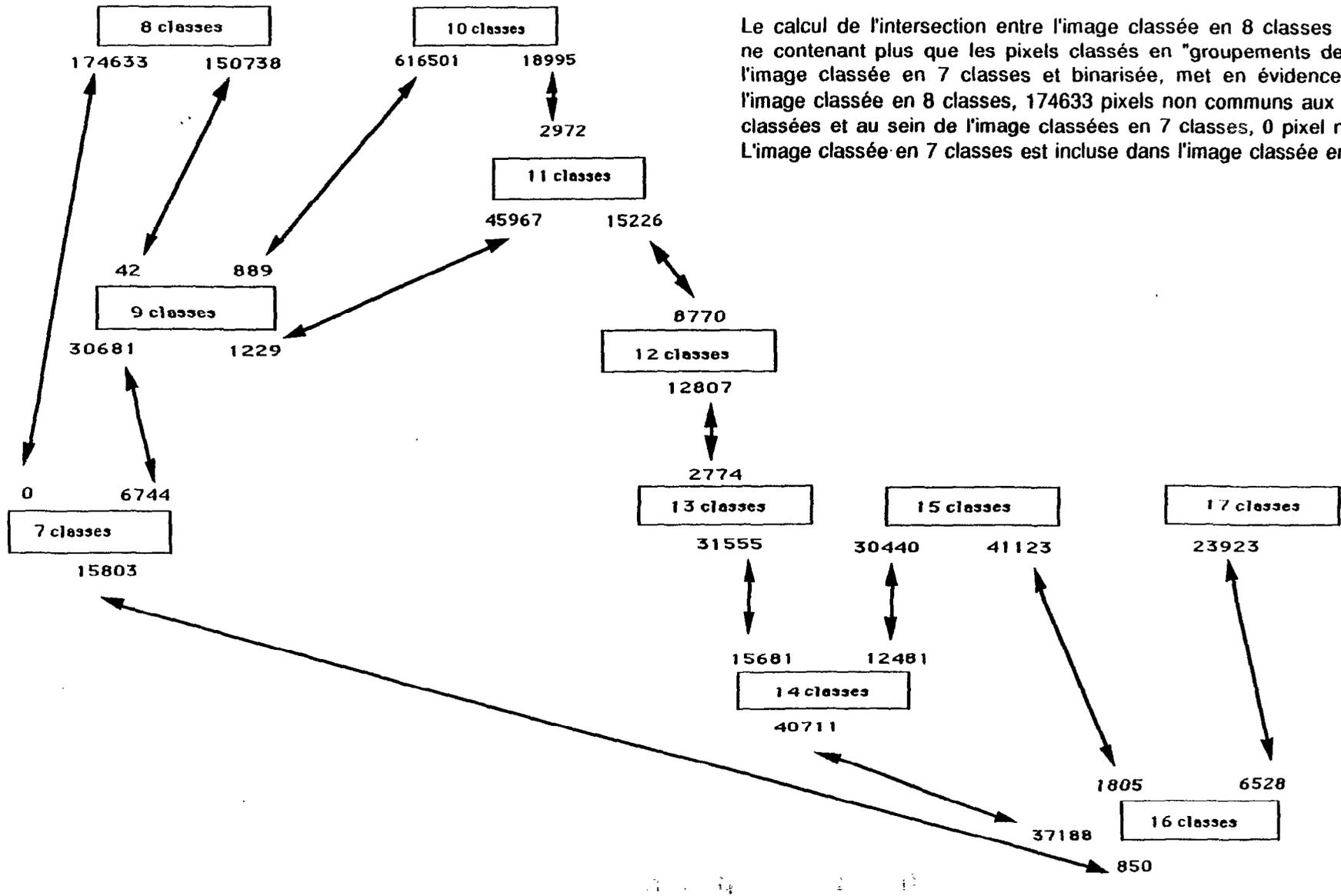
La construction de l'image des groupements de ligneux sur le site du Ferlo, s'effectue en deux phases. Une première phase est consacrée au choix de l'image classée offrant la meilleure représentation des groupements de ligneux, à chaque date. Puis, l'image des groupements de ligneux est construite à partir des images sélectionnées à chaque date.

a) La détermination de l'image classée offrant la meilleure représentation des groupements de ligneux à chaque date :

Dans une première phase, il s'agit de déterminer à chaque date, l'image classée issue de la partition à k classes, offrant la meilleure représentation des groupements de ligneux. La méthode consiste à calculer l'intersection entre les images classées et binarisées issues des différentes partitions en nombre croissant de classes. L'image classée comptant le plus de pixels communs à toutes les images classées est sélectionnée.

L'image de décembre du Ferlo offre le désavantage d'être nuageuse. Cependant, en raison de la spécificité de la réponse radiométrique du couvert ligneux par rapport aux autres composants du paysage et aux nuages et à leurs ombres, l'identification des groupements de ligneux s'est avérée possible.

La sélection de l'image classée en k classes, comptant le plus de pixels communs à toutes les images classées issues des différentes partitions, aboutit à une hiérarchisation des images classées selon ce critère. Cette hiérarchisation s'effectue depuis les images classées où les classes "groupements de ligneux" sont les plus étendues spatialement, jusqu'aux images classées où les classes "groupements de ligneux" ont l'extension spatiale la plus réduite. Cette hiérarchisation revient en fait à sélectionner la partition comptant le plus petit nombre de pixels classés en "groupements de ligneux". Ainsi, parmi les images classées de décembre du secteur de Mbidi (Fig.45), l'image classée issue de la partition à 16 classes, s'est révélée être l'image ayant la plus forte proportion de pixels communs à toutes les images classées issues des partitions de 7 à 17 classes. Cette image classée compte aussi le plus petit nombre de pixels classés en "groupements de ligneux" (Fig.46).



Le calcul de l'intersection entre l'image classée en 8 classes et binarisée, ne contenant plus que les pixels classés en "groupements de ligneux", et l'image classée en 7 classes et binarisée, met en évidence au sein de l'image classée en 8 classes, 174633 pixels non communs aux deux images classées et au sein de l'image classées en 7 classes, 0 pixel non commun. L'image classée en 7 classes est incluse dans l'image classée en 8 classes.

Figure 45 : Calcul de l'intersection entre les différentes images classées de décembre 1986 du secteur de Mbidi au Ferlo et comptabilisation du nombre de pixels non communs aux images classées comparées deux à deux

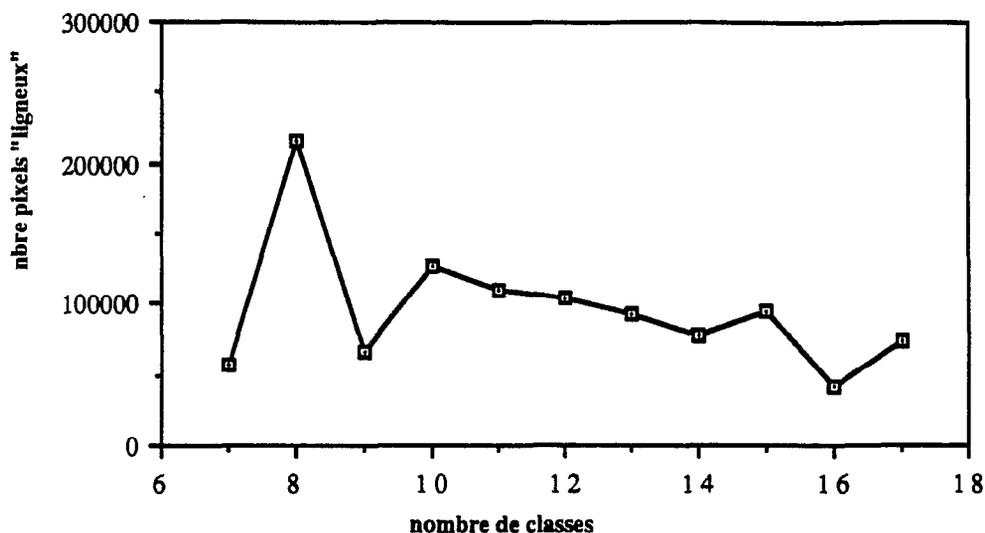


Figure 46 : Le nombre de pixels classés en "groupements de ligneux" sur les images classées de 7 à 17 classes calculées à partir de l'image de décembre 1986 du secteur de Mbidi au Ferlo

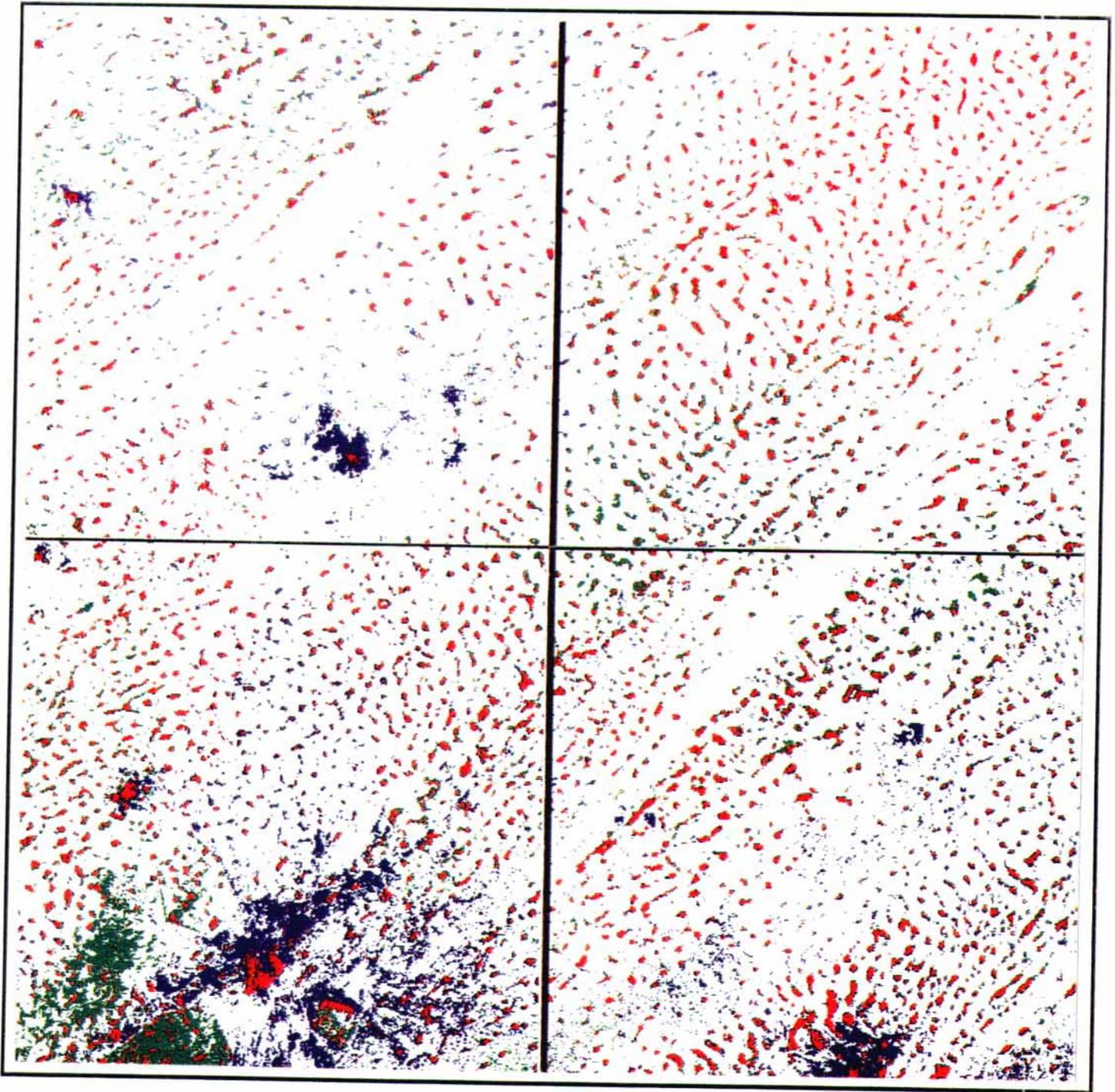
Ce résultat met en évidence la présence d'un noyau stable de pixels classés en "groupements de ligneux" que l'on retrouve sur chaque image classée, et que nous allons interpréter comme étant de façon certaine des groupements de ligneux. Là encore, la structure punctiforme caractéristique des groupements de ligneux le confirme.

La sélection de l'image classée comportant le plus petit nombre de pixels classés en "groupements de ligneux", ne consiste pas en une restriction de l'information. L'objet de cette étude n'étant pas d'analyser le taux de recouvrement des ligneux en milieu sahélien, mais d'étudier la structure des groupements de ligneux et ses variations dans le paysage.

Les images classées issues des partitions au nombre k optimal de classes comptant le plus petit nombre de pixels classés en "groupements de ligneux", ont été sélectionnées sur chaque secteur étudié et à chaque date.

b) La construction de l'image des groupements de ligneux :

Dans une deuxième phase, on calcule l'intersection entre les deux images classées, comptant la plus forte proportion de pixels communs à toutes les partitions, de chacune des deux dates. A l'issue de cette opération, seuls les pixels communs aux deux dates sont conservés. Le calcul de l'intersection est effectué sur des fenêtres de 400 / 400 pixels afin de limiter les effets de distorsion introduits par le recalage des deux images de date différente.



échelle : 0 1 2 3 4 5 km



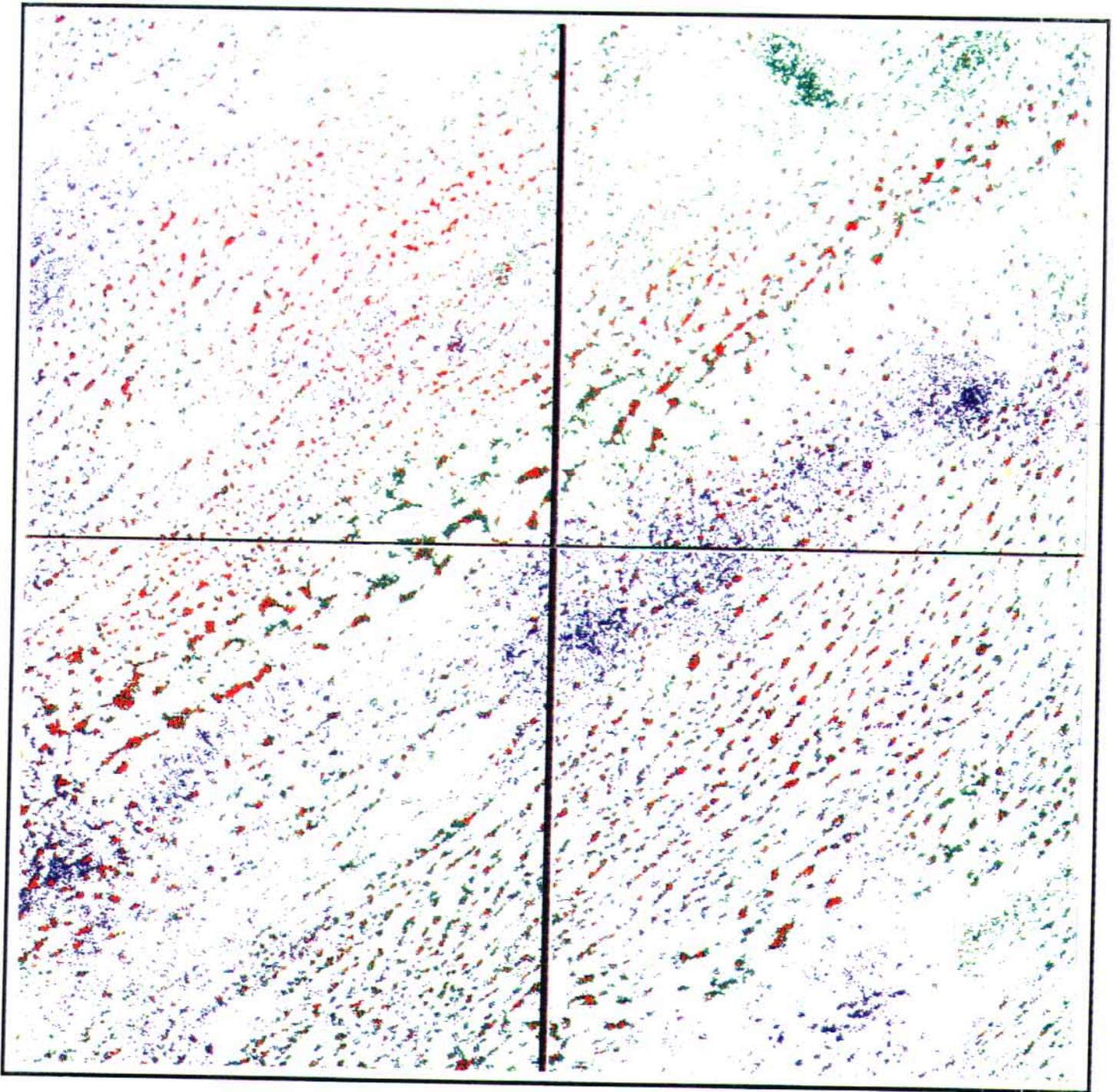
Figure 47 : Le site de Mbidi au Ferlo : superposition des classes "groupements de ligneux" de l'image de décembre et de celles de l'image de mai : en vert : les classes "groupements de ligneux" de décembre, en bleu : les classes "groupements de ligneux" de mai, en rouge : les pixels "groupements de ligneux" communs aux deux dates

Les deux images ont été prises à deux moments différents de l'année : décembre et mai, où l'état phénologique du couvert ligneux est différent (cf. & 2.1, partie I). Le mois de mai correspond à la fin de la saison sèche qui dure depuis octobre, à cette période, de nombreux arbres ont perdu leurs feuilles, leur réponse radiométrique n'est pas de type chlorophyllien, comme le montre les valeurs moyennes des classes "groupements de ligneux" sur les canaux bruts (Fig.38). Cependant les groupements d'arbres et d'arbustes, par contraste avec leur environnement très dénudé, ont une réponse spectrale propre qui a été identifiée lors des classifications.

Sur les images classées, les pixels classés en "groupements de ligneux" ne sont pas exactement les mêmes aux deux dates. Sur l'image issue de la superposition des deux images des deux dates du secteur de Mbidi (Fig.47), les parcelles de reboisement autour du forage de Mbidi apparaissent en décembre et non en mai. Les parcelles de reboisement sont occupées en majorité par *Acacia senegal*, leur taux de recouvrement est assez faible et au mois de mai, la majorité des individus ont perdu leurs feuilles. Sur les images classées de mai, les groupements de ligneux et les aires très dénudées des alentours du forage de Mbidi et des campements, sont classés dans une même classe. Les pixels correspondant aux aires environnant le forage de Mbidi et les campements, et non à des groupements de ligneux, n'apparaîtront pas sur l'image des groupements de ligneux.

Sur l'image de Tessékéré, issue de la superposition des deux images des deux dates (Fig.48), on perçoit localement la prédominance des pixels classés en "groupements de ligneux" de l'image de décembre ou la prédominance des pixels classés en "groupements de ligneux" de l'image de mai. Les groupements de ligneux du couloir interdunaire apparaissent plus étendus sur l'image classée de décembre que sur celle de mai. Par contre, sur les bandes dunaires, de nombreux groupements de ligneux et des taches plus ou moins continues apparaissent sur l'image classée de mai. Ces pixels correspondent à d'autres états de surface que le groupement de ligneux. Il est incertain d'interpréter de façon précise ces plages de pixels classées en "groupements de ligneux" en l'absence de données-terrain de la même période.

L'image des groupements de ligneux, construite en comparant deux images satellitaires prises à deux dates différentes, constitue une image des groupements de ligneux du site du Ferlo plus intemporelle, qui ne traduit pas seulement le taux de recouvrement et l'état phénologique des ligneux au mois de décembre 1986 ou au mois de mai 1988, mais la présence de groupements de ligneux au cours de cette période.



échelle : 0 1 2 3 4 5 km



Figure 48 : Le site de Tessékéré au Ferlo : superposition des classes "groupements de ligneux" de l'image de décembre et de celles de l'image de mai : en vert : les classes "groupements de ligneux" de décembre, en bleu : les classes "groupements de ligneux" de mai, en rouge : les pixels "groupements de ligneux" communs aux deux dates

L'image résultante de l'intersection des deux images à deux dates différentes, constitue une image des groupements de ligneux affranchie des variations saisonnières de la réponse spectrale. De plus la confrontation des deux images nous apporte une confirmation globale de la présence de groupements de ligneux et de leur distribution spatiale aux deux dates. Nous obtenons ainsi une image "intemporelle" des groupements de ligneux au Ferlo pour la période 1986/1988.

A partir des images des groupements de ligneux, déterminées à l'aide de ces deux procédures, nous allons maintenant analyser la distribution spatiale des groupements de ligneux à l'aide d'indices morphologiques et tenter ainsi de caractériser leurs structures.

PARTIE III

**CARACTERISATION DE LA STRUCTURE
SPATIALE DU COUVERT LIGNEUX
A L'AIDE DE PARAMETRES QUANTITATIFS**

1. EXPOSE DE LA METHODE ET DES OUTILS :

Nous avons vu dans la partie I, que la structure du couvert ligneux change d'une unité géomorphologique à l'autre : de la bande dunaire à l'espace interdunaire et au sein d'unités géomorphologiques de même nature. L'analyse des classifications effectuées sur les images satellitaires dans la partie II, a mis en évidence au sein de ces unités géomorphologiques, des secteurs ayant des propriétés spectrales différentes traduisant ainsi des états de surface différents. A partir de l'image des groupements de ligneux, générée par les classifications, et binarisée (Fig.13 et 14, partie I), nous tentons maintenant de caractériser la structure spatiale du couvert ligneux sur les deux sites étudiés, à l'aide de paramètres quantitatifs. La structure du couvert ligneux est analysée au sein de chaque unité géomorphologique : bande dunaire, espace interdunaire.

Une fois la structure de chaque quadrat caractérisée, une analyse comparative des quadrats décrits par les indices morphologiques, est conduite à l'aide d'une analyse factorielle des correspondances. Cette analyse comparative permet de mettre en évidence les variations de la structure du couvert ligneux au sein des paysages étudiés.

A l'issue de cette analyse, les caractéristiques structurales du couvert ligneux seront mises en relation avec les caractéristiques radiométriques et physiques des unités du paysage étudiées dans la partie II. Cette mise en relation permettra alors de dégager des associations entre des structures et des unités paysagiques et, de saisir de quelle façon la structure du couvert ligneux reflète l'état du milieu qu'il occupe.

Différents paramètres permettent de définir une structure : la taille des éléments texturaux (ici les entités de pixels connexes classés en "groupements de ligneux"), leur forme, leur agencement. Pour caractériser la structure de façon quantitative, nous avons eu recours aux méthodes de la **morphologie mathématique** (Serra, 1982).

Deux indices morphologiques ont été choisis :

- la **granulométrie par ouverture bidimensionnelle** qui permet d'estimer la distribution de la taille ou la proportion relative de chaque taille d'élément textural (ici, les groupements de ligneux) au sein de l'image analysée,
- la **covariance** qui permet d'évaluer la dispersion des éléments texturaux, soit, dans le cadre de cette étude, la répartition relative des groupements de ligneux par rapport aux aires non ou peu couvertes en ligneux.

L'utilisation de ces indices présente plusieurs avantages par rapport à celle de paramètres apparemment plus simples tels que le calcul du nombre d'éléments, de leurs superficies... Ils sont applicables à n'importe quel type de structure : la granulométrie par ouverture fournit des ordres de grandeur relatifs qui lui sont propres et que l'on peut utiliser avec une grande souplesse, pour comparer des structures très compactes ou très fines ou encore très hétérogènes par la taille de leurs éléments. De plus ces indices sont assez synthétiques : la covariance donne en une seule opération, des indications sur la surface relative du couvert ligneux, le fractionnement de la structure et la répartition spatiale des éléments sur la surface étudiée.

La caractérisation de la structure du couvert ligneux par unité géomorphologique s'effectue par le biais de fenêtres limitées à la surface de ces unités, que nous appelons quadrat. Le programme (MORPHOLOG de l'Ecole des Mines de Fontainebleau mis au point par B. Lay et C. Lantuéjoul) avec lequel nous avons calculé ces indices, travaille à partir d'imagettes de 256 pixels de côté. L'obtention d'un résultat global pour chaque imagette, nécessite d'analyser des quadrats de structure homogène. Pour cette étude, la taille des quadrats a été fixée à 85 pixels environ de côté, soit 1700 / 1700 mètres au sol. Cette taille correspond grossièrement à la largeur minimale, dans le sens nord-sud, des bandes dunaires du secteur dunaire d'Oursi et des dépressions interdunaires du Ferlo. Lors de l'analyse, chaque quadrat subit un agrandissement de facteur trois, acquérant ainsi la taille de 256 pixels de côté avec laquelle le programme travaille.

1.1. Rappel de la morphologie mathématique :

Cette présentation de la morphologie mathématique et des indices morphologiques utilisés lors de cette étude s'inspire de l'ouvrage de Coster et Chermant : "Précis d'analyse d'images".

L'idée de base de la morphologie mathématique est de comparer les objets que l'on veut analyser à un autre objet de forme connue, appelé **élément structurant**. La comparaison s'effectue à l'aide d'opérations ensemblistes (union, intersection, complémentation, ...). L'élément structurant B (hexagone, segment, ...) est déplacé de façon à ce que son origine passe par tous les pixels de l'image. L'image est assimilée à un ensemble X et les particules de pixels connexes présentes dans l'image aux parties de X. En chaque point, on pose une question relative à l'union, l'intersection ou à l'inclusion de B avec X ou dans X. La réponse sera positive ou négative. L'ensemble des points correspondant à des réponses positives forme un

nouvel ensemble qui constitue ce que l'on appelle l'image transformée.

Nous rappelons les deux transformations de base de la Morphologie Mathématique, appliquées ici à des images binaires :

- l'érosion : soit l'espace R^2 occupé par un ensemble X et un élément structurant B_x ; en chaque position x de l'espace, on pose la question suivante : est-ce que B_x est inclus dans X ? L'ensemble des points x correspondant à une réponse positive, forme un nouvel ensemble Y appelé érodé de X par B ;
- la dilatation : à l'aide du même élément structurant B_x , on pose pour chaque point de X , la question : B_x touche-t-il l'ensemble X ? L'ensemble des points x correspondant à une réponse positive, forme un nouvel ensemble Y appelé dilaté de X par B .

L'érosion et la dilatation sont deux opérations duales par rapport à la complémentation. C'est à dire qu'éroder un ensemble X revient à dilater l'ensemble complémentaire de X (ou encore le fond de l'image).

A partir de ces deux transformations de base, sont définies deux autres transformations :

- l'ouverture qui consiste en une érosion suivie d'une dilatation par le même élément structurant ;
- la fermeture qui consiste en une dilatation suivie d'une érosion par le même élément structurant.

L'élément structurant est défini par sa forme et sa taille. Il est déplacé de telle sorte que son centre occupe successivement toutes les positions x de l'espace. Le terme position désigne la configuration de pixels analysée par l'élément structurant. Lors de cette étude, la trame carrée des quadrats issus de l'image classée et binarisée, est transformée en trame hexagonale. La trame hexagonale présente l'avantage d'être symétrique pour un ensemble et son complémentaire : elle possède trois axes de symétrie contre deux dans le cas d'une trame carrée (Coster, 1989). Le passage à la trame hexagonale s'effectue en décalant d'un demi-pas une ligne sur deux. Pour un élément structurant hexagonal de taille ou de rayon 1, la position désigne le pixel central et ses six voisins. On distingue deux types d'élément structurant : l'élément structurant isotrope (hexagone) qui opère dans toutes les directions et l'élément structurant anisotrope (segment, bipoint...) qui opère selon une orientation privilégiée.

1.2. Les indices morphologiques :

Les opérations morphologiques effectuées lors de cette étude, sont réalisées au sein de fenêtres appelées masques de mesures, c'est à dire en analyse locale. Pour rendre les paramètres utilisés, indépendants de la taille du masque de mesures et des effets de bord, ceux-ci sont ramenés à l'unité d'espace dans laquelle ils sont estimés à l'aide de méthodes correctives. Pour la connaissance de ces méthodes correctives, on se réferra au manuel de Coster et Chermant.

a) La granulométrie par ouverture bidimensionnelle :

La granulométrie par ouverture bidimensionnelle consiste à transformer l'image par ouvertures successives à l'aide d'un élément structurant hexagonal de taille croissante. A chaque opération, les entités de pixels connexes, appelées particules, de taille inférieure à celle de l'élément structurant, sont éliminées à la manière d'un tamisage dont la taille des mailles croît.

L'utilisation d'un élément structurant convexe convient particulièrement à l'analyse de formes convexes. Dans le cas de particules de forme non convexe, les ouvertures successives lissent les contours des particules et tendent à les subdiviser. Il y a alors, sur-estimation du nombre de particules et sous-estimation de la surface des particules de grande taille car, à chaque ouverture, les particules sont érodées et des pixels sont éliminés. Les formes étudiées lors de cette étude sont le plus souvent convexes, à l'exception de très gros agrégats, tels ceux des chenaux d'écoulement temporaire du site d'Oursi. Lors de l'analyse granulométrique, ces quadrats d'agrégats sur chenaux d'écoulement temporaire, seront malgré tout bien caractérisés par rapport aux autres structures analysées, en raison de la taille nettement plus élevée de leurs éléments par rapport à celles des autres quadrats du couvert ligneux.

Le calcul de la surface et du nombre de particules éliminées à chaque ouverture permet d'évaluer la distribution de la taille des unités de ligneux de chaque quadrat. 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 :

$$G(n) = \frac{A(X) - A(XB(n))}{A(X)} \quad n \geq 0$$

$$F(n) = \frac{N(X) - N(XB(n))}{N(X)} \quad n \geq 0$$

où,

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

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

$XB(n)$ est l'ouvert de X par l'élément structurant B de taille n .

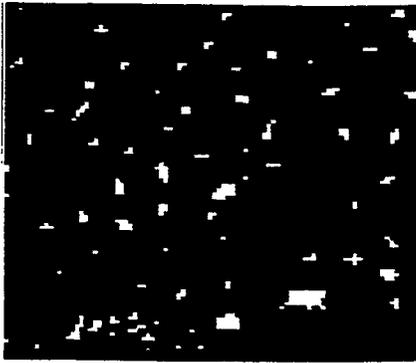
On peut aussi estimer à l'aide de ces résultats, la proportion en surface (nombre de pixels) ou en nombre de particules, éliminée entre deux ouvertures successives de rayon respectif n et $n+1$. Ces deux quantités que nous appelons respectivement, la densité granulométrique en surface $g(n)$ et la densité granulométrique en nombre $f(n)$ sont estimées à l'aide des formules suivantes :

$$g(n) = \frac{A(XB(n)) - A(XB(n+1))}{A(X)} \quad n \geq 0$$

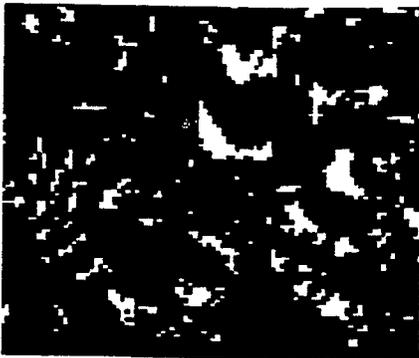
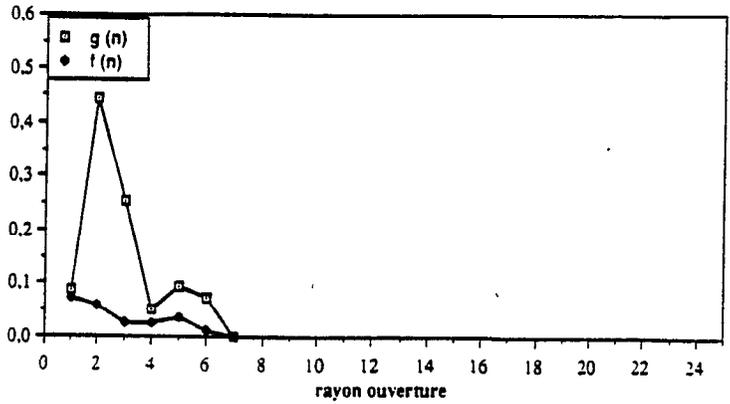
$$f(n) = \frac{N(XB(n)) - N(XB(n+1))}{N(X)} \quad n \geq 0$$

Les graphiques des densités granulométriques en surface $g(n)$ et en nombre $f(n)$, calculées sur trois quadrats du site d'Oursi (Fig.49), indiquent une ou plusieurs classes de taille de particules au sein de chaque quadrat. On distingue deux classes de taille des fourrés au sein du quadrat de fourrés sur bandes dunaires (A05), quatre classes de taille des fourrés dans le quadrat de brousse tigrée (D29) et cinq classes de taille de fourrés sur le quadrat d'agrégats sur chenal d'écoulement temporaire (I00). On remarque la faible proportion de petits fourrés au sein de ce dernier quadrat.

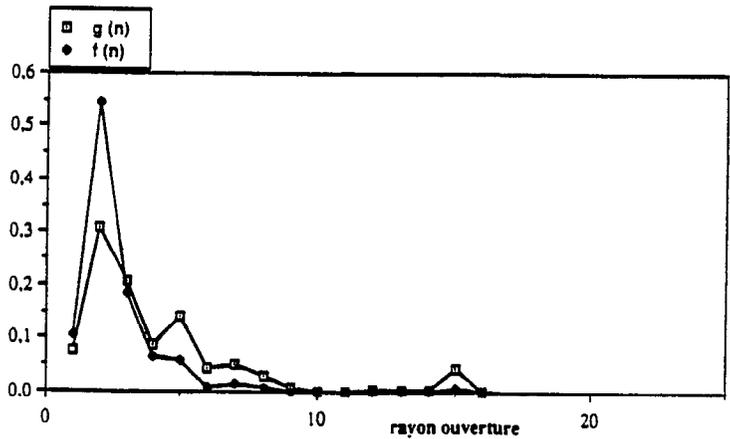
Chaque graphique comporte deux courbes : la courbe du nombre de pixels, correspondant à la mesure en surface $g(n)$ (en points clairs) et la courbe du nombre de particules, correspondant à la mesure en nombre $f(n)$ (en points sombres). On constate de façon générale, un nombre important de particules de petite surface : pour les petites tailles, la courbe du nombre de particules $f(n)$ est située au dessus de celle du nombre de pixels $g(n)$. Par contre, pour les grandes tailles, la courbe du nombre de particules $f(n)$, située en dessous de celle du nombre de pixels $g(n)$, indique un petit nombre de particules de grande surface.



A05 : fourrés sur bande dunaire à texture punctiforme écartée



D29 : brousse tigrée à petites bandes



I00 : Agrégat sur chenal d'écoulement temporaire

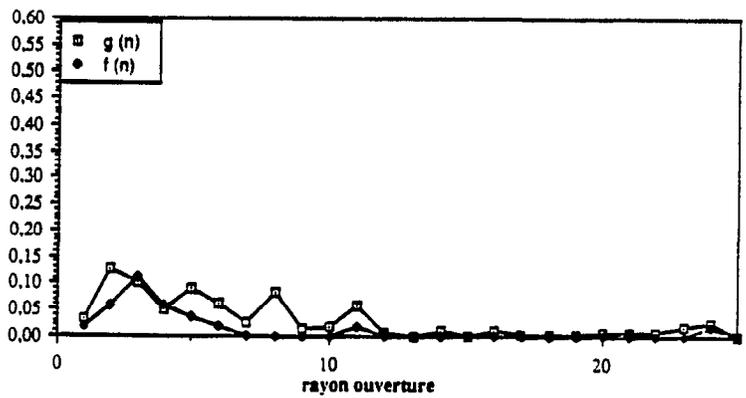


Figure 49 : Graphes des densités granulométriques en surface $g(n)$ et en nombre $f(n)$ calculées sur trois quadrats du site d'Oursi

Les ouvertures de rayon croissant calculées lors de l'analyse granulométrique, constituent les variables à partir desquelles nous mènerons l'analyse statistique des quadrats décrits par cet indice. Les variables correspondant aux ouvertures de rayon 1, 2, 3,... de la distribution de taille en surface, sont notées $G_1, G_2, G_3...$; celles de la distribution de taille en nombre : $F_1, F_2, F_3...$; celles de la densité granulométrique en surface : $g_1, g_2, g_3...$; celles de la densité granulométrique en nombre : $f_1, f_2, f_3...$

b) La covariance :

Le principe de la covariance consiste à tester la distance entre un point x_1 et un autre point x_2 sans pour autant s'intéresser à ce qui se passe entre ces deux points. Le calcul de la covariance s'effectue grâce à des érosions successives à l'aide d'un bipoint d'espacement croissant et d'orientation donnée.

Considérons l'élément structurant $B_h = \{0, h\}$, constitué par l'union des deux extrémités du vecteur $0h$ (module h , direction α) que l'on note h . Un point x de R^2 appartient à $E^h(X)$ si, et seulement si, le point x et le point $x+h$ appartiennent à X ($E^h(X)$ étant l'érodé de X par h). On aura donc ($X-h$ étant le translaté de X selon h) :

$$E^h(X) = X \cap X-h.$$

En analyse locale, le calcul de la fonction covariance $C(X, h)$ s'effectue à partir de quatre images :

- Mb_1 : l'image numérique binaire,
- Mb_2 : l'image numérique binaire translaté de h ,
- Mb_3 : le masque de mesures,
- Mb_4 : le masque de mesures translaté de h .

$$C(X, h) = \frac{\text{nombre de pixels } (Mb_1 \cap Mb_2) \cap (Mb_3 \cap Mb_4)}{\text{nombre de pixels } (Mb_3 \cap Mb_4)}$$

Le résultat du calcul de la fonction covariance est représenté à l'aide d'un covariogramme. La courbe du covariogramme traduit l'état de dispersion des particules du quadrat dans la direction étudiée :

- la valeur à l'origine du covariogramme est d'autant plus élevée que la teneur du quadrat est importante. Cette valeur indique la surface relative ou le taux d'occupation des groupements de ligneux de chaque quadrat ;
- la pente du covariogramme, pour une même surface relative, est d'autant plus forte que la structure est fine ;
- des oscillations régulières du covariogramme traduisent l'existence d'une

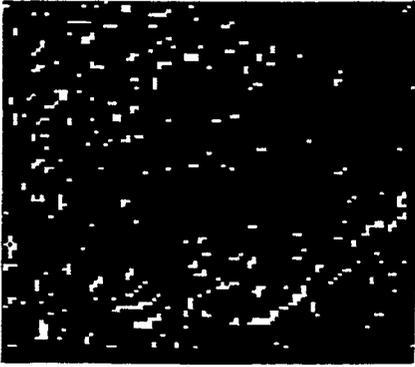
périodicité dans la structure étudiée. La hauteur et l'amplitude des oscillations indiquent respectivement le diamètre horizontal moyen des particules et la distance moyenne qui les sépare dans la direction étudiée.

Par exemple, les covariogrammes calculés sur trois quadrats de brousse tigrée du site d'Oursi, apportent les indications suivantes (Fig.50) : la valeur à l'origine de la courbe du quadrat E17, 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 forte de la courbe du quadrat D21 souligne le fractionnement plus important de cette structure par opposition au covariogramme du quadrat E17 dont la pente est plus douce. Les ondulations de faible hauteur et de faible amplitude du covariogramme du quadrat D21 indique une structure composée de petites particules peu espacées, à l'inverse des larges et hautes ondulations du covariogramme du quadrat E17 composé de gros fourrés largement espacés.

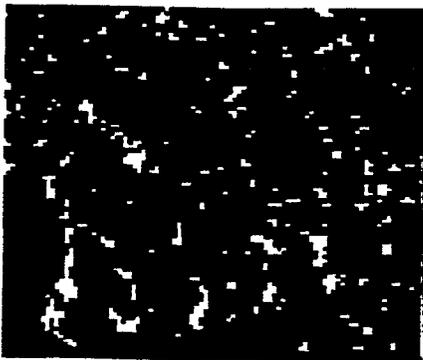
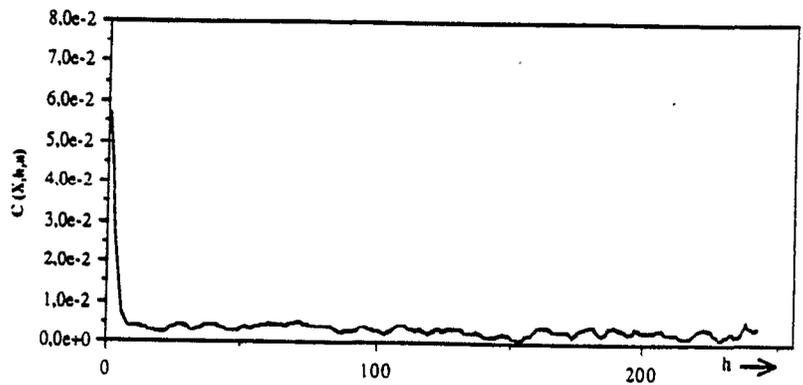
Lors du calcul de la fonction covariance sur des images de 256 sur 256 pixels de côté, 255 érosions ont été effectuées à l'aide d'un élément structurant de longueur h croissante. A chaque opération, nous obtenons la mesure du nombre de pixels éliminés du quadrat étudié par rapport au masque de mesure. Ces résultats assez lourds à manier, sont de plus difficiles à analyser à l'état brut. Pour la commodité de leur interprétation, ceux-ci ont été synthétisés à l'aide de nouvelles variables, à partir desquelles nous mènerons l'analyse statistique. Ces variables sont les suivantes :

- la valeur à l'origine ou surface relative (nombre de pixels de X / taille de la fenêtre (256/256 pixels)) (cette variable est notée sr) ;
- le nombre de pics du covariogramme ($npic$) ;
- l'amplitude (différence de valeur entre un pic et une vallée) : l'amplitude moyenne (amm) et l'écart-type de l'amplitude moyenne ($amet$) ;
- la distance (nombre de pixel entre deux pics) : la distance moyenne (dim) et l'écart-type de la distance moyenne ($diet$) ;
- l'épaisseur (nombre de pixels entre un pic et une vallée) : l'épaisseur moyenne (epm) et l'écart-type de l'épaisseur moyenne ($epet$).

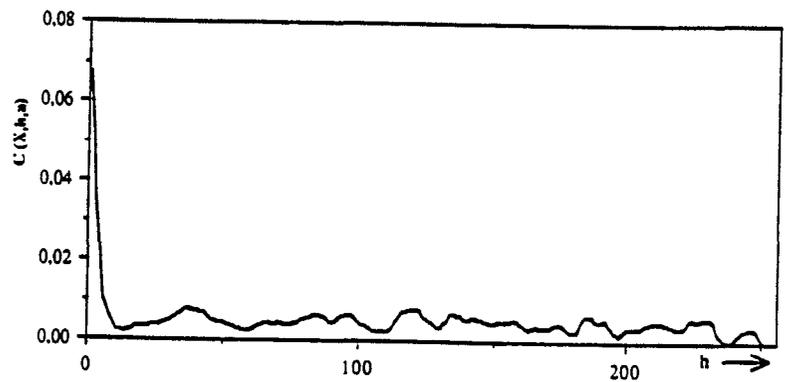
Lors de cette étude, la covariance a été étudiée uniquement dans la direction horizontale. Dans l'analyse statistique, nous complétons le calcul du nombre de pics dans la direction horizontale, à l'aide du calcul du nombre de particules au sein du quadrat (noté $nbpa$).



D21 : brousse tigrée à petites bandes



D43 : brousse tigrée à petites bandes



E17 : brousse tigrée à grandes bandes

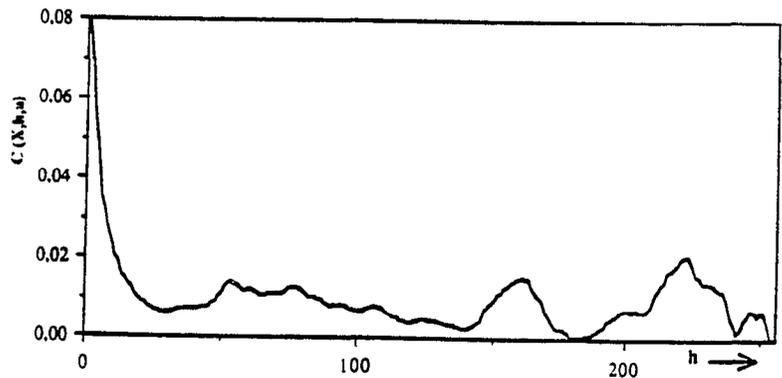


Figure 50 : Covariogrammes calculés sur trois quadrats de brousse tigrée du site d'Oursi

Une analyse complète de la dispersion des groupements de ligneux de chaque quadrat, supposerait une analyse de la covariance dans toutes les directions de la trame hexagonale. En raison de la lourdeur des traitements, celle-ci n'a pu être menée. Cependant, l'analyse de la covariance dans la direction horizontale apporte déjà une bonne caractérisation de la structure des quadrats, comme nous le verrons ultérieurement.

1.3. l'Analyse factorielle des correspondances :

L'utilisation des indices morphologiques permet dans une première étape de caractériser de façon quantitative la structure du couvert ligneux de chaque quadrat. Nous procédons ensuite à une analyse comparative des quadrats décrits par ces indices, à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances.

L'analyse factorielle des correspondances, proposée dans les années soixante par Benzécri est une méthode d'analyse des données qui permet d'étudier les relations entre des caractères (ici la taille et la dispersion) et des individus (les quadrats de structure ligneuse) dans le but de mettre en évidence des ressemblances ou des différences entre ces individus. Cette méthode d'analyse des données offre l'avantage d'opérer une analyse de la structure de la matrice des données sans hypothèse préalable.

Le principe de l'analyse factorielle consiste à résumer l'information contenue dans un tableau comportant n lignes (les individus) et p colonnes (les variables) : les n points sont décrits dans un nuage à p dimensions ; en faire un résumé, c'est projeter ces points dans un sous-espace de dimension inférieure à p . Les axes de ce sous-espace sont les axes factoriels, ou facteurs. Les axes factoriels sont déterminés de façon à rendre compte le mieux possible de la dispersion du nuage de points. Chacun des individus et des variables contribue à définir chaque facteur selon un coefficient proportionnel à l'intensité de sa relation avec le facteur. Chaque facteur est la combinaison linéaire des mêmes p variables originelles, mais la contribution de chaque individu et de chaque variable à la construction des facteurs est plus ou moins importante. Pour interpréter un axe, il convient de rechercher les individus et les variables pour lesquels l'inertie expliquée par l'axe est la plus grande : ce sont eux qui déterminent la position de l'axe, et permettent donc de lui donner un sens, en tenant compte du signe de la coordonnée sur l'axe.

Le premier axe factoriel est celui qui prend en compte le maximum d'informations, c'est l'axe de la plus grande dispersion du nuage. Le deuxième axe factoriel,

orthogonal au premier (par construction), est celui qui prend en compte le maximum d'information résiduelle. Les deux premiers axes factoriels constituent le meilleur résumé du nuage de points dans un espace à deux dimensions, un plan. Il en est de même pour le troisième axe et les suivants, orthogonaux entre eux. La quantité d'information portée par les facteurs est donc hiérarchisée (Groupe Chadule, 1986). La projection du nuage de points sur le plan défini par les deux premiers axes sera d'autant plus proche du réel (réel dans l'espace à p dimensions, donc invisible) que la proportion de l'inertie totale "expliquée" par les deux axes sera plus grande.

"Les analyses factorielles se présentent *tout à la fois* comme des algorithmes de réduction des données qui permettent de transcrire l'ensemble des informations difficilement interprétables avec le minimum de perte d'information et, comme des algorithmes de recherche des "variables cachées" ou variables structurelles, qui expliquent la configuration du phénomène analysé" (Guigou, 1973).

Des analyses factorielles des correspondances ont été menées sur les tableaux croisés des quadrats de chacun des sites (Oursi, Ferlo) et des variables de chaque indice calculé (distribution de taille en surface, distribution de taille en nombre, densité granulométrique en surface, densité granulométrique en nombre, covariance). Une analyse successive des quadrats décrits par chacun de ces indices morphologiques a été conduite pour deux raisons : premièrement, afin de tester les capacités discriminantes de chacun des indices et de comparer les informations apportées par chacun d'entre eux par rapport aux autres ; deuxièmement, en raison de la différence de nature des variables utilisées : les variables granulométriques sont de nature continue (la taille des particules est analysée à l'aide d'un élément structurant de taille croissante) et les variables de la covariance, de nature discontinue.

2. ANALYSE STATISTIQUE DE LA STRUCTURE DU COUVERT LIGNEUX SUR LE SITE D'OURSI :

2.1. L'analyse de la taille des groupements de ligneux sur le site d'Oursi :

Nous analysons successivement les A.F.C. effectuées sur les tableaux croisés des soixante dix-huit quadrats et des variables issues de chaque indice granulométrique.

Les distributions granulométriques mesurées sur les quadrats du site d'Oursi (Fig.51), couvrent 24 rayons d'ouverture pour les distributions de taille en surface et en nombre et 25 rayons d'ouverture pour les densités granulométriques. Les distributions granulométriques les plus étalées sont celles des quadrats d'agrégats sur chenaux d'écoulement temporaire. Ces quadrats sont composés de particules dont la taille est nettement plus grande que celle des autres structures des groupements de ligneux. Tels les quadrats (I00, I50) composés d'une très grosse particule de forme convexe et dont le rayon maximal correspond respectivement aux valeurs 24 et 19 du rayon d'ouverture.

a) La distribution de taille en surface :

Sur le premier plan factoriel de l'A.F.C. menée à partir des variables de la distribution de taille en surface (Fig.52), les variables sont ordonnées du plus petit rayon d'ouverture G1 au plus grand rayon d'ouverture G24. Le nuage de points est de forme parabolique. Cette configuration correspond à un "effet Guttman", bien connu en analyse des correspondances, lorsque l'on analyse une suite ordonnée a priori (Benzécri, 1973) : la distribution de taille en surface est une fonction croissante du rayon d'ouverture. L'inertie du nuage est expliquée à 87% par les deux premiers facteurs. Ces deux axes concentrent presque toute l'information.

Les variables ayant les plus fortes contributions à la formation du premier facteur sont G1 à G5. En effet, la grande majorité des quadrats ayant une distribution étalée sur les cinq premiers rayons d'ouverture, les différenciations de taille entre les quadrats sont plus importantes entre G1 et G5.

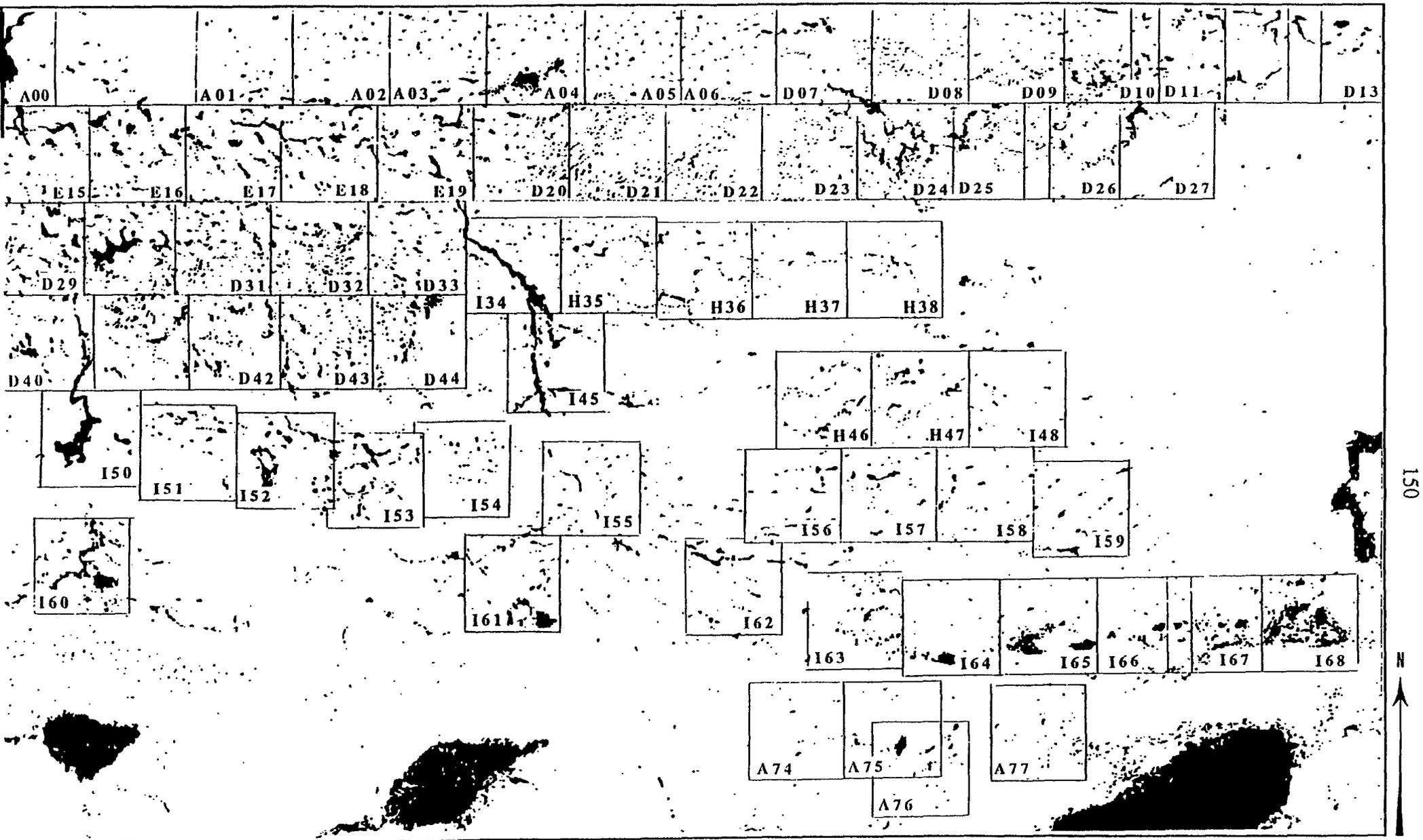
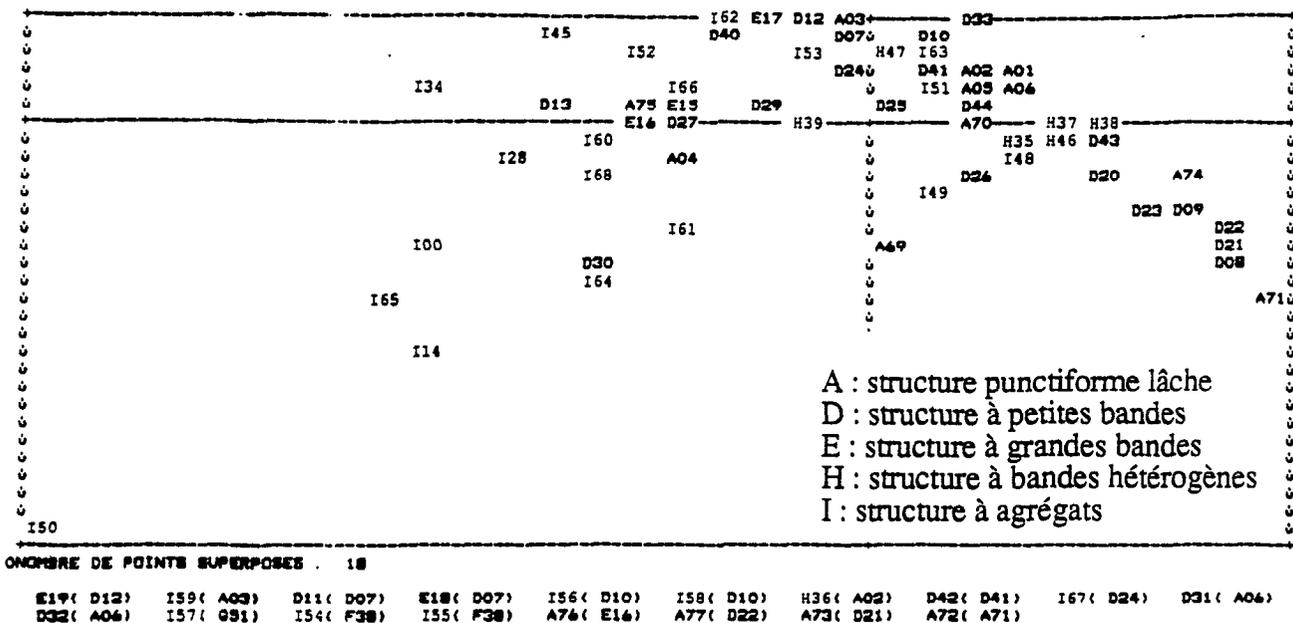


Figure 51 : Délimitation des quadrats analysés à l'aide des indices morphologiques, sur l'image des groupements de ligneux du site d'Oursi

échelle : 0 1 2 km

Nuage des quadrats



Nuage des variables

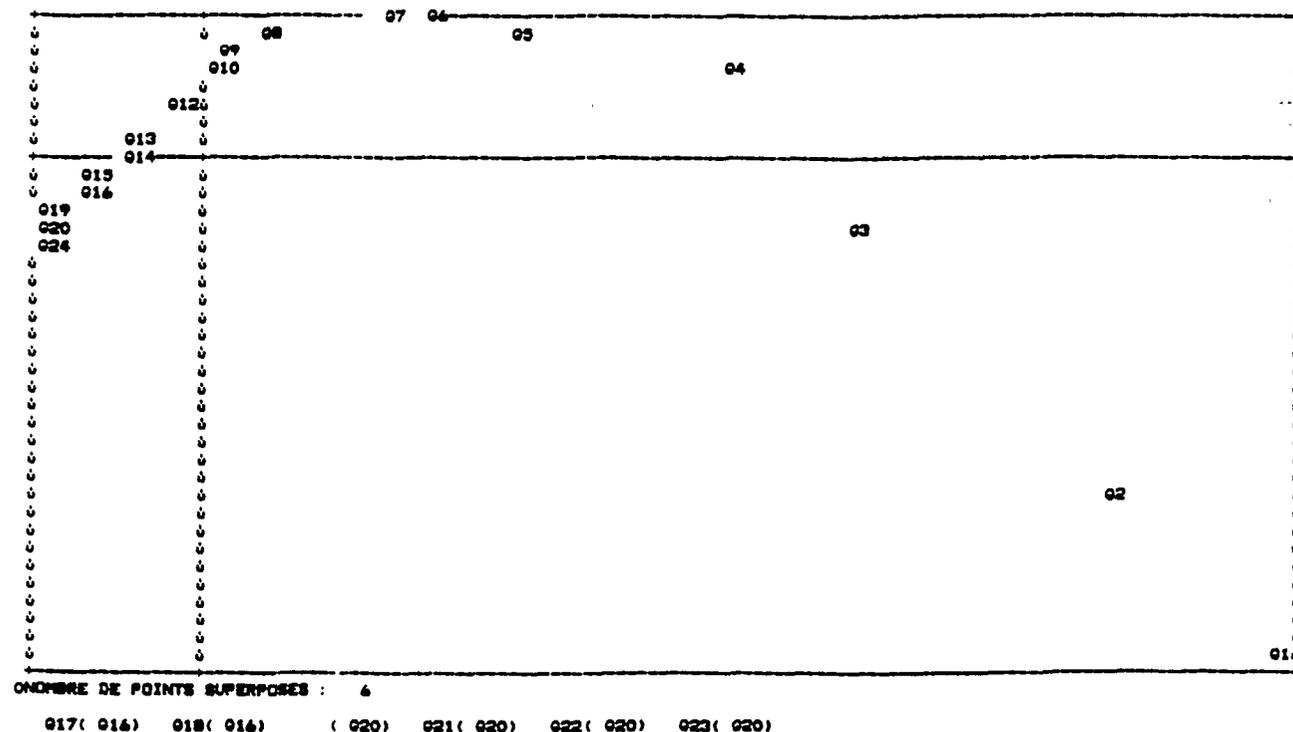


Figure 52 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site d'Oursi décrits par les variables de la distribution de taille en surface (l'inertie du nuage est expliquée à 87% par les deux premiers facteurs)

Les variables G2 et G7 ont une forte contribution sur le deuxième facteur de l'analyse de la distribution de taille en surface. La variable G7 est au sommet de la parabole des variables. Le rayon d'ouverture G7 peut être interprété comme étant la taille-seuil des quadrats contenant des particules de taille moyenne.

Sur le premier plan factoriel (Fig.52), les quadrats des différentes structures des groupements de ligneux sont répartis en fonction de la taille croissante de leurs particules. De droite à gauche, nous observons successivement :

- la majorité des quadrats de la bande dunaire méridionale et des quadrats de brousse tigrée à petites bandes situés au NE de la troisième bande dunaire (D08, D09, D20, D21, D22, D23) ;
- les quadrats de la bande dunaire septentrionale (A01, A02, A05, A06), des quadrats de brousse tigrée à petites bandes situés au NE du secteur étudié (D10, D25, D26) et au SW de la troisième bande dunaire (D31, D32, D33, D41, D42, D43, D44), des quadrats de brousse tigrée à bandes hétérogènes (H35, H36, H37, H38, H46, H47) et des quadrats de la plaine interdunaire sableuse (I48, I49, I51, I54, I55, I56, I57, I58, I63) ;
- les quadrats de la bande dunaire méridionale contenant un gros fourré (A75, A76), les quadrats de la brousse tigrée à petites bandes (D11, D12, D13, D27), les quadrats de brousse tigrée à grandes bandes (E15, E16, E17, E18, E19), les quadrats de la plaine interdunaire sableuse (I52, I53, I62, I34, I45, I66, I67) ;
- les quadrats d'agrégats sur chenaux d'écoulement temporaire (I00, I14, I28, I50, I60), les quadrats d'agrégats sur mares temporaires (I64, I65, I68) et des quadrats contenant de gros bosquets (A04, D30, I61).

b) La densité granulométrique en surface :

L'inertie du nuage de l'A.F.C. menée à partir des variables issues de la densité granulométrique en surface est expliquée à 46% par les deux premiers facteurs et à 90% par les neuf premiers facteurs. Ceci est lié à une dispersion plus forte des données : la distribution des variables par grandeur croissante n'est plus aussi rigoureuse que dans le cas de la distribution de taille en surface, en raison de seuils introduits par une ou plusieurs tailles dominantes des particules des quadrats, qui se traduisent par des pics dans les distributions granulométriques. La variable G7 est au sommet de la parabole. Sur le premier plan factoriel (Fig.53), nous pouvons distinguer quatre sous-ensembles dans le nuage de points :

- l'ensemble I, regroupant les variables g1 à g2 et les quadrats suivants :
la majorité des quadrats de la bande dunaire méridionale, des quadrats de la bande dunaire septentrionale (A01, A02, A05, A06), les quadrats de brousse tigrée à

petites bandes (D08, D09), (D20, D21, D22, D23), (D31, D32, D33, D43), les quadrats de brousse tigrée à bandes hétérogènes (H35, H36, H37, H38, H46), les quadrats de la plaine interdunaire sableuse (I48, I54, I55). Ces quadrats comportent une forte proportion de groupements de ligneux dont la taille correspond à un et deux rayons d'ouverture ;

- l'ensemble II, rassemble les variables g3 et g4 et les quadrats suivants :

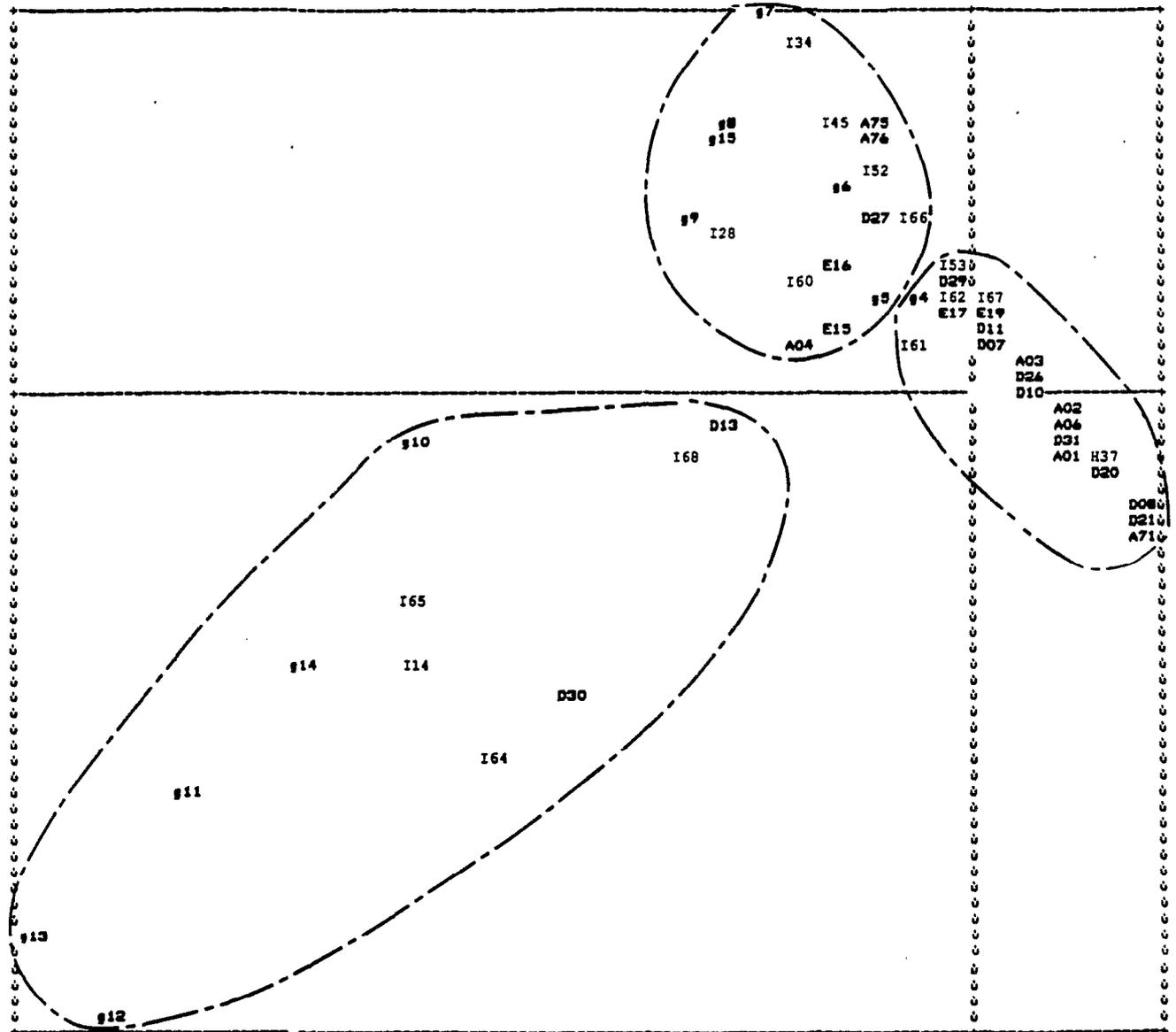
les quadrats de brousse tigrée à petites bandes (D10, D11, D12, D24, D25, D26), (D41, D42, D44), (E18, E19), les quadrats de la plaine interdunaire sableuse (I51, I56, I57, I59) ;

- l'ensemble III, rassemble les variables g5 à g9 et g15, g16 et les quadrats suivants :

deux quadrats de la bande dunaire méridionale contenant un gros fourré (A75, A76), des quadrats de brousse tigrée à grandes bandes (E15, E16, E17, D29, D40), des quadrats de la plaine interdunaire sableuse (I52, I53, I62, I34, I45, I60, I61, I66). Ces quadrats se caractérisent par une forte hétérogénéité de la taille de leur particules, tout en contenant une forte proportion de particules de taille moyenne ;

- l'ensemble IV, regroupe les variables g10 à g14 et les quadrats contenant des particules non éliminées après des ouvertures de rayon de 10 à 14 : c'est à dire les quadrats composés de gros agrégats sur chenaux d'écoulement temporaires (I00, I14, I50) et sur mares temporaires (I64, I65, I68) et des quadrats de brousse tigrée composés d'un gros fourré (D13, D30).

Les analyses de distribution de la taille et de la densité granulométrique sont complémentaires. La première est une distribution croissante et offre une bonne hiérarchisation des quadrats en fonction de la finesse de leur structure. La seconde permet de mieux caractériser chaque quadrat, en mettant en évidence des seuils, dans la variation de taille des particules pour les rayons d'ouverture supérieurs aux trois premiers rayons d'ouverture (les deux tiers des quadrats ayant une distribution s'étalant sur les cinq premiers rayons d'ouverture). Néanmoins l'analyse de la densité granulométrique sur le site d'Oursi n'apporte pas beaucoup plus d'informations par rapport à celle de la distribution de taille. Elle consiste surtout en une confirmation des résultats obtenus lors de la précédente analyse.



OMBRE DE POINTS SUPERPOSES : 50

g16 (E16)	H39 (D29)	D40 (D29)	D24 (E19)	D12 (D11)	E18 (D07)	D25 (D07)	I49 (D07)	D44 (A03)
I59 (A03)	A70 (A03)	D41 (D26)	H47 (D26)	I57 (D26)	I63 (D26)	D42 (D10)	I51 (D10)	I56 (D10)
A05 (A02)	H36 (A02)	I48 (A02)	D32 (A06)	D33 (A06)	H35 (A06)	H46 (D31)	g2 (D31)	g1 (A01)
D23 (D20)	H38 (D20)	D43 (D20)	I54 (D20)	I55 (D20)	A69 (D20)	D09 (D08)	A74 (D08)	D22 (D21)
A73 (D21)	A77 (D21)	A72 (A71)						

- A : structure punctiforme lâche
- D : structure à petites bandes
- E : structure à grandes bandes
- H : structure à bandes hétérogènes
- I : structure à agrégats

Figure.53 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site d'Oursi décrits par les variables de la densité granulométrique en surface (l'inertie du nuage est expliquée à 46% par les deux premiers facteurs)

c) La distribution de taille en nombre :

Les deux premiers facteurs de l'A.F.C. de la distribution de taille en nombre expliquent 87% de l'inertie du nuage. Les variables qui contribuent le plus à la formation du premier facteur et du deuxième facteur de la distribution de taille en nombre sont F1 (plus élevée sur le premier facteur) et F2 (plus élevée sur le deuxième facteur). La forte contribution des variables F1 et F2 met en évidence la forte proportion de petites particules (correspondant aux rayons d'ouverture 1 et 2) sur l'ensemble des quadrats. Pour l'ensemble des quadrats, le pic de la distribution de taille en nombre correspond au rayon 2 d'ouverture. En effet, le petit nombre relatif de particules convexes de grande surface à l'intérieur de l'ensemble des quadrats étudiés, influencent peu les mesures.

Sur le premier plan factoriel, les quadrats se répartissent selon la proportion de particules correspondant aux ouvertures de rayon 1, 2 ou supérieur à 2, qu'ils contiennent (Fig.54) :

- nous distinguons dans le quart NE, les quadrats contenant une forte proportion de particules de taille 1 et peu de particules de taille 2 : des quadrats de la bande dunaire septentrionale (A02, A03, A04), des quadrats de brousse tigrée (D07, D08, D10, D13, E17, E19, H39, D41, H47), des quadrats de la plaine interdunaire sableuse (I51, I56, I57, I59, I00, I14, I50, I66).
- dans le quart SE, sont regroupés les quadrats contenant une forte proportion de particules de taille 2 : les quadrats de la bande dunaire méridionale, des quadrats de brousse tigrée à petites bandes (D20, D21, D22, D23, D42, D43, D44) et des quadrats de brousse tigrée à bandes hétérogènes (H35, H36, H37, H38, H46).
- et sur la partie est du premier plan factoriel, les quadrats contenant une faible proportion de particules de taille 1 et 2 : des quadrats de la bande dunaire septentrionale (A01, A05, A06), des quadrats de brousse tigrée à petites bandes (D11, D12, D27, D29, D30, D31, D32, D33, D40), des quadrats de brousse tigrée à bandes hétérogènes (E15, E16, E18), des quadrats de la plaine interdunaire sableuse (I34, I45, I52, I53, I54, I61 à I68).

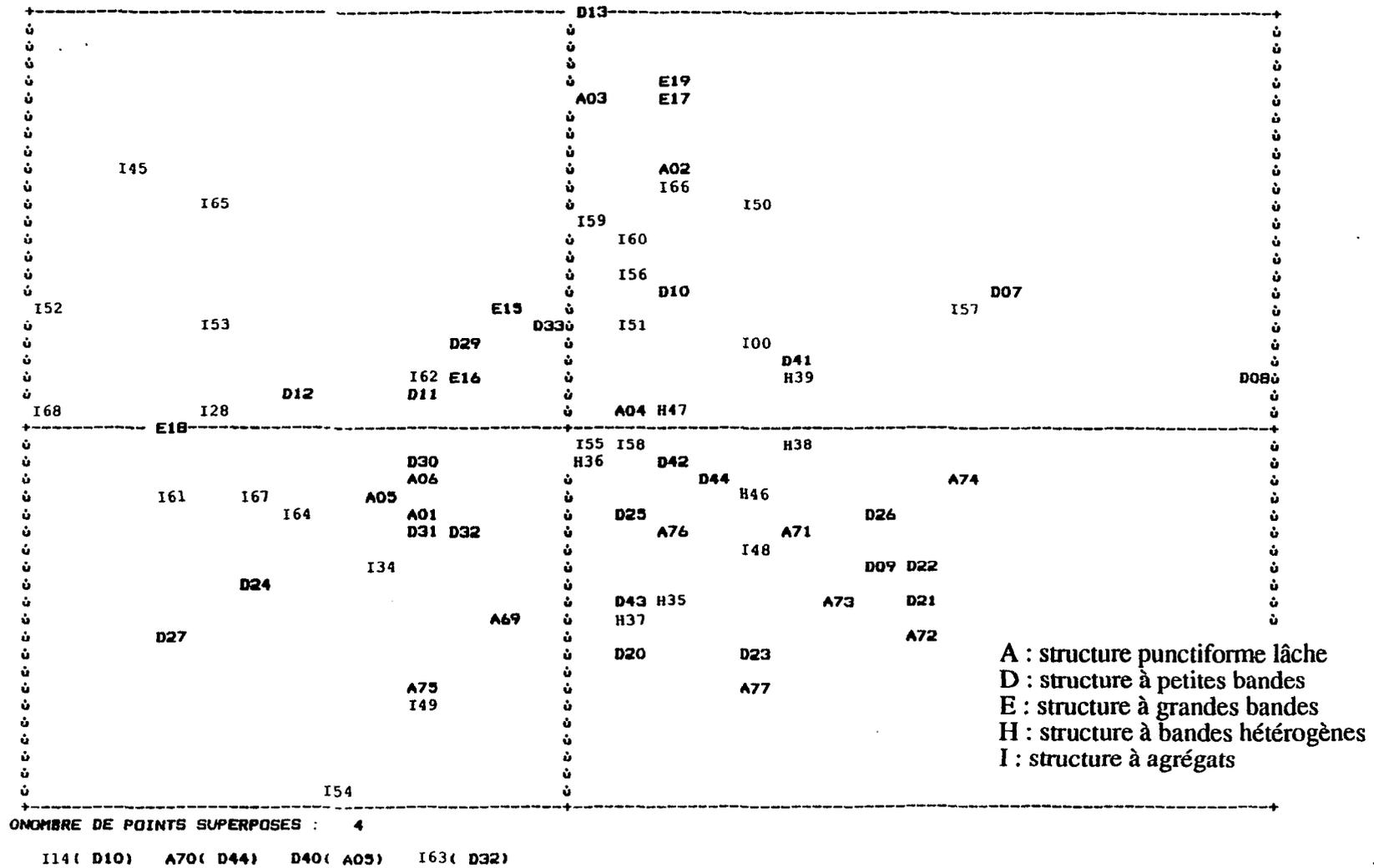


Figure 54 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site d'Oursi décrits par les variables de la distribution de taille en nombre (l'inertie du nuage est expliquée à 87% par les deux premiers facteurs)

L'A.F.C. menée à partir des variables de la densité granulométrique en nombre, fournit un résultat semblable à celui de l'A.F.C. menée à partir des variables de la distribution granulométrique en nombre, sans ajouter de nouvelles informations. Les mesures granulométriques en nombre ne permettent pas de caractériser des structures, mais font apparaître certaines nuances au sein des quadrats appartenant à une même structure. Néanmoins leur apport reste limité en raison de la forte proportion de particules de taille 1 et 2 au sein des quadrats analysés.

d) Conclusions de l'analyse de la taille des groupements de ligneux sur le site d'Oursi :

Les analyses granulométriques permettent de caractériser les structures des groupements de ligneux de la façon suivante :

- Sur les bandes dunaires :
 - les groupements de ligneux sont en général de petite taille.
 - les bosquets des quadrats de la bande dunaire méridionale sont de taille inférieure à celle des bosquets de la bande dunaire septentrionale, à l'exception des quadrats A75 et A76 contenant un gros fourré : les quadrats de la bande dunaire méridionale sont composés d'une forte proportion de bosquets de taille 1 et 2. Les quadrats de la bande dunaire septentrionale ont une distribution de la taille de leurs bosquets plus hétérogène, notamment pour les quadrats A03 et A04, composés de plus gros groupements de ligneux.
- Au sein de la brousse tigrée, plusieurs ensembles se distinguent en fonction de la taille dominante de leurs fourrés :
 - les quadrats de brousse tigrée à petites bandes situés au NE de la troisième bande dunaire D08, D09, D20 à D23 se distinguent par la petite taille de leurs fourrés. Ils contiennent une forte proportion de particules de taille 1 et 2.
 - les ensembles de quadrats de brousse tigrée à petites bandes (D10, D25, D26, D31 à D33, D41 à D44) et de brousse tigrée à bandes hétérogènes (H35 à H38, H46 et H47), situés au sud de la troisième bande dunaire, sont composés de fourrés de taille légèrement supérieure. Les quadrats (D10, D25, D26), (H35 à H38, H46 et H47) se caractérisent par une forte proportion de particules de taille 2. Sur le second ensemble, seuls les quadrats situés au sud de ce secteur (D41 à D44), compte une forte proportion de fourrés de taille 2.
 - les quadrats de la partie ouest du secteur étudié (E15 à E19, D29, D30, D40) et les quadrats situés au NE (D11, D12, D13, D27) se caractérisent au contraire par une taille moyenne à grande (D30) de leurs fourrés. La proportion de particules de taille 1 et 2 y est faible.

- La taille dominante des bosquets de la plaine interdunaire sableuse varie d'est en ouest. Les quadrats de la partie ouest étant composé en dominance par des bosquets de taille moyenne et une faible proportion de bosquets de taille 1 et 2. Par contre à l'est, les bosquets sont de plus petite taille et la proportion de bosquets de taille 1 et 2 y est élevée.
- Les agrégats sur chenaux d'écoulement temporaire se caractérisent par leur grande taille : les analyses granulométriques font ressortir une différence de taille entre les quadrats (I00, I14, I28, I50, I60) correspondant à un même axe d'écoulement et les quadrats (I34 et I45) correspondant à un autre axe d'écoulement. Ces derniers se caractérisent par une taille de bosquets légèrement inférieure. De même, les quadrats sur mares temporaires se caractérisent par la grande taille de leurs bosquets. Celle-ci varie légèrement d'un quadrat à l'autre.

2.2 L'analyse de la dispersion des groupements de ligneux sur le site d'Oursi :

L'A.F.C. a été conduite sur le tableau croisé des 78 quadrats et des variables suivantes : surface relative (sr), nombre de particules (nbpa), nombre de pics (npic), amplitude moyenne (amm), écart-type de l'amplitude moyenne (amet), distance moyenne (dim), écart-type de la distance moyenne (diet), épaisseur moyenne (epm), écart-type de l'épaisseur moyenne (epet) (cf. &1.2., partie III).

L'inertie du nuage de points est expliquée à 74% par les deux premiers facteurs. Sur l'axe horizontal du premier plan factoriel (Fig.55), les variables "nombre de particules" et "nombre de pics" s'opposent aux variables "épaisseur" et "distance". Sur l'axe vertical, les variables "amplitude" et "surface relative" s'opposent aux précédentes variables. Le nuage de points a une forme triangulaire dont les trois angles regroupent trois types de structures des groupements de ligneux, caractérisés par les trois groupes de variables précédemment distingués :

- dans le quart SE, sont rassemblés les quadrats caractérisés par un nombre de particules élevé et un nombre de pics élevé : cette caractéristique est surtout le fait des quadrats de brousse tigrée à petites bandes (D08, D09, D11, D20, D21, D22, D23, D25, D26, D33, D43) et de brousse tigrée à bandes hétérogènes (H35, H36, H46). Nous sommes en présence d'une structure composée de nombreuses particules de petite taille (l'amplitude est faible) et peu espacées (les valeurs d'épaisseur et de distance sont faibles). Le taux d'occupation de ces quadrats est plutôt faible.

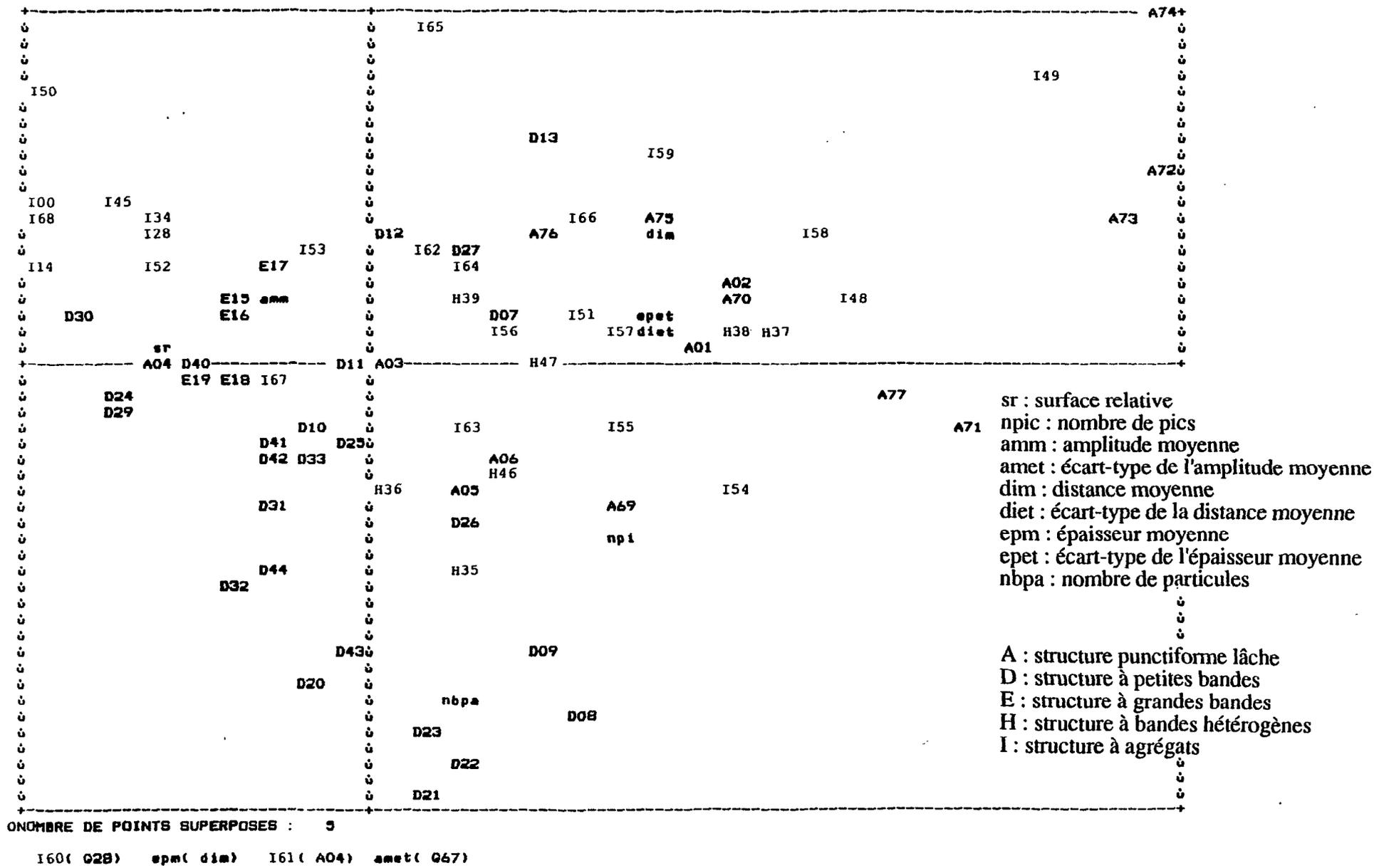


Figure 55 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site d'Oursi décrits par les variables de la covariance (l'inertie du nuage est expliquée à 74% par les deux premiers facteurs)

- dans le quart NE, sont regroupés des quadrats caractérisés par un espacement important des particules, mis en évidence par des valeurs élevées de l'épaisseur et de la distance : les quadrats de la bande dunaire méridionale et des quadrats de la bande dunaire septentrionale (A01, A02), les quadrats de la plaine interdunaire sableuse de la partie orientale et des quadrats de brousse tigrée à bandes hétérogènes (H37, H38, H39, H47). Ces quadrats se distinguent aussi par un faible taux d'occupation et un petit nombre de particules.
- dans la partie ouest du plan factoriel, sont regroupés les quadrats se caractérisant par un taux d'occupation élevé et par la présence de grosses particules (l'amplitude est élevée) : les quadrats de la bande dunaire septentrionale (A04, A05, A06), les quadrats de brousse tigrée à petites bandes situés au NE du secteur étudié (D10, D12, D13, D27) et au SW de la troisième bande dunaire (D29, D30, D31, D40, D41, D42), des quadrats de brousse tigrée à grandes bandes (E15 à E19), des quadrats de la plaine interdunaire sableuse (I52, I53) et notamment les quadrats d'agrégats sur axes d'écoulement temporaire et sur mares temporaires (I00, I68, I14, I45, I34, I50).

En fait, la mesure de la dispersion des groupements de ligneux traduit un rapport entre le taux d'occupation des groupements de ligneux sur la surface du quadrat et leur fractionnement. Le résultat de l'A.F.C. met en évidence des corrélations existant entre certaines variables : le nombre de pics et le nombre de particules, en effet, le nombre de pics du covariogramme rend compte du fractionnement de la structure dans la direction étudiée, lui même lié au nombre de particules ; l'épaisseur et la distance : la mesure de la distance entre un pic et une vallée et la mesure de la distance entre deux pics apportent des informations qui se confondent. On aurait pu attendre du calcul de l'épaisseur une mise en évidence plus fine des variations de la forme des particules.

2.3. Conclusions de l'analyse des structures des groupements de ligneux sur le site d'Oursi :

Les indices morphologiques permettent de caractériser les structures des groupements de ligneux et de mettre en évidence leurs différences. Tout d'abord, on remarque la forte proportion de petites particules au sein des quadrats du site d'Oursi. Les analyses granulométriques indiquent le rayon d'ouverture G7 comme taille moyenne des groupements de ligneux.

- Sur les bandes dunaires : les analyses morphologiques mettent en évidence des différences de structure entre la structure punctiforme des groupements de ligneux de la bande dunaire méridionale et celle des bosquets de la bande dunaire septentrionale :

- Les groupements de ligneux de la bande dunaire méridionale se caractérisent par leur petit nombre par unité de surface, la taille la plus faible parmi celles des groupements de ligneux analysés et un faible taux d'occupation. L'espacement des bosquets est important par rapport à celui des autres structures analysées (les valeurs de distance et d'épaisseur des covariogrammes sont élevées).
 - Inversement, les groupements de ligneux de la bande dunaire septentrionale se caractérisent par un taux d'occupation élevé, ils sont de plus grande taille, plus nombreux et moins espacés par rapport à ceux de la bande dunaire méridionale.
- L'analyse des structures de la brousse tigrée met en évidence de fortes variations spatiales de la taille et de la dispersion des bandes boisées :
 - Dans la partie centre-nord, au nord de la troisième bande dunaire, le faciès de brousse tigrée à petites bandes (D08, D09, D20 à D23) se caractérise par un grand nombre de particules de petite taille, peu espacées. Les quadrats contiennent une forte proportion de particules de taille 1 et 2. Leur taux d'occupation est plutôt faible.
 - Les ensembles de quadrats de brousse tigrée à petites bandes (D10, D25, D26, D31 à D33, D41 à D44) et à bandes hétérogènes (H35 à H38, H46 et H47) de la partie centrale, se caractérisent aussi par un grand nombre de fourrés mais de taille légèrement supérieure. Leur espacement est faible et le taux d'occupation reste malgré tout faible. Au sein de l'ensemble des quadrats de brousse tigrée à bandes hétérogènes (H35 à H39, H46, H47), le nombre de bandes boisées et leur espacement varient : les quadrats situés à l'ouest comportent un nombre de fourrés plus élevé que ceux situés à l'est, leur espacement va croissant à mesure que le nombre de bandes boisées décroît. Les quadrats de la partie sud de ce secteur de cet ensemble, sont composés d'une proportion plus forte de particules de taille 1 et 2, leur taux d'occupation est plus faible.
 - Les quadrats de brousse tigrée à grandes bandes (E15 à E19) et à petites bandes (D29, D30, D40) de la partie ouest du secteur étudié, ainsi que les quadrats de brousse tigrée à petites bandes situés au NE (D11, D12, D13, D27) se caractérisent par un taux d'occupation élevé et par la présence de gros fourrés (D30). La proportion de particules de taille 1 et 2 y est faible. Le nombre de fourrés au sein de ces quadrats est plutôt faible.
 - Les groupements de ligneux de la plaine interdunaire sableuse se caractérisent par une forte hétérogénéité de leur taille d'un quadrat à l'autre et par un petit nombre de bosquets largement espacés. Le taux d'occupation de ces quadrats et la taille des bosquets sont plus élevés à l'ouest qu'à l'est, à proximité des mares.

- Les agrégats sur chenaux d'écoulement temporaire et sur mares temporaires se distinguent par un taux d'occupation élevé, nettement plus élevé que celui des quadrats des autres structures des groupements de ligneux et par la taille la plus élevée. La distribution de la taille de ces quadrats est aussi la plus hétérogène, parmi l'ensemble des quadrats analysés : ces quadrats se composent d'une ou deux très grosses particules correspondant au chenal d'écoulement ou à la mare et de petites particules correspondant à des bosquets voisins.

3. ANALYSE STATISTIQUE DE LA STRUCTURE DU COUVERT LIGNEUX SUR LE SITE DU FERLO :

L'analyse de la structure des groupements de ligneux est menée sur l'ensemble des cent cinquante cinq quadrats délimités sur les trois secteurs de l'image du Ferlo (Fig.56, 57, 58). Les quadrats appartenant au secteur de Mbidi sont indiqués par la lettre M, par exemple : AM01, désigne le premier quadrat de structure punctiforme lâche (A) du secteur de Mbidi. Les quadrats du secteur de Namarel sont indiqués par la lettre N et ceux de Tessékéré, par la lettre T.

3.1. L'analyse de la taille des groupements de ligneux sur le site du Ferlo :

Les distributions granulométriques mesurées sur les quadrats du site du Ferlo couvrent 11 rayons d'ouverture pour la distribution de taille et 12 rayons d'ouverture pour la densité granulométrique.

a) La densité granulométrique en surface :

La formation des facteurs d'une première A.F.C., est fortement influencée par trois quadrats (IN13, IN39, IT30) composés de grosses particules qui ne seront pas pris en compte lors de la deuxième A.F.C.. Le nuage du premier plan factoriel (Fig.59) est de forme parabolique et les variables s'ordonnent le long de cette parabole du plus petit rayon d'ouverture au plus grand. La variable g_5 est au sommet de la parabole. L'inertie du nuage issu de la seconde A.F.C. est expliquée à 61% par les deux premiers facteurs.

Sur le premier plan factoriel, on distingue quatre classes de taille de particules occupant chacune un quart du plan factoriel :

- Sur le quart SE, sont répartis les variables g_1 et g_2 et les quadrats dont la granulométrie en surface couvre 3 à 6 rayons d'ouverture. Ces quadrats se caractérisent par un nombre important de particules dont la taille correspond au rayon d'ouverture 1 et 2. Ce sont les quadrats des bandes dunaires du secteur de Namarel (AN03, IN04, AN07, CN08, CN10, CN11, IN16, CN17 à CN20, CN24, CN25, CN40 à CN43). C'est à dire en majorité les quadrats de structure punctiforme orientée (C) ; les quadrats des bandes dunaires du secteur de Tessékéré (AT01 à AT03, AT05 à AT08, AT10, AT11) : des quadrats de structure punctiforme lâche (A) ; ainsi que des quadrats de la plaine interdunaire : les quadrats situés dans la partie NE proche du forage (CT24 à CT27, CT31, CT34),

les quadrats situés dans la partie NE de la plaine (AT41 à AT43, CT44, CT46) et les quadrats de la partie SW (BT53 à BT59). Très peu de quadrats du secteur de Mbidi (AM07, AM27, AM37) appartiennent à cette catégorie.

- Sur le quart NE, la variable g3 et les quadrats dont la granulométrie en surface couvre 5 à 7 rayons d'ouverture, composés d'un nombre de particules de taille 1 et 2 inférieur à la précédente catégorie et d'une proportion plus forte de particules de taille 3 et 4.

Ce sont les quadrats de la partie occidentale du secteur de Mbidi (AM03, AM08, AM18, AM19, AM24, AM25, AM34) ; les quadrats du secteur de Namarel situés dans des aires de contact entre deux bandes dunaires (IN09, IN15, IN21, IN22, IN23, IN26, IN35, IN36, IN37) et deux quadrats situés sur la bande dunaire septentrionale (AN01, AN02) ; les quadrats du secteur de Tessékéré situés à la périphérie des quadrats de la catégorie précédente. Cette granulométrie est principalement représentée dans la plaine interdunaire (CT32, CT35, CT36), (CT33, CT37, CT39, CT45, AT47, AT48, AT49, AT52), (BT60), qu'elle caractérise assez bien, à l'exception de la partie SE.

- Sur le quart NW, les variables g4 et g5 et les quadrats dont la granulométrie en surface couvre 5 à 8 rayons d'ouverture. Cet ensemble se caractérise par une faible proportion de particules dont la taille correspond aux rayons d'ouverture 1 et 2 et une forte proportion de particules de taille 3, 4, 5 et 6. Pour la plupart des quadrats, le pic de la distribution est en g2, certains quadrats de cet ensemble ont leur pic en g3. La distribution granulométrique de ces quadrats se compose de 1 ou 2 pics : un premier en g2 ou g3 et un second en g5, g6 ou g7.

Cette catégorie regroupe la grande majorité des quadrats du secteur de Mbidi et notamment les quadrats de la partie orientale et les quadrats de la partie SE de la plaine interdunaire (AT50, AT51, BT61, BT63, BT65, BT67, BT69, BT70, BT71). A cet ensemble, sont associés, des quadrats sur bandes dunaires de la partie orientale du secteur de Namarel (CN29, AN31, IN38) ; deux quadrats sur bandes dunaires du secteur de Tessékéré (IT04, AT09) et des quadrats appartenant au couloir interdunaire du secteur de Tessékéré (IT15, IT20, IT21, IT28).

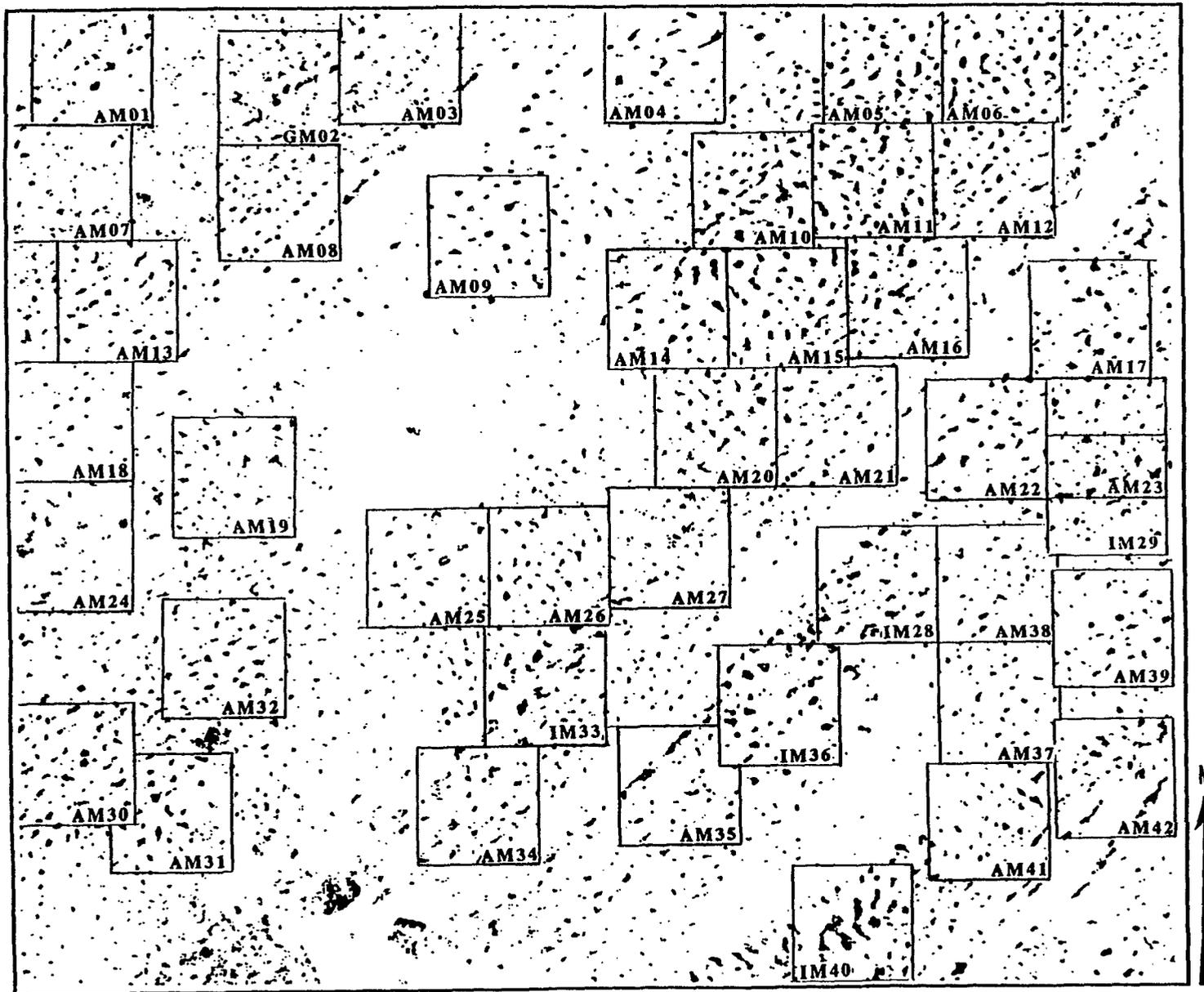


Figure 56 : Délimitation des quadrats analysés à l'aide des indices morphologiques, sur l'image des groupements de ligneux du site de Mbidi au Ferlo

échelle : 0 5 km

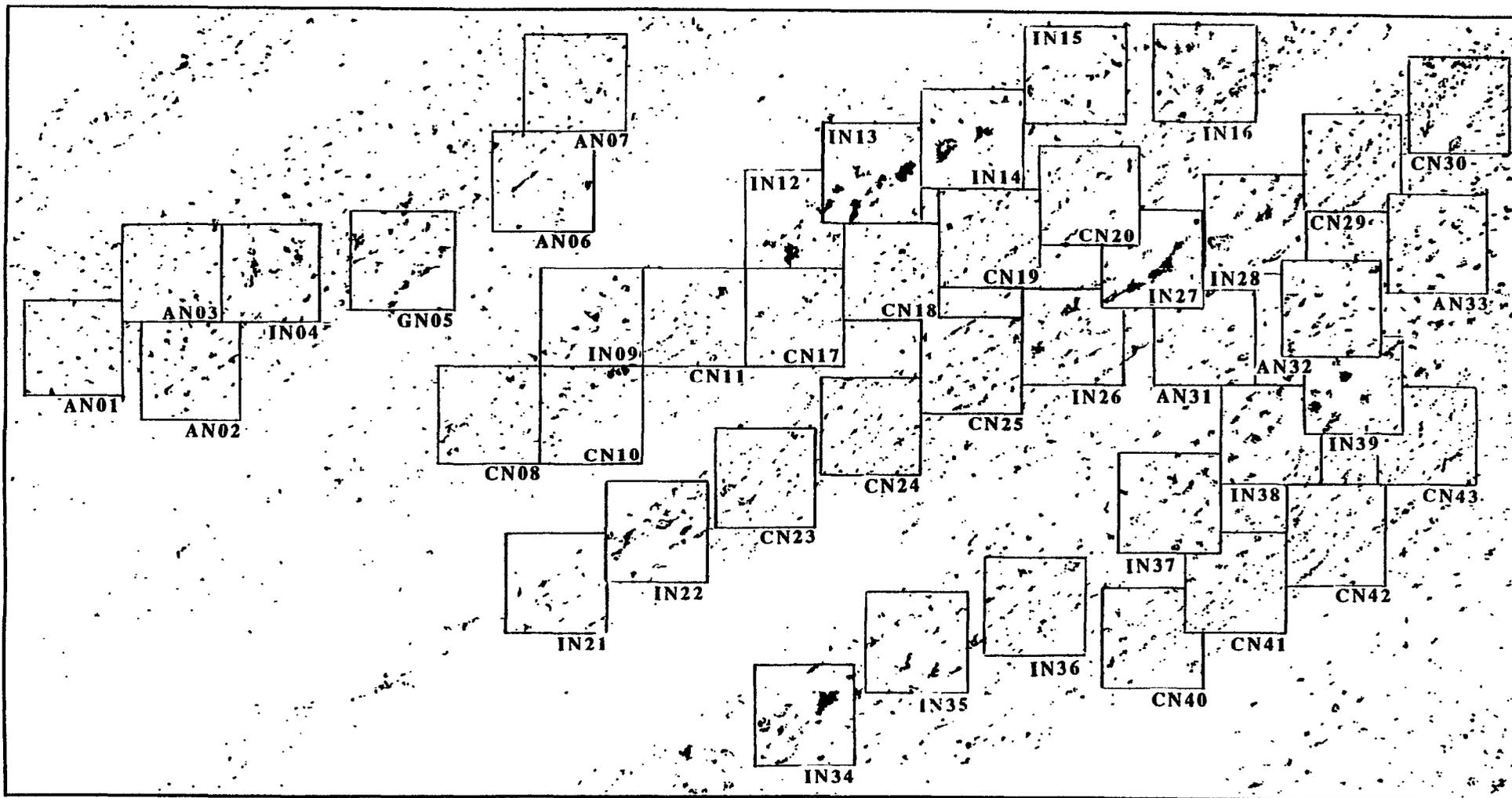


Figure 57 : Délimitation des quadrats analysés à l'aide des indices morphologiques, sur l'image des groupements de ligneux du site de Namarel au Ferlo

échelle : 0 5 km

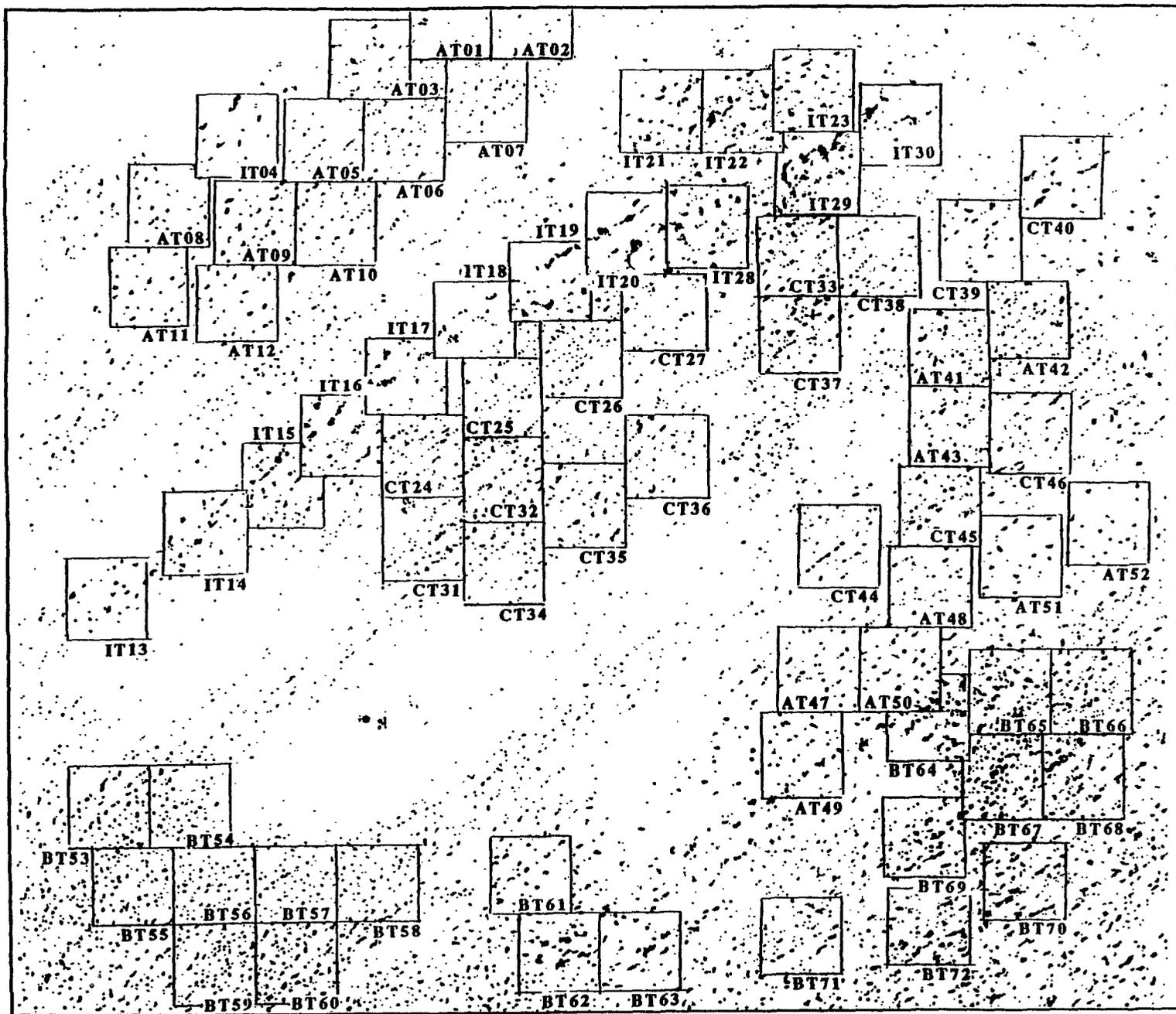
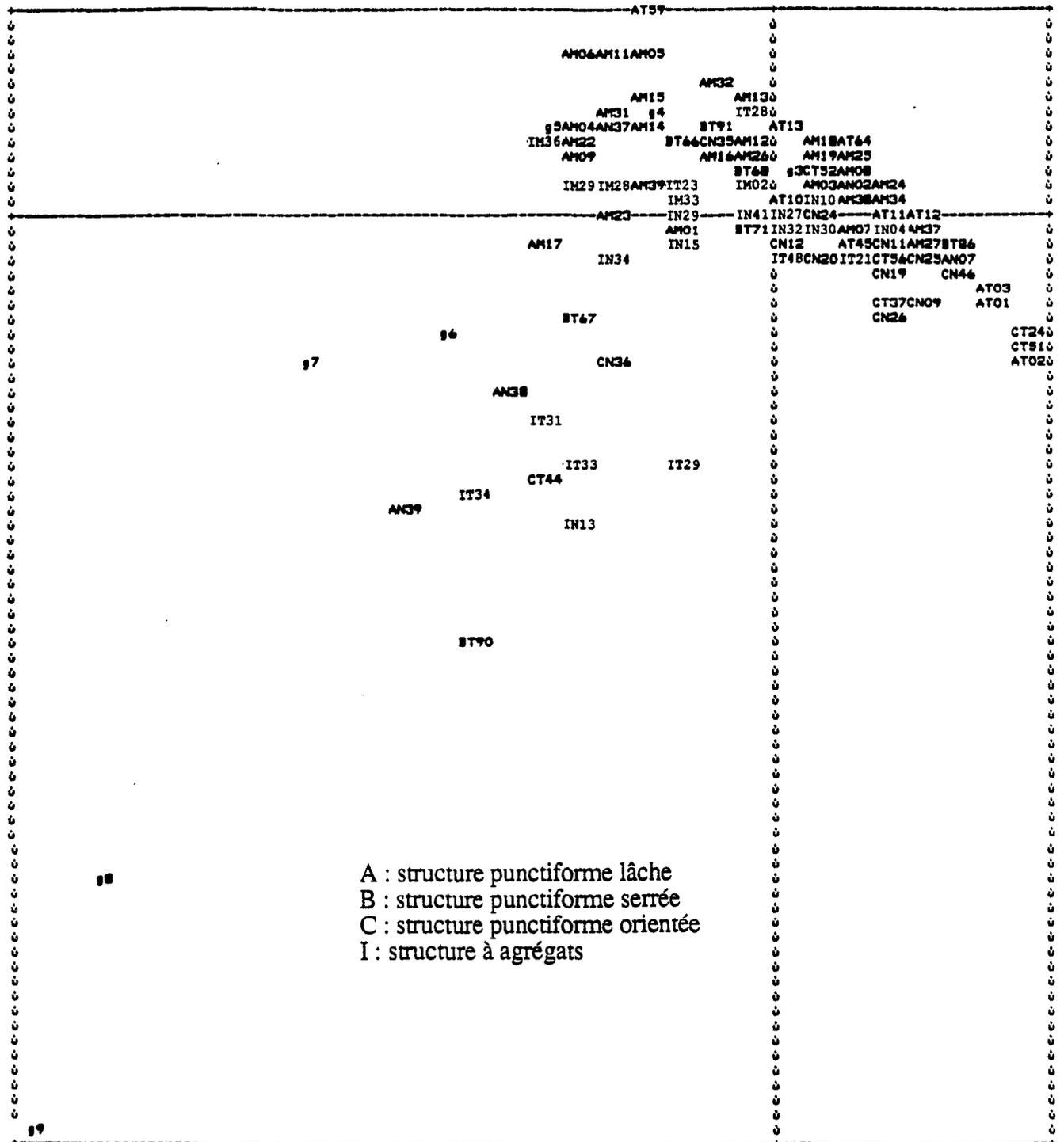


Figure 58 : Délimitation des quadrats analysés à l'aide des indices morphologiques, sur l'image des groupements de ligneux du site de Tesséké au Ferlo

échelle : 0 5 km



A : structure punctiforme lâche
 B : structure punctiforme serrée
 C : structure punctiforme orientée
 I : structure à agrégats

ONOMBRE DE POINTS SUPERPOSES : 66

AM05 (AM18)	BT80 (AM18)	IT33 (IT28)	AT60 (AT13)	AM20 (AM12)	AM10 (AM09)	AM21 (AM19)	AM30 (AM16)	AM41 (AM26)	IT32 (AM26)
CT40 (AM19)	CT57 (AM28)	BT87 (AM19)	IN31 (AM08)	IT47 (AM08)	AT61 (AM08)	IN40 (IM28)	IN17 (AM02)	IT22 (AM02)	IT30 (AM03)
CT38 (AM03)	CT43 (AM02)	AT62 (IN02)	BT69 (IN02)	BT70 (AM02)	BT92 (IM28)	AM01 (AM38)	AM06 (IM37)	IN22 (AM38)	IN40 (CN24)
IT04 (IN27)	CT50 (AT11)	CT53 (AT12)	AT63 (AT11)	BT93 (IN29)	BT93 (IN29)	BT93 (IN27)	BT93 (IN27)	BT93 (IN27)	AM03 (AM37)
AM03 (AM37)	AM08 (AM07)	CT39 (IN04)	CT49 (AM37)	BT72 (AM37)	BT78 (AM37)	BT78 (AM37)	BT78 (AM37)	BT78 (AM37)	AM05 (AM01)
CT38 (AM27)	BT75 (AM27)	BT77 (AM27)	AM43 (CN25)	AM44 (AM07)	AT35 (CN25)	BT73 (AM07)	BT73 (AM07)	BT73 (AM07)	CT36 (AM27)
IT20 (CN46)	AT46 (CN46)	BT76 (AT03)	AT05 (AT01)	CT26 (AT01)	AT07 (AT02)				AT06 (CN46)

Figure 59 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site du Ferlo décrits par les variables de la densité granulométrique en surface (l'inertie du nuage est expliquée à 61% par les deux premiers facteurs)

- Sur le quart SW, sont rassemblés les variables g6 à g9 et les quadrats dont la granulométrie en surface est la plus étalée. Leur distribution granulométrique se caractérise par 1 à 4 pics : un premier pic en g2 ou g3, et les prochains pics en g5, g6, g7, g8, g9 et g11.

Cette granulométrie en surface caractérise les quadrats des couloirs interdunaires du secteur de Namarel (IN05, IN12, IN13, IN14, IN27, IN28) et des quadrats sur bandes dunaires de la partie orientale du secteur de Namarel (CN30, AN32, AN33) ; les quadrats des couloirs interdunaires du secteur de Tessékéré contenant de gros bosquets (IT14, IT19, IT22, IT29) ainsi que des quadrats de la partie SE de la plaine interdunaire (BT62, BT64, BT68). Deux quadrats du secteur de Mbidi (AM01, AM17) sont représentés dans cette classe.

b) La distribution de taille en surface :

L'A.F.C. menée sur le tableau croisé des 155 individus et des variables issues de la distribution de taille en surface apporte des nuances supplémentaires dans la caractérisation de la distribution granulométrique des quadrats.

La formation des facteurs d'une première A.F.C. est fortement influencée par deux quadrats (IN13, IN39) correspondant à de gros groupements de ligneux dans des couloirs interdunaires. Ces quadrats sont composés de particules de grande taille et leur distribution de taille en surface est la plus étalée. Ils n'ont pas été pris en compte lors d'une deuxième analyse.

L'inertie du nuage issu de la deuxième analyse, est expliquée à 75% par les deux premiers facteurs. On retrouve un "effet Guttman" : les variables et les individus forment un nuage de forme parabolique.

Sur le premier plan factoriel (Fig.60), le nuage est subdivisé en six sous-ensembles bien individualisés. Chaque sous-ensemble regroupe les quadrats dont la taille maximale de particules correspond au même rayon d'ouverture. On distingue ainsi successivement, de droite à gauche : le sous-ensemble des quadrats dont la taille maximale de particules correspond au rayon d'ouverture 3 et 4 ; le sous-ensemble des quadrats dont la taille maximale de particules correspond au rayon d'ouverture 5 ; ... le sous-ensemble des quadrats dont la taille maximale de particules correspond au rayon d'ouverture 9.

- Sur le secteur de Mbidi, on remarque une hétérogénéité plus forte des distributions de taille des quadrats situés dans la partie centrale de l'image, de part et d'autre de la grande dune NNE-SSW (AM20, AM21, AM25, AM26, AM27, IM28, IM33, AM34,

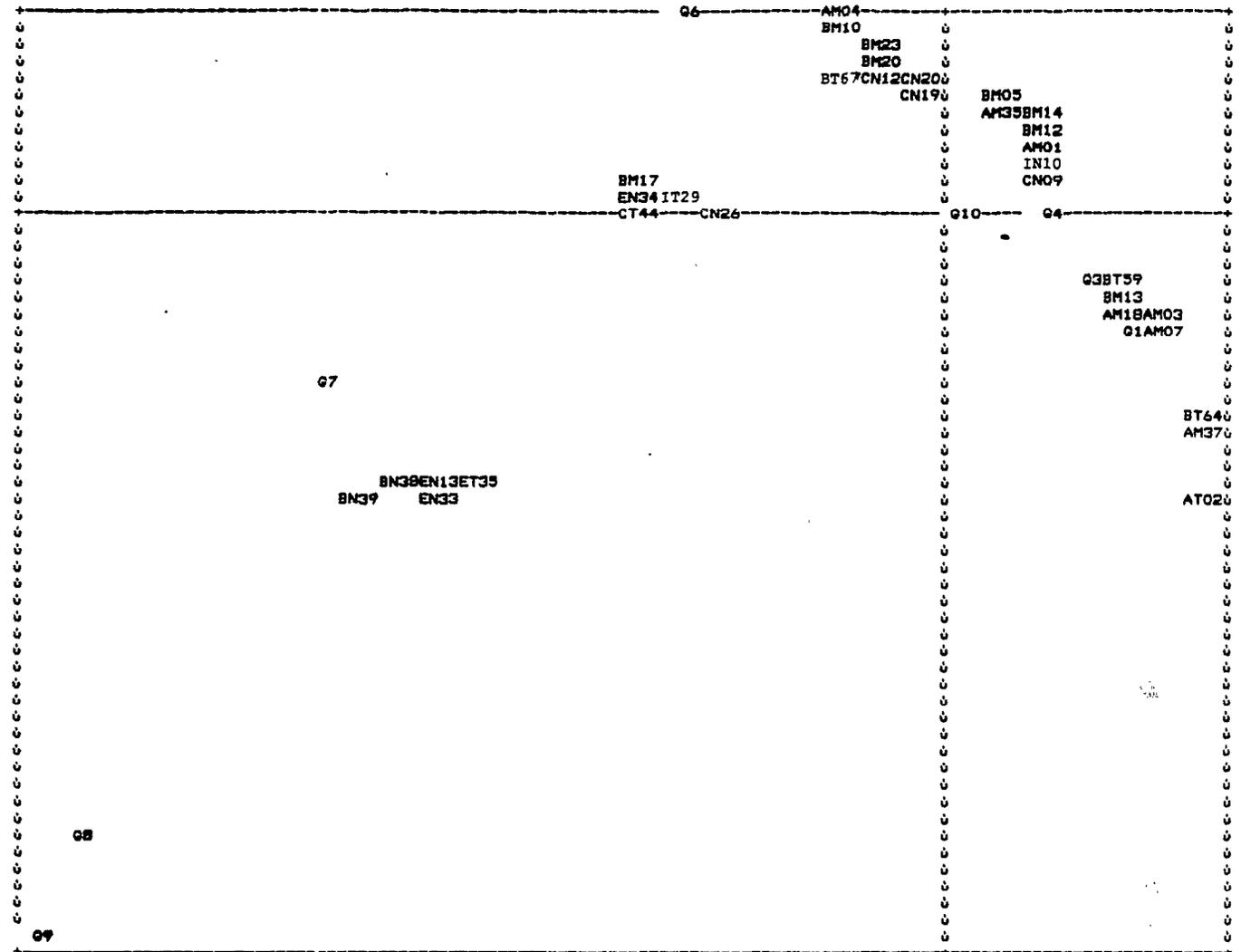
AM35, IM36, AM38). Là encore, on constate la taille plus élevée des bosquets des quadrats situés à l'est par rapport à celle des quadrats situés à l'ouest : les quadrats de la partie est ont une distribution de taille couvrant 6 et 7 rayons d'ouverture, ceux de la partie ouest ont une distribution de taille couvrant 5 rayons d'ouverture.

- Sur le secteur de Namarel, les variables de la distribution de taille en surface font apparaître des nuances dans les structures punctiformes des groupements de ligneux d'une bande dunaire à l'autre, en fonction de la taille maximale des particules. La taille maximale des bosquets est croissante depuis la bande dunaire septentrionale (les quadrats (AN01, AN02, AN03, IN04, AN07) ont une distribution de taille couvrant 4 à 5 rayons d'ouverture), à la bande dunaire méridionale (les quadrats (CN40 à CN43) ont une distribution de taille couvrant 5 à 6 rayons d'ouverture) et finalement à la bande dunaire centrale (la distribution de taille des quadrats (CN08, IN09, CN10, CN11, CN17 à CN20) couvre 5 à 8 rayons d'ouverture).

Ces nuances liées à l'étalement de la distribution de taille, ne reflètent pas exactement la ou les tailles dominantes des particules des quadrats. Les résultats apportés par le calcul de la densité granulométrique en surface sont plus intéressants.

La forte hétérogénéité de la taille des particules au sein des quadrats sur couloirs interdunaires (IN12 à IN14, IN21 à IN23, CN24, CN25, IN26 à IN28) est à nouveau mise en évidence par cette analyse. Les quadrats des couloirs interdunaires contenant de gros bosquets (IN12 à IN14, IN27, IN28) et les quadrats sur bandes dunaires de la partie orientale (CN29, CN30, AN31 à AN33) ont une distribution de taille couvrant 8 à 9 rayons d'ouverture.

- Sur le secteur de Tessékré, les quadrats sur bandes dunaires (AT01 à AT03, IT04, AT05 à AT12) se caractérisent par de courtes distributions de taille couvrant jusqu'à 6 rayons d'ouverture.



ONOMBRE DE POINTS SUPERPOSES : 122

IM36 (BM06)	BM09 (AM04)	BM10 (AM04)	BM22 (AM04)	BM31 (AM04)	EM40 (IM29)	BT66 (IM29)	IM33 (BM23)
IN05 (BM23)	CN35 (BM23)	G5 (BM23)	EN15 (AN06)	EN29 (AN06)	BT71 (BM20)	IN23 (CN12)	CN30 (CN12)
ET23 (CN12)	EN41 (CN20)	BM11 (BM05)	BM15 (BM14)	AM35 (BM14)	BM16 (BM12)	IM28 (BM12)	AM39 (BM12)
IT28 (BM12)	BM26 (IM02)	BM30 (IM02)	AM41 (IM02)	ET32 (IM02)	BT62 (IM02)	BT69 (IM02)	CN10 (AM01)
EN27 (AM01)	IT04 (AM01)	AT10 (AM01)	IT30 (AM01)	G11 (G10)	CT38 (AM01)	CT52 (AM01)	BT68 (AM01)
EN32 (CN24)	EN40 (CN24)	CN45 (CN24)	AT45 (CN24)	ET48 (CN24)	CN25 (CN11)	CN43 (CN11)	ET21 (CN11)
CT37 (CN11)	CT56 (CN11)	BN37 (EN34)	ET34 (ET31)	AM18 (BM13)	BM32 (BM13)	AT13 (BM13)	ET33 (BM13)
BT60 (BM13)	AM08 (AM03)	AM19 (AM03)	BM21 (AM03)	AM24 (AM03)	BM25 (AM03)	AM34 (AM03)	AM38 (AM03)
AN02 (AM03)	G2 (G1)	ET22 (AM03)	CT40 (AM03)	CT43 (AM03)	ET47 (AM03)	CT57 (AM03)	BT61 (AM03)
BT70 (AM03)	BM27 (AM07)	AN01 (AM07)	EN17 (AM07)	CN18 (AM07)	CN21 (AM07)	IN22 (AM07)	AN31 (AM07)
AT11 (AM07)	CT39 (AM07)	AT46 (AM07)	CT49 (AM07)	CT50 (AM07)	BT63 (AM07)	AN07 (IN04)	CN44 (IN04)
CN46 (IN04)	AT55 (IN04)	AT12 (AM37)	BT64 (AM37)	AT01 (AN03)	AT03 (AN03)	AT05 (AN03)	AT06 (AN03)
AT09 (AN03)	ET20 (AN03)	CT36 (AN03)	CT53 (AN03)	CT58 (AN03)	CN36 (EN13)	AT07 (AT02)	CT24 (AT02)
CT26 (AT02)	CT51 (AT02)						

- A : structure punctiforme lâche
- B : structure punctiforme serrée
- C : structure punctiforme orientée
- I : structure à agrégats

Figure 60 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site du Ferlo décrits par les variables de la distribution de taille en surface

(l'inertie du nuage est expliquée à 75% par les deux premiers facteurs

Dans la plaine interdunaire, les quadrats délimités dans la partie NE du village (CT24 à CT27, CT31 à CT36) ont une distribution de taille couvrant 3 et 4 rayons d'ouverture. Celle des quadrats des parties est et SW couvre 5 rayons d'ouverture. Les quadrats de la partie SW ont une distribution de taille plus étalée, couvrant 6 rayons d'ouverture et plus.

3.2. L'analyse de la dispersion des groupements de ligneux sur le site du Ferlo :

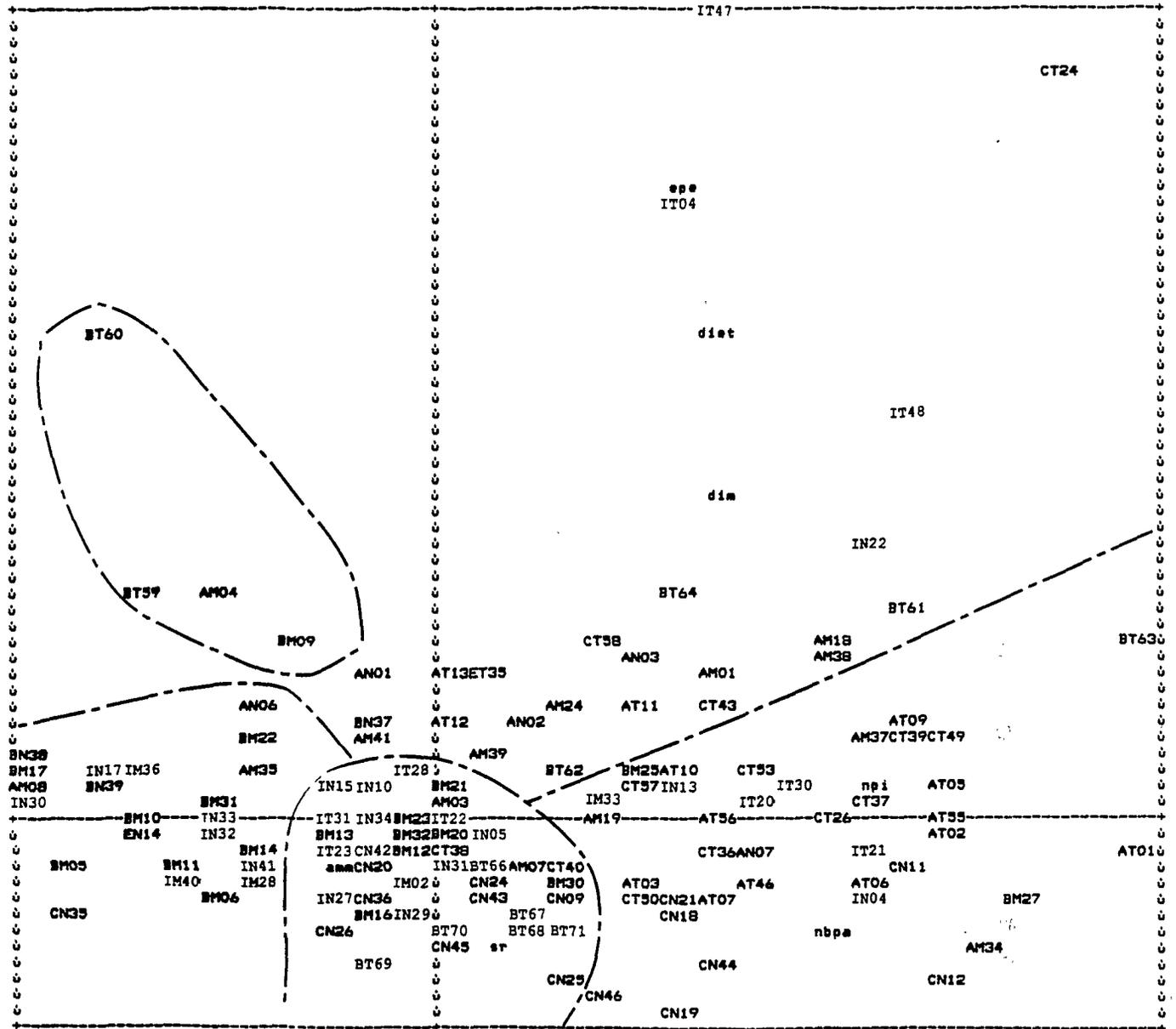
L'A.F.C. a été menée sur le tableau croisé des 155 individus et des variables suivantes : surface relative, nombre de particules, nombre de pics, amplitude moyenne, écart-type de l'amplitude moyenne, distance moyenne, écart-type de la distance moyenne, épaisseur moyenne, écart-type de l'épaisseur moyenne.

L'inertie du nuage est expliquée à 85 % par les deux premiers facteurs. Sur l'axe horizontal du premier plan factoriel, s'opposent les variables "amplitude moyenne" et "écart-type de l'amplitude moyenne", avec les variables "nombre de particules" et "nombre de pics". Sur l'axe vertical, s'opposent les variables "distance moyenne", "écart-type de la distance moyenne", "épaisseur moyenne" et "écart-type de l'épaisseur moyenne" avec les variables "surface relative", "nombre de particules", "amplitude moyenne". Au sein du nuage du premier plan factoriel (Fig.61), nous distinguons cinq sous-ensembles de quadrats :

- Dans la partie SE du plan factoriel, sont réunis les quadrats ayant les valeurs d'amplitude les plus élevées. Les valeurs moyennes de l'amplitude varient de 157 à 693 et les valeurs de l'écart-type de 192 à 570 (Tableau 4, p. 176). Cet ensemble de quadrats se caractérise par une surface relative élevée, un nombre de particules et un nombre de pics moyens et des valeurs de distance et d'épaisseur moyennes.

Ces caractéristiques traduisent une structure à taux d'occupation important, composée d'un nombre moyen de particules de grande taille et d'espacement moyen, comparativement à celle des autres groupes de quadrats. Appartiennent à ce sous-ensemble, les quadrats suivants :

- des quadrats de la partie orientale des bandes dunaires du secteur de Mbidi (AM05, AM06, AM10, AM11, AM14, AM15) et (AM17, AM22, IM28, AM35, IM36),
- les quadrats sur bandes dunaires de la partie orientale du secteur de Namarel (CN29, AN32, AN33),



ONOMBRE DE POINTS SUPERPOSES : 20

epm (dim) CT44 (AM24) CT51 (IT20) amet (BM31) IM29 (BM23) CN40 (IN34) BM26 (BM20) CN23 (IN14)
 AT45 (BM13) IT29 (IT23) IT33 (AN07) CT52 (BM12) BM15 (BM11) CT32 (AM07) CT34 (AN31) BT72 (CT50)

- A : structure punctiforme lâche
- B : structure punctiforme serrée
- C : structure punctiforme orientée
- I : structure à agrégats
- sr : surface relative
- npic : nombre de pics
- amm : amplitude moyenne
- amet : écart-type de l'amplitude moyenne
- dim : distance moyenne
- diet : écart-type de la distance moyenne
- epm : épaisseur moyenne
- epet : écart-type de l'épaisseur moyenne
- nbpa : nombre de particules

Figure 61 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site du Ferlo
 décrits par les variables de la covariance
 (l'inertie du nuage est expliquée à 85% par les deux premiers facteurs)

- des quadrats des couloirs interdunaires du secteur de Namarel (IN13, IN14, IN15, IN27, IN28) ainsi que deux quadrats correspondant au contact de bandes dunaires (IN35, IN38),
- un quadrat contenant de gros bosquets dans un couloir interdunaire sur le site de Tessékéré (IT19),
- un quadrat de la plaine interdunaire (BT63).

• Au centre du plan factoriel, sont répartis des quadrats se caractérisant par un nombre de particules et un nombre de pics élevés et les valeurs de distance et d'épaisseur les plus faibles. Les valeurs de surface relative sont élevées. Les valeurs d'amplitude sont inférieures à la précédente catégorie et supérieures aux catégories suivantes. Nous sommes en présence d'une structure à taux d'occupation élevé, parfois plus élevé que la précédente catégorie, composée de nombreuses particules de taille moyenne et peu espacées.

Cette structure est représentée parmi les quadrats suivants :

- des quadrats des bandes dunaires du secteur de Mbidi (IM02, AM03, AM07, AM13, AM30, AM31) et (AM12, AM16, AM20, AM21, AM26, AM23, IM29),
- des quadrats des deux bandes dunaires méridionales du secteur de Namarel (CN23, CN24, CN25, IN26, CN30) et (CN40 à CN43),
- des quadrats situés au contact de deux bandes dunaires sur le secteur de Namarel (IN05, CN08, CN09, IN34, IN36, IN37, IN39),
- des quadrats du couloir interdunaire de Tessékéré (IT15, IT16, IT20, IT21, IT22, IT29),
- des quadrats de la plaine interdunaire (CT33, CT35, CT37, CT41, BT55, BT58, BT60, BT62) et surtout l'ensemble des quadrats situés dans la partie SE (BT64 à BT72).

• Dans la partie SE du plan factoriel, sont regroupés les quadrats caractérisés par un grand nombre de particules et de pics, de faibles valeurs d'amplitude et de faibles valeurs de distance et d'épaisseur. Les valeurs de surface relative sont inférieures aux deux précédentes catégories. Ces caractéristiques reflètent une structure avec un taux d'occupation plutôt faible, composée de nombreuses petites particules faiblement espacées. Dans cet ensemble, sont regroupés les quadrats suivants :

- des quadrats sur bandes dunaires de la partie centrale du secteur de Mbidi (AM25, AM27, IM33, AM34, AM37),
- des quadrats des bandes dunaires septentrionales du secteur de Namarel (IN04, AN07, CN10, CN11, IN12, CN17, CN18, CN19, CN20),
- des quadrats de la bande dunaire du secteur de Tessékéré (AT01, AT02, AT05 à

AT09)

- des quadrats du couloir interdunaire du secteur de Tessékéré (IT17, IT18, IT23),
- des quadrats de la plaine interdunaire : la partie NE proche du forage (CT25, CT26, CT27, CT31, CT32, CT34, CT36, CT38) ; la partie NE (AT42, AT43, CT45, CT46, AT47) ; la partie SW (BT53, BT54, BT56, BT57, BT59).

• Dans la partie NE du plan factoriel sont répartis les quadrats caractérisés par une faible valeur de surface relative, un faible nombre de particules, de faibles valeurs d'amplitude et de fortes valeurs de distance et d'épaisseur. Ces caractéristiques définissent une structure à faible taux d'occupation, composée d'un petit nombre de particules de petite taille et largement espacées. Sont regroupés dans cet ensemble :

- des quadrats sur bandes dunaires du secteur de Mbidì (AM01, AM18, AM24, AM38, AM39, AM41),
- des quadrats de la bande dunaire septentrionale du secteur de Namarel (AN01, AN02, AN03, AN06),
- des quadrats sur bandes dunaires du secteur de Tessékéré (IT04, AT10, AT11, AT12),
- un quadrat dans une aire de contact entre deux bandes dunaires sur le secteur de Namarel (IN21),
- des quadrats du couloir interdunaire du secteur de Tessékéré (IT13, IT14, IT30),
- des quadrats de la plaine interdunaire (CT24, CT39, CT40, CT44, AT48, AT49, AT50, BT61).

• Sur la partie NW du plan factoriel, quatre quadrats se distinguent légèrement de ce précédent ensemble. Ils se caractérisent par un nombre de particules très faible, des valeurs d'amplitude moyennes et des valeurs de distance et d'épaisseur très élevées. Les valeurs de surface relative sont faibles. Ces caractéristiques indiquent une structure à faible taux d'occupation composée d'un très petit nombre de particules de taille moyenne et très largement espacées. Cette structure est rencontrée sur deux quadrats sur bandes dunaires du secteur de Mbidì (AM04, AM09) et deux quadrats de la partie est de la plaine interdunaire (AT51, AT52).

Structures du couvert ligneux	surface relative		nombre de particules		nombre de pics		amplitude moyenne		écart-type de l'amplitude moyenne		distance moyenne		écart-type de la distance moyenne		épaisseur moyenne		écart-type de l'épaisseur moyenne	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	544	1868	53	107	12	24	157	693	192	570	95	189	43	102	47	102	38	70
2	327	2296	71	146	16	27	115	318	122	319	89	147	31	77	44	72	25	51
3	211	1159	63	160	12	29	40	172	33	250	83	250	27	85	41	76	22	58
4	139	899	29	79	9	21	34	138	35	211	107	225	42	169	52	103	29	121
5	217	457	35	45	10	15	133	182	166	373	138	204	103	137	68	141	57	347

Tableau 4 : Les valeurs minimales et maximales sur chacune des variables de la covariance pour les quadrats appartenant à chacun des cinq types de structure du couvert ligneux du Ferlo discriminés lors de l'A.F.C.

(Les variables autres que le nombre de particules et le nombre de pics, ont pour unité de mesure celle de la fonction covariance multipliée par 1000)

3.3. Conclusions de l'analyse des structures des groupements de ligneux sur le site du Ferlo :

L'analyse des structures des groupements de ligneux du Ferlo à l'aide d'indices morphologiques, rend compte des différences de structure existant entre les bandes dunaires et les espaces interdunaires et permet de les caractériser.

Les analyses granulométriques mettent en évidence la petite taille des bosquets sur les bandes dunaires, à l'exception de la partie orientale du secteur de Namarel, par opposition à celle des bosquets des espaces interdunaires. La taille des groupements de ligneux des quadrats des bandes dunaires, se caractérise aussi par une certaine homogénéité, contrairement à la forte hétérogénéité de taille des groupements de ligneux constatée au sein de chaque quadrat des couloirs interdunaires : les quadrats des couloirs interdunaires se caractérisent par la présence de plusieurs classes de taille de leurs particules, et par les fortes variations de leur distribution de taille d'un quadrat à l'autre.

Les quadrats de la plaine interdunaire, à l'exception de ceux de la partie SE, ont une distribution de la taille de leurs bosquets semblable à celle des bandes dunaires. La taille des groupements de ligneux dans la plaine interdunaire varie spatialement : les bosquets situés dans la partie NE proche du forage sont de plus petite taille par rapport aux bosquets des parties NE et SW. Les bosquets de la partie SE de la plaine interdunaire se distinguent de ceux du reste de la plaine interdunaire, par une taille nettement plus élevée.

L'analyse statistique des quadrats décrits par les variables de la covariance, a permis de dégager cinq types de structure des groupements de ligneux au sein des trois secteurs étudiés sur l'image du Ferlo :



1 - structure à taux d'occupation élevé, composée d'un nombre moyen de particules de grande taille et d'espacement moyen



2 - structure à taux d'occupation élevé, composée de nombreuses particules de taille moyenne et peu espacées



3 - structure à faible taux d'occupation, composée de nombreuses petites particules faiblement espacées



4 - structure à faible taux d'occupation, composée d'un petit nombre de particules de petite taille et largement espacées



5 - structure à faible taux d'occupation, composée d'un très petit nombre de particules de taille moyenne et très largement espacées

Ces cinq types de structures sont distribués dans l'espace de la façon suivante :

- Sur les bandes dunaires, on distingue trois types de structure des groupements de ligneux :

- Sur le secteur de Mbidi, les structures des groupements de ligneux sont en majorité de types 1 et 2. Elles se caractérisent par un grand nombre de bosquets de taille grande ou moyenne et un taux d'occupation élevé. Les groupements de ligneux de ce secteur ont une taille correspondant en majorité au rayon d'ouverture 3, 4, 5 et 6. Les quadrats de la partie est du secteur de Mbidi ont dans l'ensemble, une taille de bosquets légèrement supérieure à ceux de la partie ouest. La répartition spatiale de l'un ou l'autre de ces deux types de structures, tend à se faire alternativement, selon un axe NE-SW.

Certaines aires des bandes dunaires du secteur de Mbidi dans les parties occidentales, centrales et méridionales, sont occupées par des groupements de ligneux dont la structure correspond aux types 3 et 4. Les groupements de ligneux de ces aires, peu ou très nombreux sont de petite taille, leur taux d'occupation est faible. On remarque la taille et le taux d'occupation globalement plus élevés des bosquets des quadrats du secteur de Mbidi par rapport à ceux des bosquets des quadrats sur bandes dunaires des secteurs de Namarel et de Tessékéré.

- Sur les secteurs de Namarel, à l'exception de la partie orientale, et de Tessékéré, les structures des groupements de ligneux appartiennent aux types 2, 3 et 4. Nous distinguons les bandes dunaires septentrionales du secteur de Namarel et les bandes dunaires du secteur de Tessékéré, où les groupements de ligneux se caractérisent par un taux d'occupation faible et des bosquets de petite taille. Les quadrats sont composés en majorité de bosquets de taille 1 et 2. Le nombre de ces bosquets et leur espacement varient localement.

- Sur la partie orientale du secteur de Namarel, la structure des groupements de ligneux appartient au type 1. Elle se caractérise par un taux d'occupation élevé lié à des bosquets de grande taille et d'espacement moyen. La distribution de taille de ces quadrats couvre 8 à 9 rayons d'ouverture.

- Dans les espaces interdunaires, du couloir interdunaire au simple contact entre deux bandes dunaires, tous les types de structures sont représentés, reflétant ainsi la forte hétérogénéité du taux d'occupation et du nombre de groupements de ligneux par unité de surface. La taille et le nombre des bosquets varient localement en liaison avec la largeur de l'espace interdunaire.

Au sein des couloirs interdunaires, la distribution de taille des quadrats est le plus souvent, la plus étalée parmi les structures des groupements de ligneux analysées ici, à

l'exception de quadrats du secteur de Namarel, délimités dans une aire de contact entre deux bandes dunaires. La taille majoritaire des bosquets de ces quadrats correspond au rayon d'ouverture 3 et 4.

- La structure du couvert ligneux de la plaine interdunaire appartient en majorité au type 2, puis aux types 3 et 4. La structure des groupements de ligneux de la plaine interdunaire se caractérise par une forte densité de bosquets de petite ou moyenne taille et un taux d'occupation élevé. La structure des groupements de ligneux de la partie SE de la plaine interdunaire se différencie par une forte densité de bosquets de taille moyenne et de faible espacement et un taux d'occupation élevé.

Remarques :

L'utilisation des indices morphologiques a permis de mettre en évidence les variations spatiales de la structure du couvert ligneux sur chacun des sites étudiés. Ces indices se sont avérés assez discriminants. Ils ont notamment montré l'absence de régularité des structures pré-définies dans la partie I. Dans certains cas, certaines structures ne se différencient pas entre elles, au sens de la description par ces indices (par exemple la structure à petites bandes et la structure à bandes hétérogènes de la brousse tigrée d'Oursi). Dans d'autres cas, ils ont mis en évidence des nuances au sein d'une même structure (par exemple, la structure punctiforme lâche du Ferlo).

L'une des limites de la méthode tient dans la caractérisation des formes du couvert ligneux sur des fenêtres de taille fixe. Cette contrainte introduit une certaine lourdeur dans le temps de travail. De plus, le découpage en quadrats de taille fixe, oblige à considérer toujours la même surface, quelque soit la structure analysée. La structure en agrégats des couloirs interdunaires, analysée sur une surface plus grande, se serait peut-être caractérisée par une hétérogénéité moins forte. L'analyse de la structure sur des surfaces de même taille offre l'avantage de fournir des résultats comparables. Dans le cadre de notre étude, l'unité de surface à partir de laquelle la structure est analysée, est définie en rapport avec la superficie des unités géomorphologiques distinguées sur les sites étudiés. Le choix de ce critère découle de l'analyse globale de l'organisation du paysage dunaire, dont la structure du couvert ligneux constitue le reflet.

4. MISE EN RELATION DES STRUCTURES DU COUVERT LIGNEUX ET DES CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES ET PHYSIQUES DES UNITES PAYSAGIQUES SUR LES SITES ETUDIES :

L'analyse de la taille et de la dispersion des groupements de ligneux fait ressortir les variations dans l'espace, d'une unité géomorphologique à l'autre, de la taille, de l'espacement et du taux d'occupation des groupements de ligneux. L'analyse des classifications multispectrales a permis de distinguer au sein des différentes unités géomorphologiques, des secteurs ayant des caractéristiques radiométriques semblables ou proches que nous avons appelé unités paysagiques. L'étude conjointe des résultats de ces deux analyses menées à partir des données satellitaires (morphologique et spectrale) et des données-terrain, permet maintenant de saisir les relations existant entre divers modes d'organisation spatiale du couvert ligneux et les milieux qu'il occupe.

a) Le site d'Oursi :

Le secteur dunaire d'Oursi est occupé par une succession de bandes dunaires et de plaines interdunaires où localement la cuirasse affleure.

L'analyse des classes a mis en évidence deux grands types d'unités paysagiques, les milieux sableux et les milieux cuirassés :

- Les milieux sableux se composent des bandes dunaires et des plaines interdunaires à recouvrement sableux épais. L'analyse de la structure spatiale du couvert ligneux a fait ressortir la présence d'une structure punctiforme sur les bandes dunaires et la présence d'une structure en agrégats dans les plaines interdunaires sableuses.
- Les plaines interdunaires cuirassées sont occupées par la brousse tigrée dont la structure en bandes varie localement.

Ces associations entre un environnement topo-édaphique et un type de structure du couvert ligneux montrent de nombreuses variantes d'une unité paysagique à l'autre.

- En milieu sableux :

- Sur la bande dunaire méridionale : l'organisation du couvert ligneux en petits bosquets largement espacés est associée à une classe radiométrique dont les valeurs moyennes sur les canaux bruts, sont plus faibles que celles de la classe des bandes dunaires septentrionales. Ces valeurs sont liées, nous l'avons vu, à une grande

hétérogénéité des états de surface et à la présence d'un couvert ligneux diffus composé de *Balanites aegyptiaca* et de *Combretum glutinosum*.

La bande dunaire méridionale du site d'Oursi, en raison de sa proximité des mares, subit une intense pression anthropique. Les groupements de ligneux sont plus rares et moins denses que sur les autres bandes dunaires et les ligneux poussent le plus souvent à l'état isolé. Sur le terrain en novembre 1987, nous avons observé un couvert herbacé très lâche et amplement piétiné et de nombreuses plages de sols nus. La structure spatiale du couvert ligneux traduit ici un phénomène de dégradation du couvert ligneux poussé. Le processus de contraction de la végétation ligneuse dans les bio-unités les plus favorables suites à de mauvaises conditions hydriques, semble ici dépassé ou contrarié sous l'effet du pâturage et du piétinement. La structure punctiforme lâche composée d'un petit nombre de bosquets de petite taille, est le reflet d'un couvert végétal sur bande dunaire très dégradé.

- Sur les bandes dunaires septentrionales, la distribution spatiale des ligneux en bosquets épais et plus nombreux est associée à une classe radiométrique dont les valeurs moyennes sur les trois canaux bruts sont élevées. Sur le terrain, nous avons constaté que peu de ligneux poussent à l'état isolé. La composition floristique des bosquets sur les bandes dunaires est plus diversifiée que celle des bosquets de la bande dunaire méridionale. La structure punctiforme lâche du couvert ligneux traduit un processus de contraction du couvert ligneux résultant des déficits pluviométriques des trois dernières décennies. Elle est étroitement liée au modelé dunaire.

- Dans la plaine interdunaire sableuse septentrionale, très peu de groupements de ligneux sont perceptibles sur les images satellitaires. Les valeurs moyennes élevées sur les canaux bruts de la classe occupant cette unité, proches de celles de la classe "sables vifs" indiquent une forte proportion de sols dénudés et réfléchissants. Sur le terrain, nous avons en effet constaté la forte dégradation du couvert végétal de cette région et notamment du couvert ligneux. La troisième bande dunaire aux abords de la mare de Ganadaori est colonisée par un piquetis monospécifique de *Balanites*. Les aires de brousse tigrée situées au nord et à l'ouest de cette région, sont très dégradées et ne subsistent plus que sous la forme de quelques bosquets épars. Là encore, la structure du couvert ligneux composée de peu d'éléments, telle que nous la percevons sur l'image satellitaire, est le reflet d'une dégradation importante du couvert végétal, liée à des causes anthropiques.

- La structure du couvert ligneux de la plaine interdunaire sableuse méridionale se caractérise par la présence de groupements de ligneux plus nombreux et plus épais que dans le nord, au spectre floristique plus large. La plaine interdunaire sableuse

méridionale semble constituer un milieu favorable au développement de gros groupements de ligneux. La localisation de certains de ces bosquets est liée au fonctionnement d'inféoflux et doivent leur développement à cet apport hydrique. Ils sont perceptibles sur les images satellitaires, par le biais d'une structure en agrégats ramifiés.

La plaine interdunaire méridionale est située à une distance plus grande des lieux d'abreuvement du bétail, par rapport à la bande dunaire méridionale et la partie NE du secteur sableux. A l'exception de la partie orientale, proche du cours d'eau intermittent, le Gountouré, où la dégradation du couvert végétal est plus accentuée. Celle-ci se traduit sur l'image, par un nombre et une taille de groupements de ligneux plus petits. Dans l'ensemble, la dégradation du couvert végétal liée aux activités humaines est moins intense sur cette unité.

- En milieu cuirassé :

Sur les images satellitaires classées, l'extension spatiale de la brousse tigrée est étroitement limitée aux plaines interdunaires où la cuirasse est subaffleurante et où les épandages sableux sont peu épais. L'analyse des classes radiométriques fait ressortir une certaine homogénéité spatiale des états de surface de la brousse tigrée par rapport à l'ensemble des unités du paysage. Cette unité est occupée par deux classes. Par contre, l'analyse structurale a mis en évidence plusieurs types de brousse tigrée. Nous distinguons deux faciès de brousse tigrée associés à des unités paysagiques plus spécifiques :

- La brousse tigrée située au sud de la mare de Feririlia, composée de grandes bandes boisées largement espacées : sur ce secteur, la classe "centre des plaines interdunaires cuirassées" aux valeurs moyennes les plus faibles sur les trois canaux bruts, est très peu présente. Au sol, les bandes nues sont recouvertes d'épandages sableux d'extension spatiale homogène. Cette brousse tigrée se situe sur la portion de la plaine interdunaire la plus étroite. Le recouvrement sableux semble plus épais à cet endroit, ce qui pourrait être un facteur d'explication de ce type de brousse tigrée.

- Les brousses tigrées des autres aires, composées de nombreux fourrés de taille plus petite et peu espacés : les pixels correspondant aux bandes nues les plus larges sont classés dans la classe "centre des plaines interdunaires cuirassées". Au sol, nous avons constaté que les bandes nues les plus larges, sont recouvertes de gravillons ferrugineux. Ces variations s'accompagnent de modifications de l'extension spatiale des épandages sableux recouvrant les affleurements de la cuirasse. Cette constatation nous amène à poser la question suivante : la structure à petites bandes boisées et peu

espacées est-elle liée à la présence d'épandages sableux plus épais ou l'élargissement des bandes nues favorise-t-il le départ des formations sableuses sous l'effet du ruissellement et de la déflation éolienne ?

Au sein de cet ensemble paysagique, l'une des causes des variations de faciès de la brousse tigrée est due à l'intensité de la dégradation du couvert végétal. Les bandes boisées de la brousse tigrée située à proximité de la mare de Ganadaori et du Gountouré sont peu nombreuses, mais de grande taille. Dans ce cas, la dégradation de la brousse tigrée se traduit par un élargissement des bandes nues.

b) Le site du Ferlo :

Trois unités géomorphologiques composent ce secteur sableux : les bandes dunaires, les couloirs interdunaires et dans la partie méridionale, la plaine interdunaire. Ces unités sont occupées par deux modes principaux d'organisation du couvert ligneux : un mode punctiforme sur les bandes dunaires et dans la plaine interdunaire et une structure en agrégats dans les couloirs interdunaires. L'analyse des classifications a mis en évidence la présence de trois secteurs présentant des caractéristiques radiométriques et un modelé propres : le secteur dunaire septentrional, le secteur dunaire méridional et la plaine interdunaire.

- Le secteur dunaire septentrional :

Ce secteur dunaire se compose de bandes sableuses orientées NE-SW, remodelées en système transverse, auxquelles sont surimposés des cordons dunaires orientés NNE-SSW. La topographie de ce modelé dunaire est mamelonnée.

Les classes occupant ce secteur, se caractérisent par des valeurs moyennes élevées sur les trois canaux bruts et faibles sur l'indice de végétation. Sur les images classées, leurs limites spatiales ne soulignent pas l'orientation générale NE-SW du modelé dunaire.

La structure du couvert ligneux est de type punctiforme lâche. Les groupements de ligneux sont nombreux et de grande taille par comparaison avec ceux des bandes dunaires du secteur méridional. Cette structure se caractérise par la forte hétérogénéité de la taille des bosquets. Ceci est particulièrement perceptible de part et d'autre de la grande dune de Mbidi orientée NNE-SSW.

Sur ces unités, la présence d'un couvert ligneux contracté est mis en évidence par l'association entre une structure du couvert ligneux à taux d'occupation élevé et à gros bosquets et des classes radiométriques à valeurs moyennes élevées sur les trois canaux

bruts et faibles sur l'indice de végétation. Les valeurs radiométriques élevées de ce secteur, sont liées à une couverture végétale plus clairsemée entre les bosquets. Au sol, les versants et les sommets des ondulations dunaires apparaissent très dénudés. La couverture herbacée est très lâche et le couvert ligneux diffus peu dense. Il se compose en majorité de *Balanites aegyptiaca* et *Boscia senegalensis*. La topographie mamelonnée de ce secteur favorise la croissance groupée des ligneux dans les creux intradunaires. Les groupements de ligneux épais ont un cortège floristique très diversifié. On rencontre fréquemment en leur centre, des petites mares temporaires (les vendou).

La dune orientée NNE-SSW se caractérise par l'absence de groupements de ligneux. Elle est occupée par une classe dont les valeurs moyennes sont plus faibles sur les trois canaux bruts et plus élevées sur l'indice de végétation par rapport à certaines classes des bandes dunaires de ce secteur. On remarque aussi la bonne homogénéité spatiale de la classe associée à cette dune. Au sol, cette dune est colonisée par un couvert ligneux diffus et lâche.

A cet ensemble dunaire, est associée la partie orientale du secteur de Namarel, située plus au sud, en raison de la similarité du modelé, de la structure du couvert ligneux et des valeurs radiométriques des unités paysagiques couvrant ce secteur. Ce secteur situé plus au sud bénéficie d'une pluviométrie plus importante par rapport aux régions septentrionales. Cet apport hydrique plus important se traduit par une taille des bosquets plus grande.

- Le secteur dunaire méridional :

Ce secteur est composé par une succession de bandes dunaires et de couloirs interdunaires, qui sur l'image satellitaire, s'individualisent nettement. Sur les images classées, les limites spatiales des classes soulignent nettement l'orientation NE-SW de ce modelé où les orientations transverses sont moins marquées, par rapport au secteur septentrional.

Les classes occupant les bandes dunaires ont de faibles valeurs moyennes sur les canaux bruts. Par contre, celles des couloirs interdunaires se caractérisent par des valeurs élevées sur les canaux bruts. Les valeurs moyennes sur l'indice de végétation des classes occupant les bandes dunaires, sont plus élevées que celles des classes occupant les couloirs interdunaires.

La structure du couvert ligneux sur les bandes dunaires est de type punctiforme lâche. Les bosquets sont de petite taille et peu nombreux. Celle des couloirs interdunaires est

de type agrégats. La taille et l'espacement des groupements de ligneux sont très variables.

- Sur les bandes dunaires, la structure spatiale du couvert ligneux composée d'un petit nombre de bosquets de petite taille, est associée à des classes radiométriques dont les valeurs moyennes sont plus faibles sur les canaux bruts et plus élevées sur l'indice de végétation, que celles du secteur dunaire septentrional. Ces valeurs moyennes traduisent la présence d'un couvert ligneux diffus plus important et d'une couverture herbacée continue sur ces unités, à la date de l'image. Nous avons en effet constaté sur le terrain la présence d'un couvert ligneux diffus très dense, composé des espèces suivantes : *Balanites aegyptiaca*, *Sclerocarya birrea*, *Combretum glutinosum* ... et celle de petits groupements de ligneux.

Des différences dans l'organisation du couvert ligneux apparaissent entre la partie centrale des bandes dunaires et leurs bordures. Dans la partie centrale, les ligneux ont une répartition spatiale avant tout diffuse. Sur les images classées et binarisées ne contenant plus que les pixels classés en "groupements de ligneux", très peu de bosquets apparaissent sur ces unités. Sur les bordures des bandes dunaires, des groupements de ligneux sont présents et la distribution des herbacées est moins continue, des petites plages dénudées apparaissent. Les valeurs moyennes légèrement plus élevées sur les canaux bruts de la classe occupant la périphérie des bandes dunaires, par rapport à celles de la classe du centre des bandes dunaires, sont liées à une couverture végétale plus discontinue sur ces zones bordières.

- Dans les couloirs interdunaires, la structure du couvert ligneux composée de groupements de ligneux de taille et d'espacement hétérogènes, est associée à des classes radiométriques dont les valeurs moyennes sont élevées sur les trois canaux bruts et très faibles sur l'indice de végétation. Ces valeurs sont liées aux grandes étendues de sol nu, particulièrement réfléchissantes, présentes dans cette unité topographique. Mais l'analyse radiométrique ne met pas en évidence une classe spécifique aux couloirs interdunaires. Les couloirs interdunaires, notamment sur le site de Tessékéré, sont occupés par une succession de classes différentes qui indique une forte hétérogénéité des états de surface. Cette hétérogénéité s'accompagne d'une grande variété de la taille et de la distribution spatiale des bosquets dans cette unité topographique.

- La plaine interdunaire :

La plaine interdunaire est une vaste étendue plane où l'épaisseur des épandages sableux varie localement. Cette unité topographique se caractérise par la spécificité de

ses classes par rapport aux secteurs dunaires et par la forte hétérogénéité de leur distribution spatiale. Elle est occupée par une mosaïque de classes dont les valeurs moyennes sont très proches sur toutes les variables utilisées, à l'exception des épandages sableux plus épais dont la surface est occupée par une classe unique d'extension spatiale homogène. Les classes radiométriques de la plaine interdunaire se caractérisent par des valeurs plus faibles sur les trois canaux bruts que celles des couloirs interdunaires et légèrement supérieures à celles des bandes dunaires du secteur méridional.

Le couvert ligneux de la plaine interdunaire a une structure de type punctiforme caractérisée par une relative régularité de taille et d'espacement des bosquets, notamment dans la partie SE de la plaine.

L'association entre une structure punctiforme du couvert ligneux et des valeurs moyennes faibles sur les canaux bruts et plus élevées sur l'indice de végétation met en évidence la présence d'un couvert végétal dense et localement contracté. Cette unité géographique se caractérise au sol, par une couverture végétale plus dense par rapport aux deux précédents secteurs. Le couvert ligneux diffus est particulièrement dense et le tapis herbacé bien développé.

On remarque que la relative régularité de taille et d'espacement de la structure du couvert ligneux est associée à une forte hétérogénéité de la distribution spatiale des classes, qui souligne ainsi la diversité des états de surface de la plaine interdunaire, confirmée par les mesures de réflectance faites au sol.

Des irrégularités de la structure des groupements de ligneux apparaissent en liaison avec les variations de l'épaisseur des épandages sableux. Sur les épandages sableux épais, la structure des groupements de ligneux prend une allure proche de celle des bandes dunaires du secteur dunaire septentrional.

c) Conclusions :

Sur le site du Ferlo, à l'exception des auréoles dénudées autour des forages, on ne décèle pas d'endroits où la pression anthropique est plus forte. Les effets du pâturage s'exercent de façon uniforme sur l'ensemble du paysage. La structure du couvert ligneux est ici étroitement liée au modelé dunaire. A chaque type de modelé dunaire correspond un type de structure : au modelé dunaire confus et à topographie marquée du secteur septentrional, correspond une structure punctiforme composée de gros bosquets qui indique un couvert ligneux en majorité contracté ; au modelé aplani des bandes dunaires du secteur méridional correspond une structure punctiforme

composée d'un petit nombre de bosquets et de petite taille, qui indique la présence d'un couvert ligneux diffus ; dans la plaine interdunaire, les variations de la structure punctiforme du couvert ligneux sont liées à l'épaisseur des épandages sableux.

Cette suprématie du facteur topographique est particulièrement perceptible dans la région de Namarel où, à la même latitude, deux modes d'organisation spatiale du couvert ligneux sont associés à deux modelés dunaires différents et juxtaposés : aux bandes dunaires à sommet aplani de la partie occidentale correspond un mode d'organisation du couvert ligneux en majorité diffus ; au modelé plus accentué des bandes dunaires orientées NE-SW auxquelles sont surimposés des cordons dunaires orientés NNE-SSW de la partie orientale, correspond un mode contracté.

Par comparaison, la structure du couvert ligneux sur le site d'Oursi est liée à plusieurs facteurs :

- Le facteur topographique est prépondérant sur les bandes dunaires septentrionales. La contraction du couvert ligneux se fait dans les creux intradunaires. L'influence de la microtopographie est aussi perceptible dans la plaine interdunaire méridionale où, la concentration des ressources hydriques dans les creux, favorise le développement de gros bosquets.
- Le facteur édaphique intervient dans la localisation des brousses tigrées. Celles-ci ont une extension spatiale étroitement limitée aux surfaces où la cuirasse est subaffleurante. On remarque aussi des variations de la taille des bandes boisées en liaison avec la présence des épandages sableux.
- Le facteur anthropique et les dégradations du couvert végétal qui lui sont associées à proximité des mares, sont particulièrement perceptibles dans la structure du couvert ligneux. Celle-ci se caractérise par le petit nombre et la petite taille des bosquets.

L'analyse conjointe des caractéristiques radiométriques et physiques des unités du paysage et de la structure du couvert ligneux, permet d'appréhender de quelle façon cet indicateur reflète l'état du milieu. Des associations spécifiques entre un mode d'organisation spatiale du couvert ligneux et un environnement topo-édaphique apparaissent : la structure punctiforme sur les bandes dunaires, la structure en agrégats dans les couloirs interdunaires ou encore, la brousse tigrée dans les plaines interdunaires à cuirasse subaffleurante.

Mais, une même structure du couvert ligneux ne reflète pas toujours un même état du milieu. Ainsi la structure punctiforme lâche composée d'un petit nombre de bosquets de petite taille est, sur les bandes dunaires du secteur dunaire méridional du Ferlo, le reflet d'un tapis végétal dense et diffus. Par contre sur la bande dunaire méridionale

d'Oursi, cette même structure traduit un état de dégradation poussé du couvert végétal. L'analyse conjointe des données spectrales et des données morphologiques permet alors de rendre compte de cet état.

CONCLUSION

L'analyse conjointe de la structure spatiale du couvert ligneux et des unités du paysage a été menée à partir des images Spot et des données-terrain, sur le secteur dunaire d'Oursi au Burkina Faso et du Ferlo sableux au Sénégal. Elle a donné lieu au développement d'une méthode utilisant à la fois les données radiométriques et morphologiques des images satellitaires. La caractérisation de la structure spatiale du couvert ligneux sur images Spot, à l'aide d'indices morphologiques, a mis en évidence la diversité des modes de distribution des ligneux dans des milieux dunaires différents. Cette variété des structures est en étroite relation avec les modifications dans l'espace des caractéristiques topographiques, édaphiques et hydriques des milieux occupés par les ligneux.

a) La méthode :

La méthode d'analyse des images satellitaires Spot, proposée lors de cette étude, permet :

- de caractériser les différentes formes d'organisation spatiale du couvert ligneux discontinu à l'aide d'indices morphologiques,
- d'analyser les variations spatiales de la structure du couvert ligneux en relation avec les caractéristiques radiométriques et physiques des unités du paysage qu'il occupe.

Elle comporte deux étapes :

- l'identification des grandes unités du paysage et du couvert ligneux contracté, sur images satellitaires à l'aide d'une classification non dirigée,
- la caractérisation de la structure des groupements de ligneux au sein des grandes unités du paysage, à l'aide d'indices empruntés aux méthodes de la morphologie mathématique.

A l'issue de ces deux étapes, l'analyse conjointe des structures du couvert ligneux et des caractéristiques radiométriques et physiques des unités du paysage, permet de procéder à une interprétation des variations de la structure spatiale du couvert végétal.

- L'identification des unités du paysage et des groupements de ligneux est obtenue à l'aide d'une classification multispectrale non dirigée. Le choix de cette démarche s'explique par la forte variabilité spatiale et temporelle des états de surface dans les régions étudiées, qu'il nous est apparu difficile de recenser de façon exhaustive dans le cadre d'une démarche dirigée.

Des classifications en nombre croissant de classes ont été effectuées à l'aide de la méthode des centres mobiles. La comparaison successive des images classées permet de reconnaître au sein de l'image, les surfaces se distinguant par un comportement spectral propre. Les données satellitaires mettent en évidence les nuances spatiales des états de surface des unités du paysage. Leur caractérisation est obtenue à l'aide de l'analyse de données radiométriques sur images, de mesures radiométriques au sol et des données-terrain.

Lors des classifications en nombre croissant de classes, le nombre de pixels classés en ligneux varie d'une image classée à l'autre. Le nombre de classes à calculer pour obtenir l'image offrant la meilleure représentation du couvert ligneux, est déterminé à l'aide d'une comparaison des images classées avec d'autres images : dans le cas d'Oursi, il s'agit de photographies aériennes et dans le cas du Ferlo, d'une image satellitaire d'une autre date.

- La caractérisation des formes du couvert ligneux est effectuée sur des fenêtres de taille fixe, à l'aide d'indices morphologiques. La taille des fenêtres a été choisie en fonction de la surface minimale des unités géomorphologiques distinguées sur les sites étudiés. Ces indices fournissent des résultats comparables quel que soit le type de structure analysé. Lors de l'analyse comparative des quadrats décrits par ces indices, effectuée par l'analyse factorielle des correspondances, ceux-ci se sont avérés assez discriminants. Leur utilisation a permis de dégager une typologie des structures du couvert ligneux sur les sites étudiés et d'analyser leurs variations spatiales.

Les apports de cette méthode sont les suivants :

- l'obtention de données quantifiées à propos de la structure spatiale d'un tapis végétal discontinu,
- sa reproductibilité : l'automatisation de cette méthode pourrait être envisagée. On devine ici l'intérêt d'appliquer ces algorithmes pour obtenir des informations quantifiées comparables d'une région à l'autre et /ou d'une date à une autre,
- une analyse du paysage basée sur l'étude des caractéristiques radiométriques et physiques des milieux et sur celle des variations de la structure spatiale du couvert ligneux. Cette analyse conjointe permet de saisir des facteurs de la distribution dans l'espace des ligneux en milieu dunaire sahélien.

b) Les résultats et les apports thématiques de cette recherche :

L'analyse des images satellitaires a permis de mettre en évidence les grandes lignes du modelé dunaire de chacun des sites. L'analyse de la structure spatiale du couvert ligneux sur les images Spot, met en évidence une certaine spécificité de son organisation, en fonction de l'unité géomorphologique (bandes dunaires, espaces interdunaires). Cette organisation spatiale en milieu dunaire est liée à plusieurs facteurs : la topographie, la pluviométrie, le bilan hydrique, le stress anthropique.

• *La topographie* constitue le facteur prépondérant de la distribution spatiale des ligneux en milieu dunaire :

Sur le site du Ferlo, la structure du couvert ligneux sur les bandes sableuses, est étroitement liée au modelé. Deux modelés ont été distingués :

- Le modelé du secteur septentrional composé de bandes dunaires orientées NE-SW, remaniées par un système transverse, auxquelles sont localement surimposés des cordons dunaires orientés NNE-SSW : de cette juxtaposition d'orientations, résulte un modelé mamelonné colonisé par un couvert ligneux en grande partie, contracté dans les creux intradunaires.
- Le modelé du secteur méridional composé de bandes dunaires orientées NE-SW aux sommets aplanis : ces bandes sableuses sont recouvertes d'un couvert ligneux en majorité diffus.

L'influence du facteur topographique est aussi perceptible dans les couloirs interdunaires du Ferlo, où le développement des bosquets est lié à la largeur de ces unités. Aux couloirs interdunaires les plus larges, correspondent les bosquets les plus étendus. Ceux-ci se développent dans des dépressions, selon un axe parallèle à celui des orientations dunaires dominantes. D'autre part, dans les couloirs interdunaires caractérisés par une topographie très plane, la microtopographie est un facteur important de la distribution spatiale des ligneux. Dans cette unité topographique, le couvert ligneux à un mode de distribution en dominance contracté. Les groupements de ligneux se développent souvent autour des mares temporaires recueillant les eaux de ruissellement, dans les microdépressions.

Dans la plaine interdunaire du site du Ferlo, l'organisation spatiale des ligneux varie en étroite relation avec l'épaisseur des épandages sableux. La structure caractéristique de cette unité topographique est de type punctiforme serrée. Sur les épandages sableux plus épais, le couvert ligneux a une structure punctiforme lâche proche de celle des bandes dunaires.

En milieu dunaire, les nuances de structure du couvert ligneux perçues sur l'image, rendent compte des différences de modelés et de leurs limites : la superposition d'un modelé en bandes et d'un modelé transverse, la succession de bandes et de couloirs,... De même, les variations de l'épaisseur des épandages et placages sableux, introduisent des irrégularités dans la distribution spatiale du couvert ligneux.

La structure du couvert ligneux est un révélateur du modelé dunaire.

- Dans le Ferlo, sur cette topographie dunaire, joue un *facteur pluviométrique*. Grâce à des pluies plus importantes au sud qu'au nord, la partie méridionale est occupée par un couvert ligneux plus dense et plus diffus par rapport à celui de la partie septentrionale. L'influence du gradient climatique est aussi perceptible à l'est de ce secteur, où la structure punctiforme du couvert ligneux se distingue par une taille plus grande des bosquets, par rapport à celle des bosquets du secteur dunaire septentrional.

- *Le support édaphique* : sur le site d'Oursi, la brousse tigrée colonise les plaines interdunaires à affleurements cuirassés. Dans ce cas, la structure du couvert ligneux est le reflet d'un environnement topo-édaphique spécifique. L'analyse des propriétés radiométriques du paysage sur les images satellitaires, a montré l'étroite relation existant entre l'extension spatiale de la brousse tigrée et les surfaces cuirassées sur ce site. De même, une relation apparaît entre la taille des bandes boisées et le substrat : les bandes boisées les plus étendues et les plus espacées occupent les aires où la cuirasse est subaffleurante. Par contre, les fourrés de petite taille et peu espacés colonisent les aires où les épandages sableux sont les plus épais.

- *Le bilan hydrique* : en milieu sableux, la concentration des eaux et des éléments fins dans les points bas de la topographie, sous l'effet de la gravité et du ruissellement, favorise la croissance des groupements de ligneux dans les creux intradunaires et dans les espaces interdunaires. La concentration des eaux dans les espaces interdunaires et la constitution de mares temporaires, permet le développement de gros groupements de ligneux. Cette concentration des ligneux dans les creux intradunaires se traduit en vue verticale, par un couvert contracté. La présence d'une discontinuité dans le couvert ligneux en milieu dunaire indique une adaptation à un stress hydrique. L'effet climatique est parfois exacerbé par un effet anthropique, comme dans le cas d'Oursi.

- *L'exploitation anthropique* : sur le site d'Oursi, la dégradation du couvert végétal sur la bande dunaire méridionale, proche des mares temporaires, est directement perceptible dans la désorganisation de la structure du couvert ligneux : les groupements de ligneux sont rares et de petite taille. Les bandes dunaires situées plus

au nord et à une distance plus grande des lieux d'abreuvement pour le bétail, sont occupées par un couvert ligneux contracté, constitué de bosquets plus nombreux et de taille plus grande. On observe la même dégradation du couvert végétal dans les parties orientales et méridionales des plaines interdunaires, à proximité des mares. Cette dégradation se traduit dans ces unités, par une diminution de la taille et du nombre des groupements de ligneux d'est en ouest.

La structure spatiale du couvert ligneux rend compte de la complexité du terrain et du fonctionnement du milieu sahélien, résultant des divers facteurs cités ci-dessus. La variété des structures du couvert ligneux observés sur ces deux sites, reflète les grandes capacités d'adaptation des individus dans des milieux soumis à des variations brutales des ressources hydriques. Ces capacités d'adaptation défient toutes les lois de généralisation, les mêmes espèces n'ayant pas le même comportement en fonction de leur localisation et de leurs capacités de réponse à un stress (climatique ou anthropique). La structure du couvert ligneux, perçue en vue verticale sur les images satellitaires, constitue bien un indicateur de l'état du couvert végétal et de son mode d'exploitation dans ces milieux, en rendant compte de cette variété des situations et des comportements.

c) Bilan et perspectives :

L'analyse structurale du couvert ligneux et l'analyse radiométrique des unités du paysage, mettent en évidence des associations entre des modes d'organisation spatiale du couvert ligneux et un environnement topo-édaphique. Les variations de la structure du couvert ligneux sont étroitement liées aux caractéristiques topographiques, édaphiques et hydriques des milieux. Un changement de structure est le reflet d'une modification des caractéristiques physiques du milieu. Mais une même structure peut être le reflet d'environnements très différents. Par exemple, la structure punctiforme composée d'un petit nombre de bosquets et de petite taille qui occupe les bandes dunaires méridionales du Ferlo, correspond à un couvert ligneux dense et diffus. Par contre, la présence d'une structure assez similaire sur la bande dunaire méridionale du site d'Oursi, traduit un état très dégradé d'un couvert végétal trop exploité.

L'analyse des caractéristiques radiométriques et physiques des unités du paysage est le complément indispensable à l'analyse de la structure du couvert végétal pour tenter de saisir le fonctionnement de ces milieux.

Cette méthode ouvre le champ à de nombreuses possibilités d'étude des relations

existant entre l'organisation spatiale du couvert végétal et le milieu qu'il occupe, en divers régions où le couvert végétal se caractérise par son aspect discontinu.

Elle offre la possibilité d'analyser les structures spatiales des couvertures végétales dans différents milieux et de reconnaître des formations végétales par le biais de leur structure, telles que la brousse tigrée. Dans la région d'Oursi, on a observé des variations de la structure de la brousse tigrée en liaison avec la nature du substrat topo-édaphique : l'épaisseur des épandages sableux, l'affleurement de la cuirasse. On pourrait alors vérifier si les types de structure de la brousse tigrée observées sur le site d'Oursi correspondent à un même substrat en d'autres régions et analyser leurs variations par rapport à leur environnement. Cette analyse comparative permettrait alors : de mettre en évidence les diverses manifestations des processus à l'origine de ce type de végétation et ainsi de mieux connaître les règles de son installation et de son fonctionnement ; et de distinguer les facteurs invariants qui expliqueraient la présence de ce type de végétation dans cet environnement bio-climatique.

Enfin l'analyse de l'organisation spatiale de la végétation à l'aide de cette méthode, peut être le point de départ d'autres types d'analyses. Lors de cette étude, on a constaté que sur de mêmes unités (bandes dunaires du site d'Oursi), des modifications de la structure s'accompagne de changements dans la composition floristique du couvert ligneux. La mise en évidence des structures spatiales du tapis végétal sur images satellitaires peut donné lieu à des études au sol, portant sur le contenu des formes mises en évidence sur image (composition floristique, état physiologique et phénologique ...).

Cette méthode apporte des données quantifiées à propos du couvert végétal et la mise en évidence des composantes physiques du fonctionnement des milieux sahéliens. L'utilisation des images satellitaires permet de l'appliquer sur de grands espaces. L'application de cette méthode peut être envisagée pour des études de suivi de l'état du milieu, de surveillance de l'exploitation pastorale dans le cadre de projets de protection de ces milieux.

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

(clichés de C. Jacqueminet)

- Photo 1 : Bosquet sur la bande dunaire septentrionale du site d'Oursi (novembre 87)37
- Photo 2 : Bosquet sur la bande dunaire méridionale du site d'Oursi (novembre 87)37
- Photo 3 : Brousse tigrée à petites bandes boisées serrées sur la troisième plaine interdunaire du site d'Oursi (novembre 87).....39
- Photo 4 : Brousse tigrée à grandes bandes boisées largement espacées sur la troisième plaine interdunaire du site d'Oursi (novembre 87).....39
- Photo 5 : Couvert ligneux diffus sur bande dunaire au nord du village de Tessékéré dans le Ferlo (*Sclerocarya birrea* au premier plan) (décembre 1988).....48
- Photo 6 : Bosquet de *Balanites aegyptiaca* dominant sur bande dunaire au nord du village de Tessékéré dans le Ferlo (janvier 1990).....48
- Photo 7 : Bosquets de *Calotropis procera* dominant sur bande dunaire au SE du village de Mbidi dans le Ferlo (janvier 1990).....49
- Photo 8 : Bosquet au spectre floristique diversifié sur bande dunaire entre les villages de Mbidi et Ganine dans le Ferlo (décembre 1988).....49
- Photo 9 : Bosquet au spectre floristique diversifié dans un couloir interdunaire à l'est du village de Ganine dans le Ferlo (janvier 1990)51
- Photo 10 : Le vendou Tessékéré au sud du village de Tessékéré dans la plaine interdunaire du Ferlo (janvier 1990).....51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Définitions de la nature des données satellitaires (Cassenet, 1985).....	26
Tableau 2 : La moyenne de l'indice R calculé sur les différentes fenêtres-test du site d'Oursi pour chaque partition à k classes	119
Tableau 3 : La moyenne de l'indice R sur les images classées de 7 à 17 classes du site d'Oursi pour chaque fenêtre-test	121
Tableau 4 : Les valeurs minimales et maximales sur chacune des variables de la covariance pour les quadrats appartenant à chacun des cinq types de structure du couvert ligneux du Ferlo discriminés lors de l'A.F.C.	176

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les limites spatiales du domaine sahélien (Courel, 1984).....	10
Figure 2 : La répartition des bandes boisées de la brousse tigrée par rapport à la pente (Ambouta, 1984).....	16
Figure 3 : Séquence modale du faciès brousse tigrée (Ambouta, 1984)	16
Figure 4 : Evolution mensuelle de l'état foliaire de quelques ligneux de la zone sahélienne (Courel, 1984)	20
Figure 5 : Les courbes de réflectance de végétaux, d'un sol et de l'eau (Girard, 1989)	28
Figure 6 : Le site d'Oursi : extrait de la carte topographique de Dori (IGN Dakar, 1960) au 1. 200 000.....	33
Figure 7 : Les variations interannuelles de la pluviométrie de 1920 à 1989 dans la région d'Oursi.....	33
Figure 8 : La composition colorée extraite de l'image Spot du 17/12/86 du site d'Oursi : localisation des éléments du paysage cités dans le texte	35
Figure 9 : Le site du Ferlo : extraits des cartes topographiques IGN de St Louis et Dakar au 1. 000 000 de 1964 et 1970	42
Figure 10 : La composition colorée extraite de l'image Spot du 22/05/88 du Ferlo : localisation des forages, des secteurs d'image étudiés et des transects radiométriques effectués au sol (Tn°).....	44
Figure 11 : Les variations interannuelles de la pluviométrie de 1920 à 1989 au Ferlo	46
Figure 12 : Coupes figuratives des types de végétation associés aux différentes bio-unités des milieux sableux du Ferlo (Courel, 1984).....	46
Figure 13 : Les structures du couvert ligneux du site d'Oursi sur l'image Spot du 17/12/86 classée et binarisée ne contenant plus que les pixels correspondant aux groupements de ligneux	55

- Figure 14 : Les structures du couvert ligneux du site du Ferlo sur l'image Spot du 22/05/88 classée et binarisée ne contenant plus que les pixels correspondant aux groupements de ligneux57
- Figure 15 : Illustration de la méthode des centres mobiles à l'aide d'un exemple de partition de six individus en trois classes dans un espace à deux dimensions (Andrianasolo, 1988)65
- Figure 16 : L'image des unités paysagiques de décembre du site d'Oursi (image classée en 12 classes).....72-72
- Figure 17 : L'image des unités paysagiques de mai du site d'Oursi (image classée en 14 classes)75-76
- Figure 18 : Les courbes des valeurs radiométriques mesurées sur le terrain de plusieurs états de surface des milieux sableux d'Oursi : les sols sablo-argileux recouverts d'un tapis dense d'herbacées sèches, les sols sablo-argileux couverts d'herbacées sèches piétinées, les sols sablo-argileux à pellicule superficielle.....74
- Figure 19 : Les valeurs moyennes des classes des milieux sableux d'Oursi sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 12 classes de l'image de décembre 86 et pour la partition à 14 classes de l'image de mai 87.....78
- Figure 20 : Les courbes des valeurs radiométriques mesurées sur le terrain de plusieurs états de surface des bandes nues des milieux cuirassés d'Oursi : les sols sablo-argileux à pellicule superficielle, les sols sablo-argileux recouverts de sables grossiers, les sols recouverts de gravillons ferrugineux.....82
- Figure 21 : Les valeurs moyennes des classes des milieux cuirassés d'Oursi sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 12 classes de l'image de décembre 86 et pour la partition à 14 classes de l'image de mai 8783
- Figure 22 : Les valeurs moyennes des classes des groupements de ligneux d'Oursi sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 12 classes de l'image de décembre 86 et pour la partition à 14 classes de l'image de mai 8786
- Figure 23 : Transect n°1 : sols sablo-argileux peu couverts d'herbacées au sommet d'une ondulation dunaire, à 2 km au sud du forage de Mbidi, dans le secteur dunaire septentrional (longueur = 400 m, orientation NNW-SSE)..... 89
- Figure 24 : Transect n°2 : sols sableux recouverts d'un tapis dense d'herbacées sèches au large cortège floristique, sur bandes dunaires au sud de Vindou Thiengoli, dans le secteur dunaire médian (longueur = 500 m, orientation NNW-SSE).....89

Figure 25 : Transect n°3 : couloir interdunaire à 6 km au sud du forage de Mbidi (longueur = 550 m, orientation SW-NE)	92
Figure 26 : Transect n°4 : contact entre le couloir interdunaire et la bande dunaire à 6 km au sud du forage de Mbidi (longueur = 600 m, orientation NNW-SSE)	92
Figure 27 : Transect n°5 : sols sablo-argileux recouverts d'un tapis herbacé très discontinu de la plaine interdunaire, au sud du Forage de Tessékéré (longueur = 400 m, orientation SSW-NNE).....	92
Figure 28 : Transect n°6 : La plaine interdunaire, à 3 km au sud du forage de Tessékéré.....	94
Figure 29 : Transect n°7 : Le vendou Tessékéré, dans la plaine interdunaire au sud de Tessékéré (longueur 600 m, orientation E-W)	94
Figure 30 : Les valeurs radiométriques moyennes des transects effectués au sol au Ferlo en janvier 1990	94
Figure 31 : L'image des unités paysagiques de mai du secteur de Mbidi au Ferlo (image classée en 11 classes).....	96-97
Figure 32 : Les valeurs moyennes des classes des bandes dunaires du secteur de Mbidi au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 11 classes de l'image de mai 88	99
Figure 33 : Les valeurs moyennes des classes des bandes dunaires et des couloirs interdunaires du secteur de Namarel au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 10 classes de l'image de mai 88	99
Figure 34 : L'image des unités paysagiques de mai du secteur de Namarel au Ferlo (image classée en 10 classes)	101-102
Figure 35 : L'image des unités paysagiques de mai du secteur de Tessékéré au Ferlo (image classée en 13 classes)	104-105
Figure 36 : Les valeurs moyennes des classes des bandes dunaires et des couloirs interdunaires du secteur de Tessékéré au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 13 classes de l'image de mai 88	107
Figure 37 : Les valeurs moyennes des classes de la plaine interdunaire du secteur de Tessékéré au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour la partition à 13 classes de l'image de mai 88	107

- Figure 38 : Les valeurs moyennes des classes des groupements de ligneux au Ferlo sur les variables XS1, XS2, XS3 et l'indice de végétation (IV), pour les partitions en 11 classes sur les secteurs de Mbidi et Namarel et la partition en 13 classes sur le secteur de Tessékéré, effectuées à partir de l'image de mai 88 110
- Figure 39 : Illustration de l'élaboration de l'image des groupements de ligneux à l'aide du calcul de l'intersection entre l'image classée et l'image de référence, binarisées ne contenant plus que les pixels correspondant aux groupements de ligneux (Sur le site d'Oursi, l'image de référence est la photographie aérienne ; sur le site du Ferlo, l'image satellitaire classée d'une autre date)..... 119
- Figure 40 : Localisation des fenêtres-test sur le site d'Oursi (image classée et binarisée du 17/12/86) 122
- Figure 41 : Les fenêtres-test délimitées sur les bandes dunaires du site d'Oursi 124
- Figure 42 : Les fenêtres-test délimitées dans la première plaine interdunaire sableuse du site d'Oursi..... 126
- Figure 43 : Les fenêtres-test délimitées dans la brousse tigrée du site d'Oursi 126
- Figure 44 : Les fenêtres-test délimitées dans la brousse tigrée du site d'Oursi 128
- Figure 45 : Calcul de l'intersection entre les différentes images classées de décembre 1986 du secteur de Mbidi au Ferlo et comptabilisation du nombre de pixels non communs aux images classées comparées deux à deux..... 131
- Figure 46 : Nombre de pixels classés en "ligneux" sur les images classées de 7 à 17 classes calculées à partir de l'image de décembre 1986 du secteur de Mbidi au Ferlo 132
- Figure 47 : Le site de Mbidi au Ferlo : superposition des classes "groupements de ligneux" de l'image de décembre et de celles de l'image de mai : en vert : les classes "groupements de ligneux" de décembre, en bleu : les classes "groupements de ligneux" de mai, en rouge : les pixels "groupements de ligneux" communs aux deux dates..... 133
- Figure 48 : Le site de Tessékéré : superposition des classes "groupements de ligneux" de l'image de décembre et de celles de l'image de mai : en vert : les classes "groupements de ligneux" de décembre, en bleu : les classes "groupements de ligneux" de mai, en rouge : les pixels "groupements de ligneux" communs aux deux dates..... 135
- Figure 49 : Graphes des densités granulométriques en surface $g(n)$ et en nombre $f(n)$ calculées sur trois quadrats du site d'Oursi 143

Figure 50 : Covariogrammes calculés sur trois quadrats de brousse tigrée du site d'Oursi.....	146
Figure 51 : Délimitation des quadrats analysés à l'aide des indices morphologiques, sur l'image des groupements de ligneux du site d'Oursi	150
Figure 52 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site d'Oursi décrits par les variables de la distribution de taille en surface (l'inertie du nuage est expliquée à 87% par les deux premiers facteurs).....	151
Figure 53 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site d'Oursi décrits par les variables de la densité granulométrique en surface (l'inertie du nuage est expliquée à 46% par les deux premiers facteurs).....	154
Figure 54 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site d'Oursi décrits par les variables de la distribution de taille en nombre (l'inertie du nuage est expliquée à 87% par les deux premiers facteurs).....	156
Figure 55 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site d'Oursi décrits par les variables de la covariance (l'inertie du nuage est expliquée à 74% par les deux premiers facteurs)	159
Figure 56 : Délimitation des quadrats analysés à l'aide des indices morphologiques, sur l'image des groupements de ligneux du site de Mbidi au Ferlo	165
Figure 57 : Délimitation des quadrats analysés à l'aide des indices morphologiques, sur l'image des groupements de ligneux du site de Namarel au Ferlo	166
Figure 58 : Délimitation des quadrats analysés à l'aide des indices morphologiques, sur l'image des groupements de ligneux du site de Tessékéré au Ferlo	167
Figure 59 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site du Ferlo décrits par les variables de la densité granulométrique en surface (l'inertie du nuage est expliquée à 61% par les deux premiers facteurs).....	168
Figure 60 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site du Ferlo décrits par les variables de la distribution de taille en surface (l'inertie du nuage est expliquée à 75% par les deux premiers facteurs).....	171
Figure 61 : Premier plan factoriel de l'A.F.C. des quadrats du site du Ferlo décrits par les variables de la covariance (l'inertie du nuage est expliquée à 85% par les deux premiers facteurs)	173

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AKPO, L.E., 1990. Dynamique des systèmes écologiques sahéliens. Structure spécifique, productivité et qualité des herbages. Le forage de Widdu Thiengoli. Mémoire de D.E.A., Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 55 p.
- AMBOUTA, K., 1984. Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'ouest Nigérien. Thèse de docteur-ingénieur, Nancy, 116 p.
- AMBOUTA, K., ICOLE, M., 1986. L'écosystème "brousse tigrée" de l'ouest du Niger : son évolution lors de variations climatiques de durée pluriannuelle. Actes du colloque de Dakar : "changement globaux en Afrique durant le quaternaire. Passé, Présent, Futur," Dakar, 21-28 avril 1986, INQUA, 4 p.
- ANDERBERG, M.R., 1973. Cluster analysis for applications. Academic Press, New York.
- ANDRIANASOLO, H., 1987. Analyse statistique des données de télédétection, statistiques agricoles - Application sur Madagascar. Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 270 p.
- ANDRIANASOLO, H., 1987. Première approche d'un modèle de décomposition de l'espace (pour une approche intégrée). Journées de Télédétection de l'ORSTOM, Bondy.
- AUBREVILLE, A., 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Soc. Et. Géogr. Maritimes et Coloniales, Paris, 351 p.
- AUDRY, P., ROSSETTI, C., 1962. Observations sur les sols et la végétation en Mauritanie du sud-est et sur la bordure adjacente du Mali (1959 et 1961). Prospection écologique. Rapport multigraphié F.A.O., Rome, 267 p.
- BARIOU, R., LECAMUS, D., LE HENAFF, F., 1985. Dossiers de télédétection : Réponse spectrale des végétaux. Presses universitaires de Rennes 2, 71 p.
- BARIOU, R., LECAMUS, D., LE HENAFF, F., 1985. Dossiers de télédétection : Les indices de végétation. Presses universitaires de Rennes 2.
- BARRAL, H., 1977. Les populations nomades de l'Oudalan et leur espace pastoral. Travaux et documents de l'ORSTOM, n°77, Paris, 119 p.

- BARRAL, H., BENEFICE, E., BOUDET, G., DENIS, J.P., DE WISPELAERE, G., DIAITE, I., DIAW, O.T., DIEYE, K., DOUTRE, M.P., MEYER, J.F., NOEL, J., PARENT, G., PIOT, J., PLANCHENAULT, D., SANTOIR, C., VALENTIN, C., VALENZA, J., 1983. Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo. Rapport ACC-GRIZA-LAT, GERDAT-ORSTOM, Paris, 172 p.
- BARRY, J.P., BOUDET, G., BOURGEOT, A., CELLES, J.C., COULIBALY, A.M., LEPRUN, J.C., MANIERE, R., 1983. Etudes des potentialités pastorales et de leur évolution en milieu sahélien au Mali. Rapport ACC-GRIZA-LAT, GERDAT-ORSTOM, 116 p.
- BENZECRI, J.P. & Collaborateurs, 1973. L'analyse des données, Tome 1 : La taxonomie, Tome 2 : Analyse des correspondances. Dunod, Paris, 615 p. et 619 p.
- BILLE, J.C., 1977. Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris, 82 p.
- BOUDET, G., 1972. Désertification de l'Afrique tropicale sèche. Adansonia, série 2, n° 12 (4), p. 505-24.
- BOUDET, G., 1979. Quelques observations sur les fluctuations du couvert végétal sahélien au Gourma malien et leurs conséquences pour une stratégie de gestion sylvo-pastorale. Bois et forêts des tropiques, n° 184, p. 31-44.
- BOUDET, G., 1984. Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. Ministère des relations extérieures, Coopération et Développement, IEMVT, Manuel et Précis d'Élevage n°4, Paris, 266 p.
- BOULET, R., 1967. Nouveaux arguments en faveur de l'existence de deux ergs rubéfiés d'âges différents dans la zone sahélienne de l'Afrique occidentale (Haute Volta). Comm. 6ème Cong. Panafr. Préhist. Et. Quatern., Dakar, 5 p.
- BOULET, R., LEPRUN, J.C., 1969. Etude pédologique de la Haute Volta. Editions de l'ORSTOM, Bondy, 331 p.
- BRUNEAU, M., KILIAN, J., 1986. L'apport des données satellitaires dans l'établissement des cartes utilisées par le développement rural. Colloque SPOT "SPOT 1 premiers résultats en vol", Toulouse, décembre 1986, p. 197-202.
- CASENAVE, A., VALENTIN, C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration. Collection Didactiques, Editions de l'ORSTOM, Paris, 211 p.
- CASSANET, J., 1985. Satellites et capteurs. Paradigme, Collection Télédétection satellitaire 1, Caen, 128 p.

- CLOS-ARCEDUC, M., 1956. Etude sur les photographies aériennes d'une formation végétale sahélienne : la brousse tigrée. Bulletin IFAN, Dakar, 18(3), p. 677-684.
- CORNET, A., DELHOUME, J.P., MONTANA, C., 1987. Dynamics of striped vegetation patterns and water balance in the Chihuahuan desert. 10 p.
- CORNET, A., 1991. Relation entre la structure spatiale des peuplements végétaux et le bilan hydrique des sols de quelques phytocénoses en zone aride. in GROUZIS, M., LE FLOCH, E., BILLE, J.C., CORNET, A., Ed., L'aridité : une contrainte au développement - caractérisation, réponses biologiques - stratégies des sociétés - Editions ORSTOM, Paris (à paraître).
- COSTER, M., CHERMANT, J.L., 1985. Précis d'analyse d'images. Editions du CNRS, Paris, 521 p.
- COUREL, M.-F., 1977. Etude géomorphologique des dunes du Sahel (Niger Nord-Occidental - Haute-Volta Septentrionale). Thèse de 3e cycle, Université Paris VII, 284 p.
- COUREL, M.-F., 1984. Etude de l'évolution récente des milieux Sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'Etat, Université Paris I, 407 p.
- COUREL, M.-F., 1985. La contraction de la surface arborée d'après les images Landsat et Spot simulées, signe d'adaptation sahélienne à la sécheresse. Photointerpretation n° 1985-1, p. 9-16.
- DE WISPELAERE, G., 1980. Systèmes de production d'élevage au Sénégal, étude et cartographie de l'évolution de la végétation par télédétection. Rapport IEMVT, 162 p.
- DIZIER, J.L., LEO, O., 1980. Télédétection : techniques et applications cartographiques. Editions FORHOM BDPA, Paris, 275 p.
- ELLENBERG, H., MUELLER DONBOIS, D., 1965-1966. A key to Raunkiaer plant life forms with revised subdivisions. Ber. Geobot. Inst. Rübel, n° 37, p. 56-73.
- EVERITT, B., 1980. Cluster analysis. Heinemann Educational Books, 136 p.
- GIRARD, M.C., GIRARD, C.M., 1989. Télédétection appliquée : Zones tempérées et intertropicales. Collection Sciences agronomiques, Masson, Paris, 260 p.
- GROUZIS, M., SICOT, M., 1980. A method for the phenological study of browse populations in the sahel : the influence of some ecological factors. in "Browse in Africa : the current stage of Knowledge", LE HOUEROU Ed., ILCA, Addis Abeba, p 233-240.

- GROUZIS, M., 1988. Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso). Collection Etudes et Thèses, Editions de l'ORSTOM, Paris, 336 p.
- GROUZIS, M., 1990. Phénologie des ligneux sahéliens, aspects méthodologiques et influence des facteurs du milieu. Séminaire "Physiologie des arbres et des arbustes des zones arides" Nancy, du 27 mars au 6 avril 1990, 8 p.
- GROUZIS, M., 1991. Germination et établissement des plantes annuelles sahéliennes. in GROUZIS, M., LE FLOC'H, E., BILLE, J.C., CORNET, A., Ed., L'aridité : une contrainte au développement - caractérisation, réponses biologiques - stratégies des sociétés - Editions ORSTOM, Paris (à paraître).
- Guide des utilisateurs de données SPOT, 1986. CNES et SPOT IMAGE, 2 volumes.
- GUIGOU, J.L., 1973. Analyse des données et choix à critères multiples. Collection Finance et économie appliquée, Dunod, Paris, 214 p.
- HARDIGAN, J.A., 1975. Clustering algorithms. John Wiley and sons, New York, 351 p.
- JACQUEMINET, C., 1988. Caractérisation quantitative de l'organisation spatiale des aires de ligneux en milieu sahélien à partir des images SPOT. Images satellites et milieux terrestres en région aride et tropicale, ORSTOM, Bondy, p. 213-224.
- JACQUEMINET, C., MERING, C., PONCET, Y., COUREL, M.-F., 1989. Etude quantitative des formes d'organisation spatiale du couvert ligneux en milieu sahélien à partir des images satellitaires SPOT. Bulletin de la société française de photogrammétrie et de télédétection, n°114 (1989-2), p. 20-22.
- JACQUEMINET, C., MERING, C. Analyse quantitative de la structure horizontale du couvert ligneux en milieu sahélien à partir des images satellitaires SPOT. Table ronde CNRS-CEGET "Apports de la télédétection spatiale à l'étude des paysages et des systèmes agraires tropicaux", 25-27 octobre 1989, Talence (à paraître).
- JACQUEMINET, C. Des indicateurs morphologiques pour mesurer le changement des milieux Sahéliens à partir des images satellitaires. Journées scientifiques du réseau thématique de l'AUPELF-UREF: "Apports de la Télédétection à la lutte contre la sécheresse", Sénégal, 21-24 novembre 1989 (à paraître).
- LAMACHERE, J.M., DEVINEAU, J.L., FOURNIER, A., MALEK, C., LORTIC, B., BADIARA, L., YABRE, B., 1986. Cartographie thématique - échelle 1. 50 000, de l'évolution des états de surface d'un bassin versant en zone sahélienne au cours d'une saison des pluies. Le bassin versant de la mare d'Oursi au Burkina Faso. Programme d'évaluation préliminaire SPOT - Programme PEPS n°149, ORSTOM, Ouagadougou, 52 p.

- LEMEE, G., 1978. Précis d'écologie végétale. Masson, Paris, 285 p.
- LEPRUN, J.C., 1971. Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du Ferlo Nord Occidental. Ass. Sénégal. Et. Quatern. Ouest afr., Bull. liaison 31, p. 69-78.
- LEPRUN, J.C., 1978. Compte-rendu de fin d'études sur les sols et leur susceptibilité à l'érosion, les terres de cures salées, les formations de "brousse tigrée" dans le Gourma. Rapport ORSTOM-DGRST, Paris, 45 p.
- LEPRUN, J.C., 1991. Les "brousses tigrées" : structure, dynamique, écologie (Mali et Burkina Faso). in GROUZIS, M., LE FLOC'H, E., BILLE, J.C., CORNET, A., Ed., L'aridité : une contrainte au développement - caractérisation, réponses biologiques - stratégies des sociétés - Editions ORSTOM, Paris (à paraître).
- MALEK, C., 1989. Diagnostic du paysage à partir des données satellitaires - application au Sahel-Oudalan (Burkina Faso). Thèse de doctorat, Paris VIII, 205 p.
- MERING, C., PONCET, Y., JACQUEMINET, C., RAKOTO-RAVALONTSALAMA, M., 1987. Quantitative description of denudation forms in the western African Sahel. Advanced space research, 7(3), Pergamon Press, London, p. 31-39.
- MERING, C., JACQUEMINET, C., 1988. Use of SPOT satellite images for inventory and follow-up of ligneous resources in the Sahel. Proceedings of the 22th E.R.I.M. symposium for remote sensing, october 20-26, 1988, Abidjan, 15 p.
- MICHEL, P., 1969. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Thèse d'Etat, Strasbourg, 3 tomes, 1167 p.
- MILLEVILLE, P., 1989. Activités agro-pastorales et aléa climatique en région sahélienne. Le risque en agriculture, Editions de l'ORSTOM, Paris 1989, p. 233-241.
- PIOT, J., 1970. Pâturage aérien au Cameroun - Utilisation des ligneux par les bovins. Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop., 23, 4, p. 503-517.
- PIOT, J., 1983. Etude et suivi de la couverture ligneuse en milieu sylvo-pastoral. In Vanpraet C.L. (ed) : Méthodes d'inventaire et de surveillance continue des écosystèmes pastoraux sahéliens : Application au développement. Ministère de la Recherche Scientifique et Technique, République du Sénégal. p. 223-242.
- POUPON, H., 1980. Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. Editions de l'ORSTOM, Collections Travaux et Documents n° 115, 351 p.

Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. République du Sénégal, Comité interafricain d'études hydrauliques, ORSTOM, service hydrologique, Ministère de la Coopération, République Française.

Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. République de Haute Volta, Comité interafricain d'études hydrauliques, ORSTOM service hydrologique, Ministère de la Coopération, République Française.

Précipitations journalières de 1966 à 1980 - Burkina Faso - Comité interafricain d'études hydrauliques, Direction de la Météorologie, Burkina Faso, Ouagadougou, ORSTOM, Ministère de la Coopération et du Développement, Agence pour la sécurité de la navigation aérienne Dakar ASEANA.

ROUSE, J.W., HASS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with E.R.T.S. 3d E.R.T.S. Symposium N.A.S.A. SP 351, décembre, I, p. 309-317.

SERPANTIE, G., TEZENAS DU MONTCEL, L., VALENTIN, C., 1988. La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral subsahélien sous aridification : conséquences pour les systèmes de production. in GROUZIS, M., LE FLOCH, E., BILLE, J.C., CORNET, A., Ed., L'aridité : une contrainte au développement - caractérisation, réponses biologiques - stratégies des sociétés - Editions ORSTOM, Paris (à paraître).

SERRA, J., 1982. Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London, 610 p.

SHARMAN, M., 1987. Végétation ligneuse sahélienne - The global environment monitoring system. Centre d'Activité du Programme du Système Mondial de Surveillance Continue de l'Environnement, United Nations Environment Programme, Food and Agricultural Organization, Série GEMS Sahel, n°7, 85 p.

TOUTAIN, B., 1978. Situation de l'élevage dans le Sahel voltaïque face à l'extension de l'espace agricole. Actes du colloque de Ouagadougou "Maîtrise de l'espace agricole et développement en Afrique tropicale, 4-8 décembre 1978, Mémoires ORSTOM n°89, p. 159-162.

VALENTIN, C., 1989. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique. Editions de l'ORSTOM, Collections Didactiques, Paris, 229 p.

WHITE, L.P., 1970. Brousse tigrée patterns in southern Niger. Journ. Ecol., n° 58, p. 549-553.

ANNEXE I

Le total des pluies annuelles sur les stations : Dori, Aribinda, Gorgadji, Gorom Gorom,
Jalafanka, Markoye au Burkina Faso
de 1920 à 1989

Années	Dori (1)	Aribinda (1)	Gorgadji (1)	Gorom Gorom (1)	Jalafanka (2)	Markoye (1)
1920						
1921						
1922						
1923	546					
1924						
1925	428					
1926	244					
1927	417					
1928	610					
1929	638					
1930	444					
1931	462					
1932	557					
1933	535					
1934	440					
1935						
1936	463					
1937	491					
1938	402					
1939	621					
1940	474					
1941	517					
1942	576					
1943	673					
1944	437					
1945	593					
1946	464					
1947						
1948						
1949						
1950	574					
1951	447					
1952	647					
1953	783					
1954	696	594				
1955	600	512				
1956	731	454	570	477		430
1957	665	580	662	553		572
1958	580	584		691		686
1959	493	571		531		564

Années	Dori (1)	Aribinda (1)	Gorgadji (1)	Gorom Gorom (1)	Jalafanka (2)	Markoye (1)
1960	472	538				418
1961	720	487	672	649		445
1962	531	570	565	408		319
1963	747	600		564		488
1964	683	565	492	442		565
1965	545	843	417	566		282
1966	735	576	484	596		372
1967	483	461	150	465		398
1968	376	432	578	412		297
1969	684	395	514	514		426
1970	406	439	329	325		296
1971	426	373	283	200		296
1972	471	298	238	348		270
1973	394	360	156	366		315
1974	556	416	310	332		422
1975	335	523	434	339		322
1976	603	514	551	411	455	337
1977	304	354	476	404	480	314
1978	539	517	589	459	379	424
1979	417	380	384	431	372	348
1980	409	293	352	243	372	386
1981					379	
1982					382	
1983					204	
1984					293	
1985					239	
1986					404	
1987					234	
1988					319	
1989					347	

Références :

(1) : Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. République de Haute Volta, Comité interafricain d'études hydrauliques, ORSTOM service hydrologique, Ministère de la Coopération, République Française.

Précipitations journalières de 1966 à 1980 - Burkina Faso - Comité interafricain d'études hydrauliques, Direction de la Météorologie, Burkina Faso, Ouagadougou, ORSTOM, Ministère de la Coopération et du Développement, Agence pour la sécurité de la navigation aérienne Dakar ASECNA.

(2) : la station météorologique ORSTOM de Jalafanka, données communiquées par Lamachère J.M.

ANNEXE II

Le total des pluies annuelles sur les stations :
Dagana, Linguere, Vindou Thiengoli, Fete Ole, Lode, Tatki au Sénégal
de 1920 à 1988

Années	Dagana (1)	Linguere (1)	Vindou Thiengoli (2)	Fete Ole (3)	Lode (4)	Tatki (5)
1920	314,7					
1921	421,5					
1922	335,5					
1923	217,5					
1924	181,0					
1925	292,0					
1926	340,5					
1927	498,3					
1928						
1929						
1930	196,2					
1931	264,8					
1932	325,3					
1933	795,0					
1934	232,0	367,1				
1935	234,0	478,4				
1936	348,5	853,6				
1937	263,2	680,5				
1938	419,8	570,2				
1939	329,2	532,3				
1940	393,5	517,8	216,5			
1941	216,5	204,7	189,2			
1942	189,2	437,2	280,4			
1943	280,4	529,2	316,6			
1944	316,6	452,9	240,3			
1945	240,3	526,5	240,5			
1946	240,5	434,5	316,2			
1947	361,2	575,5	225,0			
1948	225,0	460,3	296,0			
1949	296,0	476,6	349,5			
1950	241,6	575,9	294,0			
1951	361,3	677,5	410,0			
1952	366,9	619,4	415,0			
1953	334,9	669,2	384,0			
1954	259,3	506,4	311,0			
1955	630,0	586,4	282,0			
1956	276,2	333,2	327,0			
1957	390,5	585,1	438,0			
1958	322,0	595,8	371,0			
1959	151,6	538,0	206,0			

ISBN : 2-7099-1096-9
Éditions de l'ORSTOM
72, route d'Aulnay
93143 BONDY Cedex