

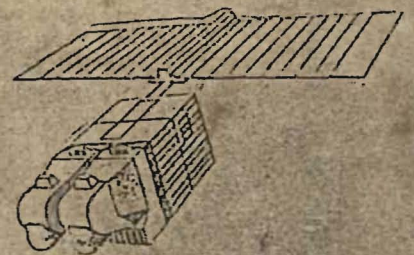
UNIVERSITE PARIS VII

DIAGNOSTIC DU PAYSAGE A PARTIR DES DONNEES SATELLITAIRES

APPLICATION AU SAHEL - OUDALAN (BURKINA-FASO)

Thèse de doctorat nouveau régime
en géomorphologie et dynamique des milieux physiques

Soutenue et présentée par Chakib MALEK
Direction de thèse Yvette DEWOLF



Paris VII, 1989

**DIAGNOSTIC DU PAYSAGE
A PARTIR DES DONNEES SATELLITAIRES**
APPLICATION AU SAHEL - OUDALAN (BURKINA-FASO)

Thèse de doctorat nouveau régime
en géomorphologie et dynamique des milieux physiques

Soutenue et présentée par Chakib MALEK
Direction de thèse Yvette DEWOLF

MEMBRES DU JURY

Président :	F.	JOLY
	M.F.	COUREL
	M.	DESBOIS
	Y.	DEWOLF
	M.	POUGET

Paris VII, 1989

*A Daniel et Jeannette,
mes parents adoptifs.*

*" Ce que je voudrais exprimer : l'harmonie
rayonnante d'un flocon de neige, mais dès que je le
serre dans ma main il fond..."*

*" Naître, vivre, souffrir, mourir ; mais surtout dans
l'intervalle - entre naître et mourir - avoir "repris
connaissance". "*

Daniel Pons

REMERCIEMENTS

Je tiens, avant tout, à remercier Yvette DEWOLF, professeur de géomorphologie à Paris VII. Déjà pour avoir su me communiquer sa passion de la géomorphologie, puis pour avoir accepté de prendre la direction de cette thèse. Je dois ensuite remercier Jean Marie LAMACHERE, directeur de recherche à l'O.R.S.T.O.M et responsable du projet P.E.P.S-Oursi. Sans l'existence de ce projet, et l'attribution d'une allocation de recherche l'accompagnant, rien n'aurait été possible.

C'est au laboratoire de télédétection de l'O.R.S.T.O.M à Bondy (93) que je me suis initié aux techniques de la télédétection satellitaire. Après un séjour en Afrique pour des travaux de terrain, j'y suis retourné pour traiter les données pendant deux ans. Beaucoup de personnes travaillant au sein de cette équipe m'ont aidé aussi bien par des discussions spontanées que par une aide technique. J'exprime ma profonde gratitude à Haja ANDRIANASOLO, statisticien et télédétecteur. Il a su me faire partager son expérience du traitement des images et comprendre mes préoccupations de thématicien. Je suis également reconnaissant à Jean POUGET, responsable de ce laboratoire, de l'attention qu'il a toujours manifesté pour mes recherches et des critiques constructives qu'il a émises durant la phase de rédaction du mémoire. Je n'oublie pas Mamy RAKOTO-RAVALONTSALAMA, ingénieur informaticien, pour les logiciels qu'il a développés avec une grande gentillesse.

Au cours d'une mission terrain à Oursi, Yveline PONCET m'a fait profiter de son expérience des milieux sahéliens, je l'en remercie.

Je remercie aussi Marie Françoise COUREL, géographe 'sahélienne', du laboratoire C.N.R.S - Imagéo, pour sa participation comme membre de jury et la correction du manuscrit. Il en est de même pour Michel DESBOIS chercheur au L.M.D de l'Ecole Polytechnique. Jean Pierre CARBONNEL a bien voulu juger de la pertinence des traitements employés. Je lui suis reconnaissant des remarques qu'il a formulées à ce propos. Je remercie pour les mêmes raisons Jean Paul GILG maître de conférences à l'E.H.E.S.S.

D'autres personnes doivent être citées et remerciées :

- Annik AING et Isabelle RANNOU, photographes du laboratoire télédétection pour avoir toujours eu à coeur de fournir des documents impeccables.
- Nicole DELABRE, responsable coordination, pour son sens de l'organisation et son dévouement mis au service de chacun.
- Marie Thérèse MIGUET, documentaliste du laboratoire, pour sa gentillesse et sa compétence.
- Liliane ZURETTI, secrétaire, qui m'a aidé à mettre en forme ce mémoire.
- Jean Louis DEVINEAU, chercheur C.N.R.S, et Anne FOURNIER, chercheur O.R.S.T.O.M, pour leur hospitalité durant mon séjour au Burkina-Faso.

Certains amis très proches m'ont proposé leurs services. Parmi eux, je tiens à remercier tout particulièrement Sylvie MOUTTAPA et Marie Pierre DUTEL.

Beaucoup de personnes ont contribué, d'une façon ou d'une autre, à la réalisation de ce mémoire, et même si elles ne sont pas citées dans cette page, qu'elles trouvent ici ma reconnaissance la plus sincère.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE : METHODOLOGIE

CHAPITRE I	
Contexte de l'étude.	: 4
CHAPITRE II	
Télédétection satellitaire et perception du paysage.	: 7
CHAPITRE III	
Principes de l'analyse des unités dynamiques.	: 11

DEUXIEME PARTIE : APPLICATION DE LA METHODE Analyse d'un bassin versant sahélien

CHAPITRE IV	
Cadre géographique régional de l'Oudalan.	: 43
CHAPITRE V	
Le bassin de la mare d'Oursi.	: 52
CHAPITRE VI	
Les données satellitaires, les données terrain.	: 71
CHAPITRE VII	
Traitements de l'image SPOT-HRV du 4 septembre 1986.	: 84
CHAPITRE VIII	
Traitements de l'image SPOT-HRV du 17 décembre 1986.	: 106
CHAPITRE IX	
Etude de la dynamique des unités du paysage.	: 133

TROISIEME PARTIE : LES EMBOITEMENTS D'ECHELLES Echelle spatiale et échelle spectrale

CHAPITRE X	
Extension à la scène SPOT toute entière.	: 155
CHAPITRE XI	
Analyse des sous classes sableuses, image du 4 septembre 1986.	: 173

CONCLUSION

DIAGNOSTIC DU PAYSAGE A PARTIR DES DONNEES SATELLITAIRES

Application au Sahel - Oudalan (Burkina-Faso)

ERRATUM

Certaines phrases ont été tronquées lors de l'impression du document.
Il faut rajouter aux phrases citées ci-dessous le ou les mots qui ressortent en gras.

- Page 6:

"Dans ces conditions une recherche portant sur les inter-relations entre les divers éléments de l'écosystème en utilisant des outils intégrateurs tels que les capteurs haute résolution est **fondée**. "

" L'accent devait particulièrement être mis sur la localisation des secteurs de dégradation et de régénération des unités du **paysage**. "

- Page 12: (Ce paragraphe s'arrête à "recherches")

" Actuellement celle-ci résulte la plupart du temps de l'expérience du praticien plutôt que d'un traitement rigoureux des informations dont il dispose. Les images satellitaires, de par leur nature, peuvent se prêter à ce type de recherches."

- Page 16:

"De plus, si l'on se situe dans un contexte pluridisciplinaire, des discussions risquent de naître portant sur la pertinence du choix initial des sites de reconnaissance. C'est pourquoi il paraît beaucoup plus judicieux de faire appel aux méthodes de classification **automatique**."

- Page 25:

"- mettre en évidence les paliers de stabilité successifs entre les partitions minimum et **maximum**."

- Page 32:

" C'est autour de cette valeur centrale que nous avons établi notre critère : dans un intervalle compris entre 90 et 110 % on calcule le nombre de thèmes stables **quantitativement**."

- Page 36:

" C'est donc une certaine permanence que l'on observe dans les unités relatives du paysage, une permanence somme toute relative à l'intervalle de temps **de l'observation**."

- Page 41:

" Il est alors nécessaire de scinder le volume information que possèdent ces classes en utilisant la même méthode de stratification en unités stables **radiométriquement**. "

- Page 50:

" appelée "brousse tigrée", bien visible sur les photographies aériennes. L'aspect général de cette formation arbustive est une alternance de bandes sinueuses de végétation et de sol nu (Ambouta, 1984. Ambouta et Icole, 1986). Il peut aussi s'agir de **fourrés appelés "bush"**. "

INTRODUCTION

La recherche d'informations précises et fiables est une des conditions essentielles à la compréhension d'un phénomène. En ce qui concerne l'information sur le milieu naturel, les procédures d'enquêtes, la pratique des sondages et l'emploi des statistiques sont devenus monnaie courante pour tenter de traduire avec précision la "réalité".

Mais la mise en place des stratégies d'informations spatialisées et statistiques d'aide à la décision coûte cher et est uniquement à la portée des pays riches. Dans ces derniers des organismes spécialisés sont chargés de la collecte et du traitement des données. Singulièrement ce sont les pays en voie de développement qui ont besoin actuellement de données fiables sur les potentialités en ressources renouvelables de leur territoire. On relève trois grands types de problèmes ayant des répercussions spatiales directes sur le milieu physique et qui doivent être localisés de manière exhaustive :

- le suivi de la progression des secteurs d'extension des cultures et l'exploitation des forêts à des fins énergétiques. Ces problèmes sont liés à une croissance démographique forte dans la plupart des pays en voie de développement.
- l'existence d'une surexploitation du milieu ayant pour cause l'exportation de matières premières végétales ou minières.
- évaluation de la "vitalité" du milieu naturel. L'évolution de certains écosystèmes peut être rapide soit à la suite de la variation des conditions climatiques, soit à la suite de l'intervention de l'homme.

Les satellites d'observation de la terre répondent en partie à ces besoins. Ils peuvent contribuer de manière efficace à combler ce manque et fournir des informations spatialisées en termes qualitatifs : nature, signification du phénomène etc..., et en termes quantitatifs : superficie, intensité etc... Mais des problèmes subsistent quant à la capacité de traitement des données. Couvrir une aire régionale ou nationale de plusieurs km² exige l'emploi de dizaines voire de centaines d'images satellitaires. Face à cette énorme masse de données il devient nécessaire d'élaborer une démarche méthodique globale pour le traitement des données. Elle doit comporter trois phases de recherches :

- développer des méthodologies d'analyses d'images permettant de hiérarchiser le volume d'informations en s'appuyant sur des critères automatiques de décisions.
- établir une stratégie de sondage adaptée aux phénomènes considérés.
- conjuguer l'emploi de plusieurs plateformes de capteurs pour observer le comportement des phénomènes à plusieurs échelles spatiales.

Les conclusions d'études récentes d'évaluation au bénéfice d'organismes très divers convergent et s'accordent à penser que la télédétection satellitaire intégrée dans un plan d'informations statistiques sur les ressources terrestres permettrait par exemple d'obtenir, d'une part des estimations plus fiables, et d'autre part de réduire de façon très sensible le coût des sondages pratiqués par d'autres moyens.

D'un autre côté, l'objet d'étude - le milieu naturel - a comme caractéristique principale une très grande hétérogénéité. Comprendre comment évolue un milieu naturel n'est pas chose aisée, la somme des inter-relations est trop élevée pour que l'on puisse réellement tenir compte du rôle de chaque facteur dans un phénomène donné et lui attribuer sa vraie valeur. Souvent celle-ci est fonction de l'échelle d'observation, un facteur pouvant paraître insignifiant à une échelle est omniprésent à une autre et vice-versa.

D'aucuns s'accordent à penser qu'il est nécessaire d'appréhender le milieu naturel en commençant par une approche de type systémique. Or la notion de système induit celle de dynamique. Observer un système à un moment donné ne suffit pas. Il est indispensable de prolonger la seule observation spatiale par une observation temporelle des variations des unités de paysage afin de comprendre efficacement quelle est l'évolution du paysage sous l'action des facteurs dynamiques. En fait pour tenter d'établir un diagnostic sur le système à partir de l'étude des inter-relations entre éléments le composant...

Cette étude vise à élaborer une méthodologie d'approche de la dynamique du paysage sur une période du cycle annuel à partir des données satellitaires haute résolution SPOT-HRV.

Dans la première partie nous définirons la méthodologie à employer pour :

- d'une part, hiérarchiser les images satellitaires sélectionnées en unités du paysage.
- d'autre part composer une image multidate issue des images classées au cours de la première phase. L'image résultante fournit des données statistiques et spatialisées sur l'évolution dynamique des unités du paysage entre les deux dates. Ces éléments serviront ensuite à établir un diagnostic sur l'évolution globale du paysage.

La deuxième partie verra l'application de cette méthodologie sur un bassin-versant test situé en zone climatique sahélienne.

La troisième partie, plus courte, concerne les emboîtements d'échelles et comporte deux phases:

- la première consistera à classer la scène toute entière avec la méthodologie appliquée sur le bassin-versant test.
- la deuxième s'attachera à examiner quelles sont les sous-classes contenues dans quelques unités hiérarchisées à partir de la méthodologie développée et appliquée dans la seconde partie.

Cette thèse fait appel à des techniques variées, combinant l'emploi de l'informatique, des statistiques, de certaines disciplines de la nature. De ce fait l'usage qui est fait de certains termes n'est pas le même pour ces différentes matières. Dans la mesure du possible nous avons essayé d'explicitier ces termes en les resituant dans leur contexte. Mais ceci n'est pas toujours évident lorsque l'on traite du milieu naturel. L'auteur, géographe de formation, tient à signaler qu'il s'agit avant tout d'un mémoire de géographie et, dans cette optique, les termes en usage seront empruntés en priorité au vocabulaire des géographes. Nous nous en excusons par avance, notamment auprès des pédologues et des hydrologues.

Première Partie

METHODOLOGIE

CHAPITRE I

CONTEXTE DE L'ETUDE

1- LE CHOIX DE L'OUTIL

La préoccupation initiale à la base de ce sujet de recherche est purement thématique. Elle est celle d'un aménageur s'intéressant principalement aux processus d'érosion et désirant les localiser d'une manière précise à un niveau régional ou même zonal. Localiser spatialement des phénomènes érosifs demande auparavant la réalisation d'études préalables qui lui sont intimement liées:

- étude des potentialités physiques du milieu considéré
- localisation et évolution des secteurs d'activités de l'homme sur ce milieu
- étude de l'effet des variations climatiques sur les unités du paysage

Il faut d'autre part restituer ces travaux à des échelles d'approche situées entre le 1/50.000 et le 1/25.000, échelles compatibles avec les politiques d'intervention ultérieures. Ajoutons à cela que les études envisagées le sont en zone sahélienne et l'on aura une idée de la difficulté de l'entreprise. Les problèmes matériels s'opposant à la réalisation du projet sont nombreux et peuvent être scindés en deux grands ensembles :

- le manque d'informations sur le milieu et son exploitation par l'homme.
- le manque de logistique : il est nécessaire de recourir à une main d'oeuvre importante de spécialistes du milieu naturel ou des sociétés humaines pour couvrir le territoire.

L'outil d'approche à utiliser doit donc être suffisamment performant pour conjuguer les qualités suivantes :

- appréhension du milieu sur de grandes étendues
- capacités à la hiérarchisation des unités du paysage
- opérationnel pendant les périodes intéressant cette étude

L'outil satellitaire haute et moyenne résolution possède ces qualités et répond en partie à notre préoccupation.

2- LE CHOIX DE LA REGION D'ETUDE

Il restait à définir une région d'étude pour tester les performances de l'outil satellitaire. Ce fut le bassin d'Oursi au Nord du Burkina-Faso. Il convient ici d'ouvrir une parenthèse. Tous les chercheurs s'intéressant à l'étude des écosystèmes de mares sahéliennes connaissent les travaux accomplis sur le site d'Oursi. Ceux-ci sont nombreux et diversifiés et portent sur tous les aspects de l'écosystème. Ces simples considérations font que l'auteur a vu fleurir bien des sourires narquois, de la part d'autres chercheurs, accompagnés d'exclamations du genre " encore Oursi " ! Ou bien, plus sérieusement, d'autres se demander le réel bien fondé scientifique de cette recherche. Tout est connu à Oursi !

On peut légitimement s'interroger sur le sens de cette recherche. Pourquoi travailler sur un site qui est aussi connu, qu'apportera une recherche supplémentaire ? Mais il est possible de renverser la question : le site étant si bien connu comment se fait-il que personne ne soit parvenu à tirer une synthèse des nombreuses monographies publiées à ce jour ? Il faut préciser que certaines études offrent des apports tout à fait inédits sur la dynamique des écosystèmes sahéliens. Citons particulièrement l'étude phytoécologique de Grouzis sur les phytocénoses sahéliennes (1987) réalisée à partir de données recueillies de 1976 à 1984 ; l'étude de Milleville sur le système agro-pastoral sahélien au Burkina-Faso (1980) ; l'étude de géomorphologie dynamique par Joly, Dewolf, Riou (1981) etc... La réponse est peut être fournie par la remarque suivante : toutes ces études n'ont pas été réalisées avec le souci d'une intégration ultérieure. Souvent d'ailleurs, le cadre spatio-temporel est différent, ce qui interdit cette intégration.

Dans ces conditions une recherche portant sur les inter-relations entre les divers éléments de l'écosystème en utilisant des outils intégrateurs tels que les capteurs haute résolution est

Notre site d'étude est localisé dans l'Oudalan, une province du Burkina-Faso, située en zone climatique sahélienne. Cette thèse est menée dans le cadre d'un projet d'évaluation préliminaire SPOT (projet P.E.P.S.). Les programmes P.E.P.S., à l'initiative du C.N.E.S., avaient pour but d'évaluer les capacités du satellite SPOT 1 dans les premiers mois de son lancement prévu au printemps 1986. Dans le cas du projet P.E.P.S. - Oursi les objectifs scientifiques portaient en premier lieu sur la cartographie au 1/50.000 de l'évolution des états de surface du bassin d'Oursi au cours d'une saison des pluies. Des considérations phytoécologiques et hydrologiques sont à l'origine du programme. En liaison avec les objectifs précédents il a paru intéressant à cette équipe de s'adjoindre un autre chercheur, géographe de formation, en lui confiant un autre objectif complémentaire : l'étude de la géomorphologie dynamique du bassin d'Oursi au 1/50.000. L'accent devait particulièrement être mis sur la localisation des secteurs de dégradation et de régénération des unités du

Le choix d'Oursi comme site d'étude est dicté par des raisons que l'on peut qualifier d'historiques: depuis une vingtaine d'années la zone sahélienne suscite l'intérêt les années de sécheresse. Par l'intermédiaire des médias le monde occidental a pris conscience des drames vécus par les populations sahéliennes durant ces périodes. Mais les journalistes privilégient bien souvent le côté spectaculaire des conséquences du phénomène sans en expliquer les causes profondes. Il devenait donc urgent de mener des études sur les causes de la sécheresse et de mettre en place des structures d'aides aux populations intervenant rapidement dans l'avenir s'il survenait de nouvelles périodes sèches.

C'est pourquoi, suite à la grande sécheresse de 1972-1974, des programmes de recherches pluri-disciplinaires ont été lancés à l'initiative de la D.G.R.S.T. et concrétisés à travers la constitution de Comités L.A.T. (Lutte contre l'aridité en milieu tropical). Répartis dans diverses régions du Sahel, leur but était d'inventorier les ressources des milieux sahéliens et leurs potentialités. Le Bassin de la Mare d'Oursi, situé au nord du Burkina-Faso, dans la province de l'Oudalan, fut choisi comme étant représentatif des écosystèmes de mares sahéliennes de l'Oudalan. Le "projet mare d'Oursi" regroupe cinq instituts de recherche français dont l'action est coordonnée par l'O.R.S.T.O.M. Le nombre de rapports, ouvrages et cartes publiés à l'issue de ce programme est en soi un argument suffisant pour avoir fait

d'Oursi une zone test d'initialisation à un projet de télédétection satellitaire appliquée aux ressources renouvelables. L'abondance des données collectées va servir à étalonner l'interprétation des résultats obtenus sur les classifications.

CHAPITRE II

TELEDETECTION SATELLITAIRE ET PERCEPTION DU PAYSAGE

1- CARACTERISTIQUES DES SATELLITES

On aborde dans ce chapitre les caractéristiques des satellites d'observation de la Terre susceptibles de servir d'outils à l'étude des paysages selon les bases exposées précédemment. On peut résumer celles-ci de la manière suivante :

- objectivité des mesures satellitaires.
- acquisition de l'information sur différentes bandes spectrales.
- comparaison de l'évolution différentielle des zones climatiques.
- étude synchrone sur des espaces étendus.
- répétitivité des mesures au-dessus d'un même site.

1.1- Objectivité des mesures satellitaires

Les capteurs satellitaires enregistrent la quantité d'énergie, réfléchi ou émise par la surface terrestre, dans des bandes de longueurs d'ondes précises du spectre électromagnétique. L'enregistrement du signal se décompose en un ensemble de points élémentaires appelés pixels. Les pixels sont de dimensions variables, dépendantes du degré de résolution du capteur utilisé. Les quantités d'énergie recueillies par les capteurs sont ensuite codées en mode binaire et transmises à la station réceptrice au sol. Les données résultantes sont alors disponibles pour des traitements numériques à l'aide de calculateurs électroniques.

C'est la nature physique (quantités d'énergie réfléchi) des données satellitaires qui est à l'origine de l'objectivité des images restituées. Toutefois, cette objectivité est relative aux domaines de prospection du spectre électromagnétique des capteurs utilisés et aussi fonction du filtre atmosphérique qui varie au cours du temps. C'est en nous fondant sur l'objectivité de ces données de base que nous développerons notre démarche de recherche sur le paysage en essayant d'altérer le moins possible l'information de base au cours des traitements ultérieurs.

Cette objectivité n'est pas l'apanage de la seule télédétection satellitaire, d'autres techniques de télédétection la possèdent. La photographie aérienne, par exemple, restitue aussi une information, objective et relative (puisque'elle est fonction du domaine spectral prospecté), de type analogique. De plus, la photographie aérienne possède un degré de résolution spatiale beaucoup plus élevé, pour une même échelle spatiale d'observation, que les capteurs satellitaires. Loin de s'opposer ces deux techniques s'avèrent complémentaires et n'interviennent pas de la même manière dans l'étude des paysages. Mais le mode d'interprétation des photographies aériennes est plus subjectif, faisant davantage appel à une prise de décision dès la phase initiale de hiérarchisation de l'information.

On note à propos des photographies aériennes un progrès intéressant issu justement des techniques utilisées par la télédétection satellitaire: il est de plus en plus fréquent de numériser les photographies aériennes à l'aide d'un scanner, et de sélectionner des bandes spectrales bien précises à l'intérieur du domaine visible compris entre 0,4 et 0,7 μm et infra-rouge de 0,71 à 1,1 μm initiaux. Des traitements familiers en télédétection satellitaire sont ensuite appliqués aux photographies numérisées. Ceci traduit la volonté des opérateurs concernés d'obtenir des résultats plus objectifs en travaillant uniquement sur des données numériques.

Dans notre recherche, l'image de télédétection satellitaire est utilisée pour la stratification de l'espace (organisation, hiérarchisation), et les photographies aériennes antérieures à la prise d'images satellitaires sont utilisées pour valider l'interprétation des classes obtenues, notamment grâce à l'effet stéréoscopique.

1.2- Acquisition de l'information sur différentes bandes spectrales

L'oeil humain possède des propriétés remarquables de perception de l'environnement. Mais l'interprétation des informations à notre portée est bien souvent faussée par des facteurs psychologiques, liés le plus souvent à nos connaissances, à priori génératrices d'habitudes. Les capteurs satellitaires des ressources terrestres offrent l'avantage de restituer une information objective et de sélectionner cette information dans des bandes spectrales qui peuvent se situer hors du spectre visible. Des phénomènes non perceptibles dans le domaine visible sont alors mis en évidence. Citons l'exemple connu de l'observation de la végétation chlorophyllienne active grâce à l'emploi conjugué des bandes spectrales du rouge et du proche infrarouge.

Une autre caractéristique intéressante de la sélectivité des bandes spectrales réside dans l'étude de la "décomposition" spectrale des propriétés d'un objet ou d'un groupe d'objets que l'on appelle "signature spectrale". Les signatures spectrales permettent l'analyse fine des propriétés des pixels regroupés en classes homogènes dans le cas d'une image satellitaire.

1.3- Comparaison des vues, études synchrones sur de grands espaces

C'est évidemment un des points forts de la télédétection satellitaire. On voit d'emblée l'apport que constitue une étude régionale menée de façon synchrone en tous les points de la région. L'appréciation de la variabilité spatiale des facteurs écologiques n'est plus seulement estimée. En couplant image satellitaire et prospection au sol sur des sites tests représentatifs des différents types d'unités du paysage, il est possible d'étendre à l'ensemble de l'image les conditions du milieu, l'approche se faisant à partir des sites.

1.4- Répétitivité des vues

La répétitivité des vues pour une région donnée est nécessaire à toute étude diachronique sur le paysage. Notons toutefois qu'il est rare d'obtenir des images suivant un calendrier des prises de vues choisies en fonction de l'observation d'un phénomène saisonnier fugace particulier. En effet, les satellites des ressources terrestres sont dépendants des conditions atmosphériques pour obtenir des images exploitables. Toutefois la faculté de dépointage du satellite SPOT a permis d'élever la probabilité d'obtention d'une vue exploitable dans un intervalle de temps fixé compatible avec le sujet d'étude.

2- LE PIXEL

•**Définition:** "*Plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée définie par les dimensions de la maille d'échantillonnage*" (Journal Officiel 1984).

Le pixel (picture element) est donc le point élémentaire de mesure d'un capteur satellitaire. Les dimensions de ce point élémentaire sont directement liées au type de capteur utilisé. Il est de 4510 m² pour MSS Landsat (57,1 m x 79 m) et de 400 m² pour SPOT-HRV (20m x 20m).

Le pixel peut être considéré comme un intégrateur d'énergie. Cette quantité d'énergie réfléchie par le pixel est tributaire de plusieurs facteurs : ensemble des objets au sol, inter-relations entre ces objets, inter-relations avec les pixels proches, transmissivité de l'atmosphère, etc... Dans ces conditions, l'interprétation d'un phénomène particulier tributaire d'une telle combinaison de facteurs est pour le moins complexe.

Cette complexité de l'information élémentaire de base corrobore l'idée qu'il faut aborder le paysage suivant une approche globale avant d'entreprendre une analyse de ses constituants. Un pixel possède une signification relative. Cette signification prend son sens lorsque l'on remplace le pixel dans son contexte spatial avec son environnement propre.

3- RELATION ENTRE MESURES RADIOMETRIQUES ET PAYSAGE

L'approche systémique est pratiquée couramment en télédétection satellitaire lorsque l'on interprète des compositions colorées (C.C). Ces documents tirés sur film photographique sont issus de la combinaison de trois bandes spectrales restituées chacune avec une couleur primaire. L'interprétation consiste alors soit à isoler un phénomène particulier mis en évidence par différenciation des couleurs, soit à cerner des zones homogènes à l'oeil où l'on suppose des conditions écologiques semblables. Ce qui est intéressant à constater c'est que l'opérateur réalise une intégration implicite de variables écologiques. Le sujetif entre donc en compte pour cette interprétation tout comme pour l'emploi classique des photographies aériennes. Cette ambiguïté ne peut être levée que par des contrôles au sol.

Le problème essentiel est de faire correspondre à des valeurs radiométriques, combinées entre elles ou non, un phénomène ou un groupe de phénomènes écologiques.

En abordant la relation entre mesures radiométriques et unités de paysage trois problèmes se posent :

- la notion d'optimisation d'échelle de restitution en fonction du degré de résolution et du volume d'information.
- la partition de l'image en unités homogènes.
- des phénomènes très différents peuvent avoir une même signature spectrale.

3.1- La notion d'échelle

Cette notion est souvent floue dans l'esprit des utilisateurs. Quelles informations faire apparaître à une échelle donnée pour un thème d'étude précis ? Y a-t-il une réelle adéquation entre le thème observé et son échelle d'observation ? Actuellement celle-ci résulte la plupart du temps de l'expérience du praticien plutôt que d'un traitement rigoureux des informations dont il dispose. Les images satellitaires, de par leur nature, peuvent se prêter à ce type de recherches. L'étude de c

3.2- Partition de l'image

Sur une C.C réalisée à partir des trois canaux SPOT la totalité de l'information est contenue dans l'image visualisée. Le nombre de combinaisons possibles est inférieur ou égal au produit des valeurs de chaque bande spectrale. Par exemple, avec trois canaux SPOT dont l'amplitude des histogrammes serait respectivement de 50, 62, 78 on obtient 241.800 combinaisons possibles ! Dans la réalité, le chiffre est évidemment inférieur. Il n'empêche qu'il demeure nettement supérieur à nos facultés visuelles de perception. C'est pourquoi il est nécessaire de hiérarchiser l'information à l'aide d'autres critères que le simple critère visuel.

Il s'agit de structurer l'information et non de la réduire. Une hiérarchisation de l'information spectrale est possible en employant des méthodes tendant à conserver l'objectivité initiale, sans altérer l'information.

3.3- Réflectance des objets

Un objet ou un groupe d'objets de natures différentes peuvent très bien posséder des signatures spectrales voisines et donc figurer au sein d'une même classe radiométrique. On peut à partir de deux méthodes éviter des erreurs grossières d'appréciation sur la classification obtenue:

- le premier est de scinder à nouveau les unités radiométriques selon les mêmes critères de classification que pour l'image totale. Il n'est pas rare que les sous-unités apparues permettent de lever l'ambiguïté.
- le second consiste à utiliser des images satellitaires diachroniques prises en saisons climatiques différentes. Ce qui aura pour effet de réduire la part d'incertitude quant à définir la signification des unités radiométriques.

- Conclusion

L'image satellitaire est un outil puissant de reconnaissance et d'analyse des paysages. La qualité des résultats dépend de notre capacité à extraire les informations contenues dans l'image satellitaire en la hiérarchisant avec le moins de pertes d'informations possibles.

CHAPITRE III

PRINCIPES DE L'ANALYSE DES UNITES DYNAMIQUES

1- LES ÉTATS DE SURFACE

En télédétection satellitaire la relation entre la réalité physique et les données restituées par les capteurs passe par la notion d'états de surface. Aussi avant d'aborder les problèmes liés à l'analyse des données il est auparavant nécessaire de définir la notion d'états de surfaces.

1.1-Les états de surfaces en télédétection satellitaire

L'état de surface est observé à partir de l'étude de la signature spectrale. On peut définir cette dernière comme *"l'ensemble des caractéristiques conditionnant l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière, nécessaires et suffisantes pour identifier une surface déterminée"* (Journal officiel 1984).

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. À cause de cela la définition que l'on peut donner d'un état de surface reste très générale. Bruneau et Kilian (1986) proposent celle-ci: *"ensemble des caractères propres à la surface de la terre susceptible d'être détecté depuis un satellite ou un avion"*. Dans ces conditions l'état de surface en télédétection satellitaire peut être considéré comme la réponse énergétique réfléchie par la surface d'un pixel ou d'un groupe de pixels dans le cas d'une classification de l'image.

Cinq facteurs physiques du milieu, en étroite interaction, sont à prendre en compte pour expliquer les variations de la réponse spectrale des états de surface (luminance et réflectance):

- l'humidité
- la rugosité
- la couleur
- la végétation
- la composition de l'objet

Par ailleurs des recherches sur une éventuelle hiérarchie de trois de ces facteurs sol - humidité, rugosité, couleur - et portant sur des parcelles agricoles ont montré qu'il n'y a pas prédominance d'un facteur sur les autres. Tout dépend de la période d'observation (Traube, 1985).

1.2- Les états de surface en sciences de la nature

L'étude des états de surface s'est développée singulièrement ces dernières années, suite aux travaux menés par les hydrologues et les pédologues de l'O.R.S.T.O.M en zone inter-tropicale. L'intérêt nouveau porté aux états de surface est lié aux découvertes récentes dans les processus d'infiltration et de ruissellement des pluies. Le résultat de plusieurs campagnes de pluies simulées a montré que les organisations superficielles et la végétation ont un rôle déterminant sur les processus d'infiltration de l'eau. Il est donc logique de penser, comme l'ont fait ces chercheurs, qu'en étudiant minutieusement les états de surface, il soit possible d'établir un diagnostic du milieu.

Ce terme ne concerne pas uniquement la seule surface du sol. Il recouvre deux composantes du milieu : le couvert végétal et les organisations pédologiques superficielles (Casenave et al, 1987). L'expression "organisations pédologiques superficielles" est proposée par des pédologues. Nous sommes, quant à nous, très réservé sur la validité de l'expression "organisations pédologiques superficielles". En effet cette expression pourrait désigner les formations superficielles elles-mêmes.

Les simulations de pluies en Afrique de l'Ouest ont été réalisées suivant un transect climatique nord-sud, des marges sahéniennes aux forêts tropicales de Côte d'Ivoire. Elles avaient pour but de hiérarchiser les facteurs intervenant dans l'hydrodynamique superficielle (Valentin, 1981). En ce qui concerne la zone sahénienne, ces études ont conclu au fait que ce sont les caractères d'états de surface qui conditionnent l'hydrodynamique. Parmi ceux-ci, les organisations superficielles ont un rôle prépondérant (Chevallier 1982 ; Collinet et al, 1979). Les états de surface sont subdivisés en unités homogènes appelées "surfaces élémentaires". Leur nature, leur nombre et leur dimension peuvent considérablement varier selon les milieux (Casenave et al, 1987). Plusieurs paramètres sont pris en compte au niveau de la surface élémentaire:

- couvert herbacé ou cultural
- micro relief
- construction de la mésofaune
- micro horizon
- croûte de surface
- sol

Les micro horizons sont désignés sous le terme "microorganisations pelliculaires superficielles" (mops) (Casenave et al, 1987). Ces micro horizons déterminent la surface du sol et leur épaisseur n'est souvent que de quelques millimètres (ce qui constitue la surface de transit, pour les géomorphologues). Les m.o.p.s forment l'élément déterminant pour un diagnostic relatif à la stabilité ou l'instabilité du milieu. Ce sont elles qui permettent la meilleure prévision des processus suivants :

- infiltration
- érosion hydrique
- déflation
- levé de semences

En annexe sont présentés quelques états de surface relevés sur le bassin d'Oursi (Janeau et al, 1988).

1.3- Comparaison des deux définitions

Il existe une similitude frappante entre les états de surface précédemment définis et les états de surface détectés par les capteurs satellitaires. Dans les deux cas, les unités désignées, se présentent comme intégratrices et hiérarchisables. La seule différence réside dans une approche des phénomènes observables à des échelles spatiales qui ne sont pas toujours compatibles. Théoriquement pour un capteur haute ou moyenne résolution, un état de surface est reconnu par un ensemble de 9 pixels (l'équivalent d'un demi hectare pour SPOT-HRV). Des études ont déjà confirmé ce fait pour la région d'Oursi avec les capteurs moyenne résolution MSS Landsat (Lointier et al, 1984 ; Simonin et al, 1981). Il est possible de contrôler le bien fondé des unités radiométriques obtenues avec la classification de l'image du 4 septembre 1986, donc en saison des pluies, à travers deux composantes du milieu :

- les formations superficielles (qui correspondent aux organisations superficielles pédologiques proposées par Casenave et Valentin , 1987).
- le couvert végétal.

2- LES PROBLEMES RELATIFS A LA CLASSIFICATION DES DONNEES

La manière de traiter les données revêt une importance considérable dans notre démarche. Nous désirons utiliser une méthode de hiérarchisation des images satellitaires qui mette en évidence les grandes structures présentes dans la population des pixels. Replacés dans leur contexte spatial ces derniers doivent s'organiser en unités stables qui seront le reflet des conditions du milieu au moment de la prise de vue du satellite. De plus il est indispensable que cette méthode soit reproductible quelle que soit la région étudiée et quel que soit l'opérateur. On devra donc tendre à produire une méthode automatisable ultérieurement. Cette caractéristique se révèle essentielle. C'est au prix de cette exigence que l'on pourra très prochainement traiter en opérationnel et de manière rigoureuse un gros volume de données. C'est dans le cadre de cette efficacité que l'on trouvera des réponses au souhait des décideurs de construire à l'échelle régionale voire nationale un système d'information sur le milieu physique et l'exploitation anthropique. Elle permettra, en outre, des comparaisons inter-régionales à partir des données satellitaires de même type.

L'enjeu est donc de taille. C'est pourquoi il est nécessaire de réaliser une analyse critique des grandes démarches proposées actuellement. Les traitements de données se scindent en deux grands groupes de démarches radicalement différentes :

- la démarche dirigée
- la démarche non-dirigée

2.1- Démarche dirigée

Appliquer une démarche dirigée à une image, suppose que l'on connaisse "à priori" la zone étudiée. La collecte des "informations terrain" s'effectue à partir de zones-test que l'on estime représentatives du milieu. On dresse pour chaque zone-test une "fiche terrain" qui répertorie l'ensemble des variables thématiques susceptibles d'influer sur la réponse radiométrique enregistrée par les capteurs. Les sites sont ensuite identifiés, le plus précisément possible sur l'image et servent à initialiser la classification.

Une démarche dirigée convient bien à des études ciblées où les états de surface thématiques sont peu nombreux. Par exemple, établir des statistiques agricoles sur des régions au parcellaire géométrique bien repérable sur l'image. Ou encore, réaliser une étude en milieu

urbain. Fréquemment d'ailleurs, dans ce type d'analyse, on ne traite que les parties thématiquement intéressantes de l'image en masquant le reste qui peut prêter à confusion dans la classification.

Mais il en va autrement pour l'étude d'un paysage considéré comme un tout. On ne peut faire abstraction de l'une de ses parties. Appliquer ce type de démarche au paysage suppose que l'on ait reconnu au préalable toutes les unités qu'il contient, ce qui semble difficile à entreprendre de manière objective. Il y a là un biais difficile à surmonter en appliquant une démarche supervisée. De plus, si l'on se situe dans un contexte pluridisciplinaire, des discussions risquent de naître portant sur la pertinence du choix initial des sites de reconnaissance. C'est pourquoi il paraît beaucoup plus judicieux de faire appel aux méthodes de classification

2.2- Démarche non-dirigée

Dans une démarche non-dirigée, les pixels sont classés automatiquement en un nombre de classes fixées à l'avance. Le chercheur donne donc une signification thématique *a posteriori* aux classes obtenues. Ceci répond en partie seulement aux critères d'objectivité retenus pour notre démarche et qui sont formulés dans le chapitre I. En partie seulement si l'on considère que si c'est effectivement l'algorithme qui détermine la répartition des pixels au sein des classes, le nombre de classes est lui, fixé à l'avance par l'opérateur. A l'aide de quels critères objectifs (ou tendant à l'être) peut-on déterminer quelle est la partition optimum de l'image, celle qui reflète le mieux les éléments majeurs du paysage ? Avant de poursuivre plus loin dans la recherche des critères de détermination du nombre optimum de classes, il convient de considérer le point suivant :

-appliquer une classification automatique génère un résultat qui ne sera jamais faux, si l'on observe quelques précautions pour son emploi expliquées dans le paragraphe consacré aux centres mobiles. Il est toujours l'expression d'une réalité thématique même si elle échappe à nos connaissances. Cependant il est nécessaire d'imaginer des critères de décision pour le nombre optimum d'unités que peut contenir une image. C'est à cette question importante que nous nous efforçons de répondre dans ce chapitre.

3- SCHEMA D'ENSEMBLE POUR L'ANALYSE DES UNITÉS DYNAMIQUES

Nous avons précédemment abordé les problèmes relatifs aux classifications des données et précisé ce que nous entendions par l'expression "états de surface". Il est maintenant possible d'indiquer la réalisation concrète du modèle d'exploitation des images satellitaires pour l'analyse des paysages sur une période du cycle annuel. L'efficacité de ce modèle, qui peut probablement être utilisé pour le traitement de différentes sources de données, n'est considérée ici qu'en fonction des données satellitaires.

Le paysage est un ensemble dynamique en évolution. Il n'est donc pas question de l'étudier à partir d'une seule image parce que cette dernière ne nous fournit qu'une vision statique du paysage, reflet des conditions du milieu physique et des activités anthropiques à un instant donné. Le sens de l'évolution et sa vitesse dans une période de temps du cycle annuel permet de considérer, plus ou moins précisément, le rôle de chaque facteur agissant sur le paysage ainsi que le résultat de leurs interrelations. Il faut donc analyser au minimum deux images en confrontant le résultat des images classées avec les réalités terrain pour définir certains processus résultants.

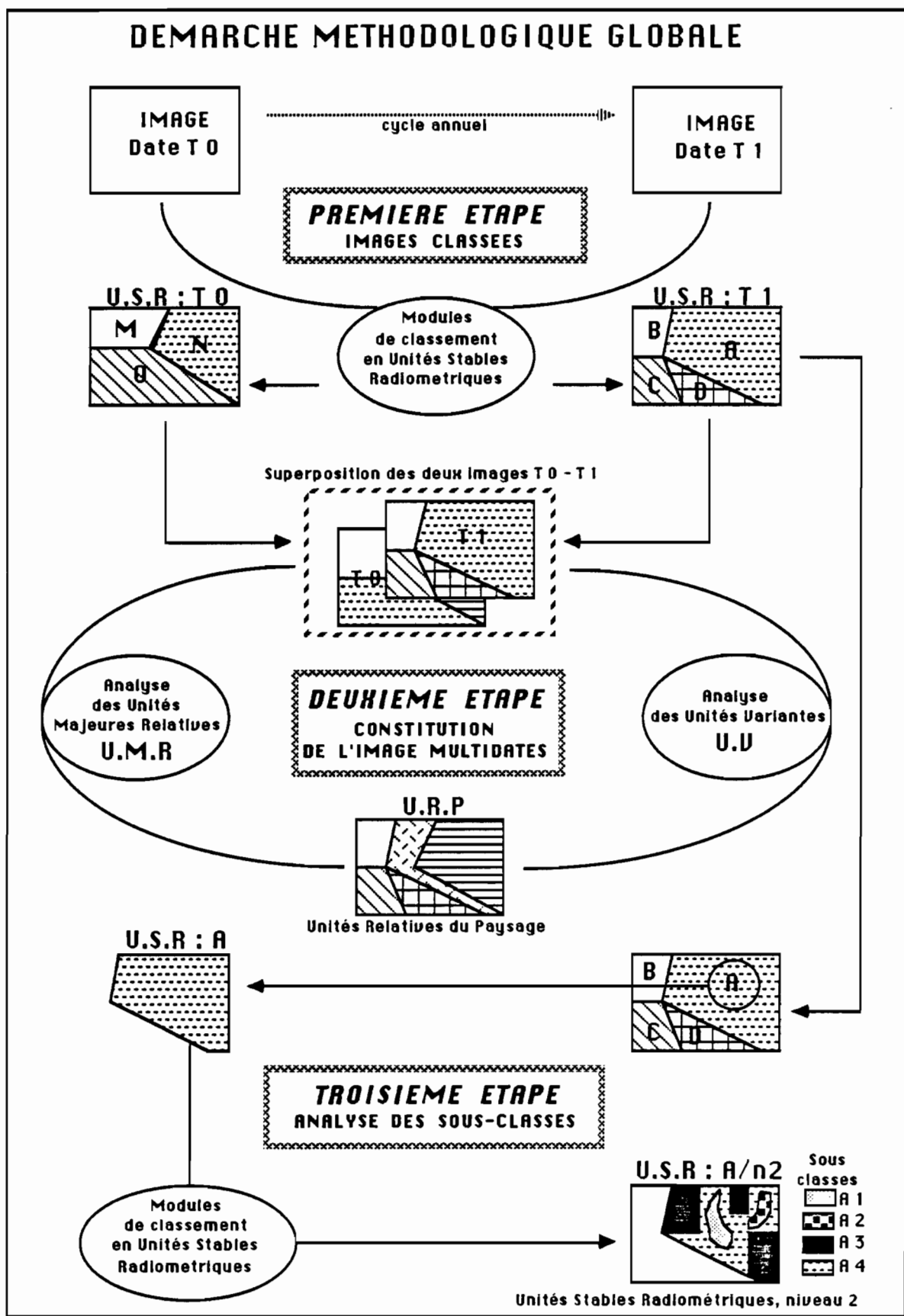


Figure n° 1

La figure n° 1 montre quelles sont les trois grandes étapes nécessaires à la réalisation d'une carte des dynamiques du paysage.

•Etape 1: recherche des unités radiométriques stables

Il est évident que la formation initiale du thématique influe sur l'interprétation des images classées pour lui permettre de formuler un "diagnostic" du paysage. Pour éviter toute dérive trop subjective sur l'interprétation des images il faut que la détermination du nombre de classes d'une image se fasse selon des méthodes de classifications automatiques. Seules ces dernières sont aptes à répondre aux exigences posées. Il faut aussi mettre au point des critères d'arrêt pertinents qui fixent automatiquement le nombre de classes optimum de l'image. Celui-ci doit être fondé sur des critères quantitatifs de stabilité des classes. L'application de ces critères permet d'obtenir des classifications de l'image en "unités radiométriques stables".

•Etape 2: réalisation des images de dynamique du paysage

On effectue ensuite un croisement des images classées en unités radiométriques stables pour obtenir des classes multidates. Parmi ces dernières on relève que certaines sont présentes à chaque date avec pratiquement les mêmes caractéristiques radiométriques. Pour cette raison on les appellera des "unités majeures relatives". Toutes les autres ont par contre varié de façon plus ou moins importante et sont désignées sous l'expression "unités variantes".

•Etape 3: analyse des sous-unités par une méthode de classification pyramidale

Il est possible qu'une classe soit trop générale sur l'ensemble de l'image et englobe des sous-classes thématiquement intéressantes pour l'étude. Il convient alors de considérer cette classe comme une image unique et de la scinder avec la même méthode en unités radiométriques stables. On obtient des "unités radiométriques stables de niveau 2".

Ce sont ces trois étapes qui vont être détaillées dans les paragraphes suivants.

4- METHODE DE RECHERCHE DES UNITES RADIOMETRIQUES STABLES

La méthode est résumée par la figure n° 2. Elle se présente comme une succession de modules chaînés permettant d'obtenir finalement une classification de l'image en unités radiométriques stables. A titre d'exemple la méthode va être appliquée sur l'image SPOT-HRV du 4 septembre 1986 du bassin de la mare d'Oursi. Il s'agit d'une image prise en fin de saison des pluies. La pluviométrie ayant été satisfaisante, certaines unités seront influencées par les facteurs de végétation et d'humidité des sols. L'ordre d'application des modules est le suivant :

- extraction d'une population échantillon
- classification automatique de la population échantillon
 - centres mobiles: partitions des images
 - classification ascendante hiérarchique (C.A.H) : filiation des thèmes
- construction de critères de décision pour:
 - la détermination du nombre optimal de classes: application dès que l'on extrait la population échantillon.
 - la détermination de la partition la plus stable dans l'intervalle précédemment défini - application sur les thèmes obtenus à l'aide de la C.A.H.
- classification finale de l'image

•PREMIERE ETAPE

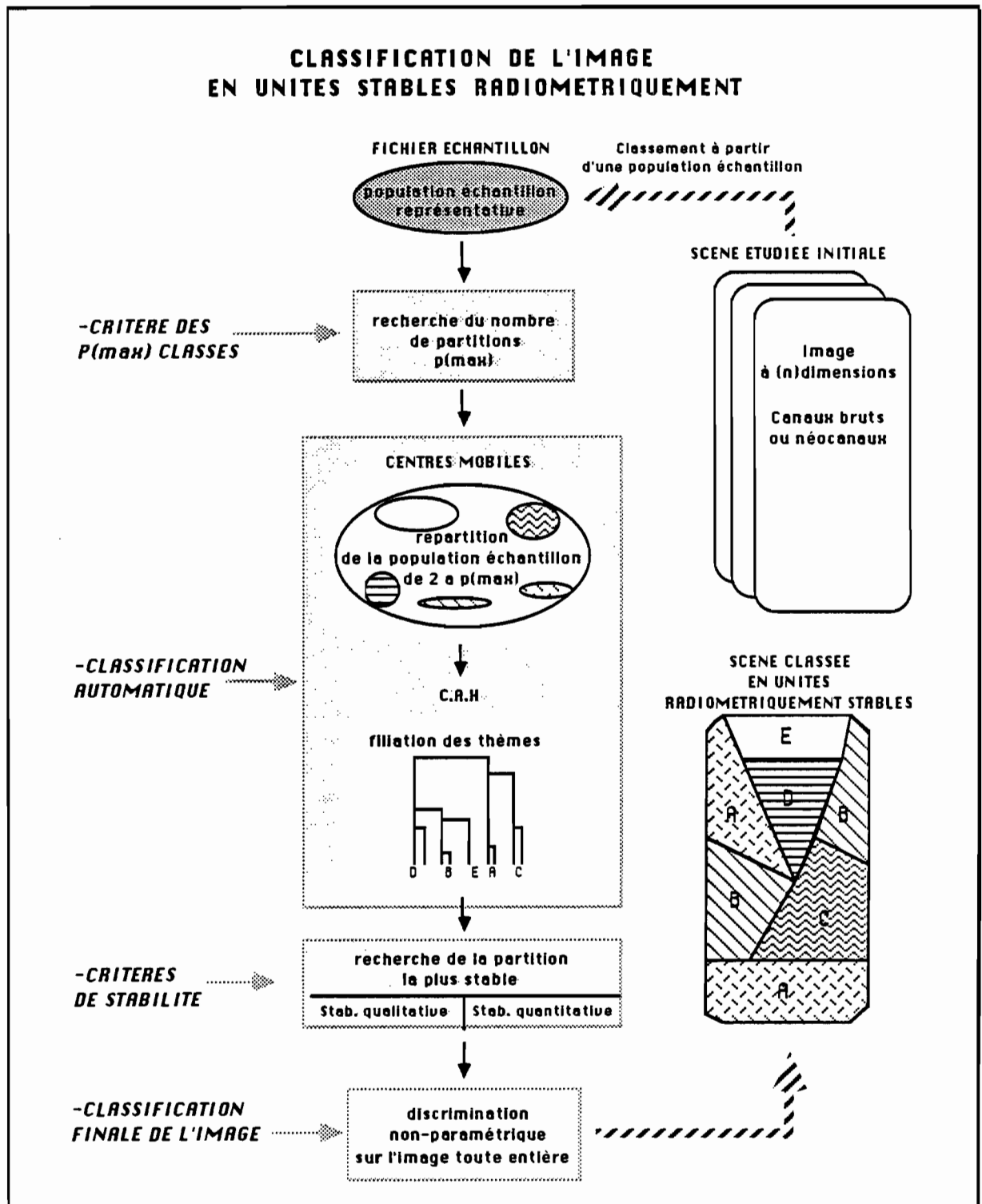


Figure n° 2

4.1- Extraction de la population échantillon

Etant donné le grand nombre de pixels contenus dans une image, l'analyse des données est faite à partir d'une population échantillon représentative. L'échantillonnage de la scène étudiée est un échantillonnage du type aléatoire systématique. Cet échantillonnage s'avère être le plus fiable. (Scherrer.B 1984). La "qualité" de représentation de la population échantillon n par rapport à la population totale N , est fonction du degré de précision que l'on désire. Dans notre cas, nous avons fixé une probabilité de 95% entre un et deux écarts-types. La formule d'application pour la recherche du nombre de pixels échantillons est la suivante :

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

où

- r = valeur associée au niveau de précision désirée.
- $\text{Var}(x)$ = variance de la variable d'étude x
- I = amplitude de l'intervalle dans lequel la moyenne de la valeur estimée doit se trouver.

Cette formule a déjà été appliquée et s'est révélée fiable pour le traitement d'images MSS Landsat (Andrianasolo H, 1986). Ici, le niveau de confiance demandé est de 95% ce qui donne $r = 1,96$. Le tableau n°1 indique les principales caractéristiques des canaux de la scène étudiée. La variance du canal XS2 est la plus forte. L'application de la formule se fera donc sur ce canal en choisissant une amplitude de deux écarts types. On obtient 622,22 soit 622 individus. Il est donc nécessaire de travailler sur une population échantillon supérieure à 622 individus pour qu'elle soit représentative de l'ensemble de la scène avec 5% de pixels d'erreur possible. Le nombre total de pixels de la zone est de 1.651.500 (soit 660,6 km²).

Tableau n° 1

IMAGE SPOT-OURS1 4 SEPTEMBRE 1986
BASSINS D'OURS1 ET DE GOUNTOUR
STATISTIQUES DES CANAUX

canal	min	max	moyenne	variance
XS1	66	123	90,53	52,43
XS2	54	148	95,88	161,97
XS3	57	146	106,40	136,52

4.2- Classification automatique

La classification automatique a pour but d'obtenir une représentation schématique simple des liens existant entre les individus d'une population en fonction d'un certain nombre de caractères appelés variables. Son but est de répartir cette population en classes homogènes à l'aide des critères de distance. Il convient de ne pas confondre classification et classement. Un classement procède par affectation des individus à des groupes préétablis. Il découle de la classification qui recherche justement des groupes homogènes. Schématiquement, on distingue deux grands groupes de méthodes en fonction du résultat désiré :

- obtention d'une hiérarchie
- obtention d'une partition unique.

Le premier groupe est représenté, par exemple, par la méthode de classification hiérarchique ascendante (C.A.H.) qui procède par agrégations successives des individus puis de groupes d'individus et par la méthode de classification descendante hiérarchique (C.D.H.) qui procède par dichotomies successives. Le second groupe est constitué de méthodes non-hiérarchiques d'agrégation autour de centres mobiles (Diday et al 1980). Ces deux groupes de méthodes seront l'une et l'autre largement utilisées pour la classification de l'image, mais pour la phase initiale de partition de la population en classes homogènes on fera appel uniquement aux centres mobiles.

-Méthode des centres mobiles

La méthode des centres mobiles permet de construire par itérations successives la partition d'une population quelconque en un nombre de classes choisies. La partition est réalisée en se fondant sur des critères de distance entre classes et entre individus (décomposition de la variance). La figure n°3 montre les trois phases de l'algorithme des centres mobiles et son résultat pour une population donnée.

La figure n° 4 a montre la partition en deux classes du bassin d'Oursi (Burkina-Faso) sur une image SPOT-HRV (4 septembre 1986). Une partition en deux classes sépare les surfaces claires des surfaces sombres de l'image. La figure n° 4 b montre pour la même image une partition en trois classes. La troisième classe apparue est une classe dominée par la végétation chlorophyllienne active. Les deux partitions indiquent bien une réalité thématique mais la seconde est plus précise. Il en sera de même si l'on demande un grand nombre de classes, par exemple, supérieur à 30. Ceci illustre bien le fait que le problème de la recherche des critères de détermination de la partition maximum doit être abordé autrement que par une simple approximation.

4.3- Calcul du nombre maximum de classes

L'utilisation de la classification en centres mobiles doit comporter un critère d'arrêt pour répondre aux exigences de fiabilité et d'efficacité énoncées plus haut. En effet en théorie le nombre de partitions qui peut être appliqué à une population échantillon est égal au nombre d'individus - 1. La détermination du nombre maximum de classes au sein d'une population est un problème complexe. Néanmoins, des statisticiens ont tenté de résoudre mathématiquement ce problème (Deroo-Dussaix 1980). Ils proposent la formule suivante :

$$K < 5 \text{ Log } n.$$

où:

-n est la population échantillon

-K est le nombre maximum de classes que contient une population

En l'appliquant à la population échantillon calculée pour le canal XS2 parce qu'il possède la variance la plus grande, le nombre maximal de classes possibles est inférieur à 13,97. Le découpage de cette population échantillon en "strates fortes" représentatives des unités radiométriques du paysage comportera nécessairement moins de 14 classes.

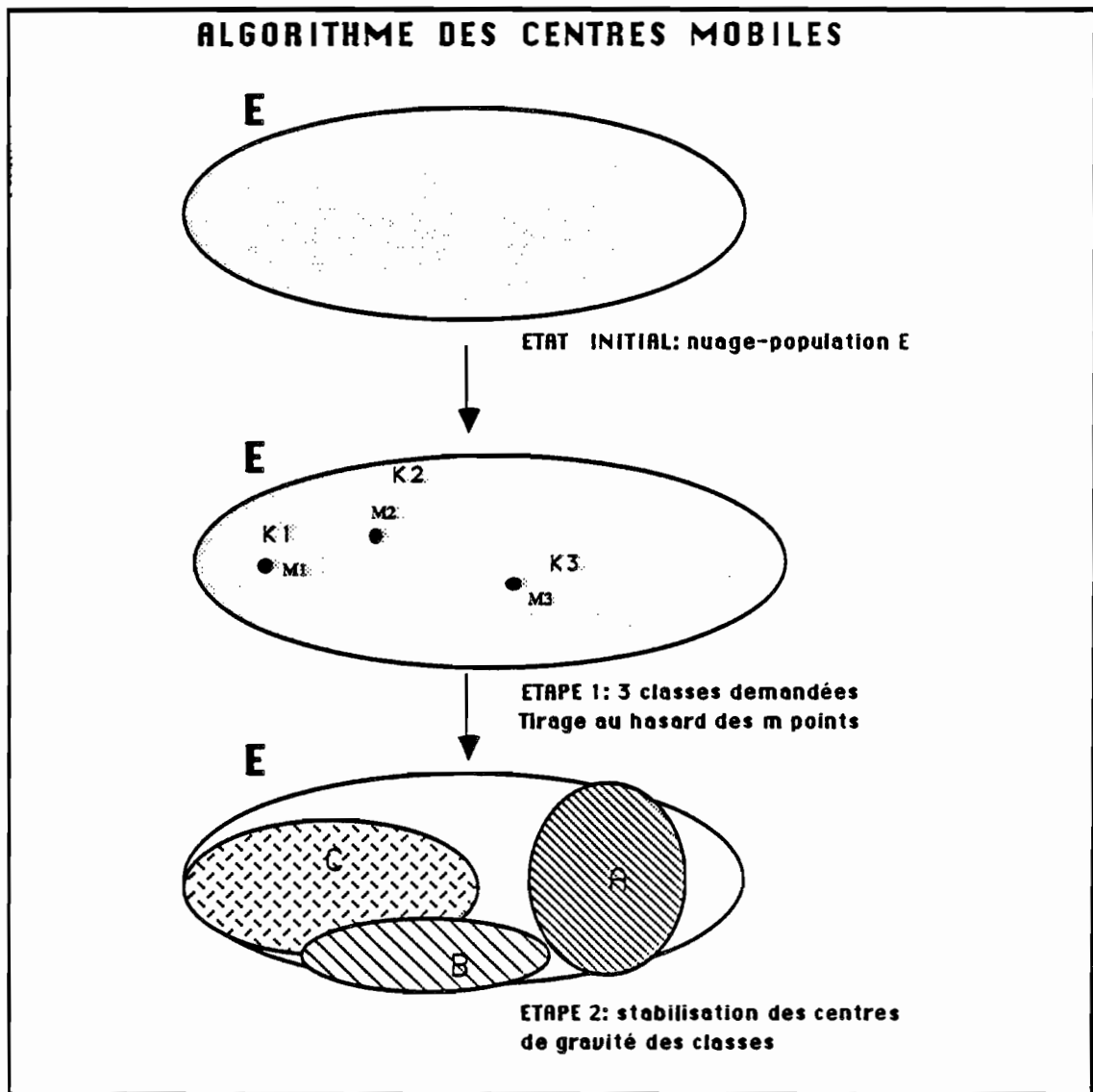


Figure n° 3

TRAITEMENTS NON-DIRIGES AVEC LES CENTRES MOBILES
Classification de l'image SPOT-HRV 4 septembre 1986



Figure n° 4 a

EN 2 CLASSES



Figure n° 4 b

EN 3 CLASSES

4.4- Partition de la population échantillon

Nous allons donc scinder la population échantillon sur les variables qui sont ici les axes factoriels 1 et 2 avec la méthode de classification des centres mobiles. La méthode est appliquée en augmentant successivement d'une unité le nombre de classes demandées à chaque partition entre 2 et 14 partitions. Les tableaux 2 et 3 sont des exemples de résultats obtenus après une partition en quatre et cinq classes.

La lecture conjointe de ces deux tableaux appelle deux commentaires:

- Les numéros de classes des deux partitions successives ne correspondent en aucune façon. Il est donc nécessaire d'appliquer aux résultats des partitions une méthode de classification pour établir la filiation des classes.

- l'apparition d'une classe supplémentaire lorsque l'on passe de 4 à 5 classes affecte l'ensemble des classes. Toutefois, l'intensité de l'instabilité des centres de classes touche inégalement ces dernières.

Tableau n° 2

CENTRES MOBILES

PARTITION EN QUATRES CLASSES

Image SPOT-Oursi 4 septembre 1986

VARIABLES	POPULATION (2700)	CLASSE 1 (361)	CLASSE 2 (941)	CLASSE 3 (387)	CLASSE 4 (1011)	
AXE 1	1	123,5	82,0	121,8	86,5	154,0
	2	32,0	20,5	12,3	21,0	14,4
AXE 2	1	170,0	202,5	182,6	127,3	163,0
	2	27,5	14,9	14,2	23,5	16,5

1: moyenne des classes ; 2: écart-type des classes

Tableau n° 3

CENTRES MOBILES

PARTITION EN CINQ CLASSES

Image SPOT-Oursi 4 septembre 1986

VARIABLES	POPULATION (2700)	CLASSE 1 (792)	CLASSE 2 (848)	CLASSE 3 (485)	CLASSE 4 (309)	CLASSE 5 (266)	
AXE 1	1	123,5	156,9	117,5	133,8	79,7	75,2
	2	32,0	13,8	12,3	15,6	17,5	19,6
AXE 2	1	170,0	172,5	186,9	146,2	124,7	204,6
	2	27,5	11,5	12,4	12,8	24,7	15,7

1: moyenne des classes ; 2: écart-type des classes

4.5- Evaluation de l'intervalle de stabilité

Cette opération consiste à situer l'intervalle de classes dans lequel se trouve la partition la plus stable c'est à dire celui contenant le plus de classes stables radiométriquement comme cela sera étudié ultérieurement. Elle n'est pas décrite dans le corpus de modules mais possède un réel intérêt pratique pour une automatisisation future. Cet intervalle que nous appelons "fourchette" possède un double intérêt :

- accélérer la phase préliminaire de calcul, la recherche des filiations des unités thématiques se faisant uniquement dans l'intervalle de classes considéré.
- mettre en évidence les paliers de stabilité successifs entre les partitions minimum et

Pour déterminer cette fourchette, on emploie la méthode de classification ascendante hiérarchique (C.A.H.). Celle-ci est appliquée à l'ensemble des classes des partitions obtenues entre les partitions minimum et maximum (ici entre 2 et 14). Sur la scène du 4 septembre 1986 la somme des classes est de 104. La C.A.H. fournit plusieurs paramètres intéressants pour notre étude comme nous le verrons lors des phases d'interprétation des résultats. Pour l'instant, on s'intéresse uniquement à la description de la hiérarchie du graphe appelé "arbre hiérarchique" ou dendrogramme.

Pour calculer la "fourchette" nous allons corrélérer deux variables : les "noeuds" de liaison et le "niveau" de cette liaison. Les "noeuds" symbolisent la liaison entre individus ou groupes d'individus et le "niveau" en indique la force. C'est à partir du résultat de cette corrélation que nous pouvons déterminer la "fourchette". Sur la figure n°5 nous avons les noeuds en abscisse et les niveaux en ordonnée. La progression de cette courbe est logarithmique. La fourchette est placée de part et d'autre du point d'inflexion concave de la pente. On se reporte ensuite au graphe n°5. Il nous indique que la partition la plus stable se trouve être une classe supérieure à la septième partition.

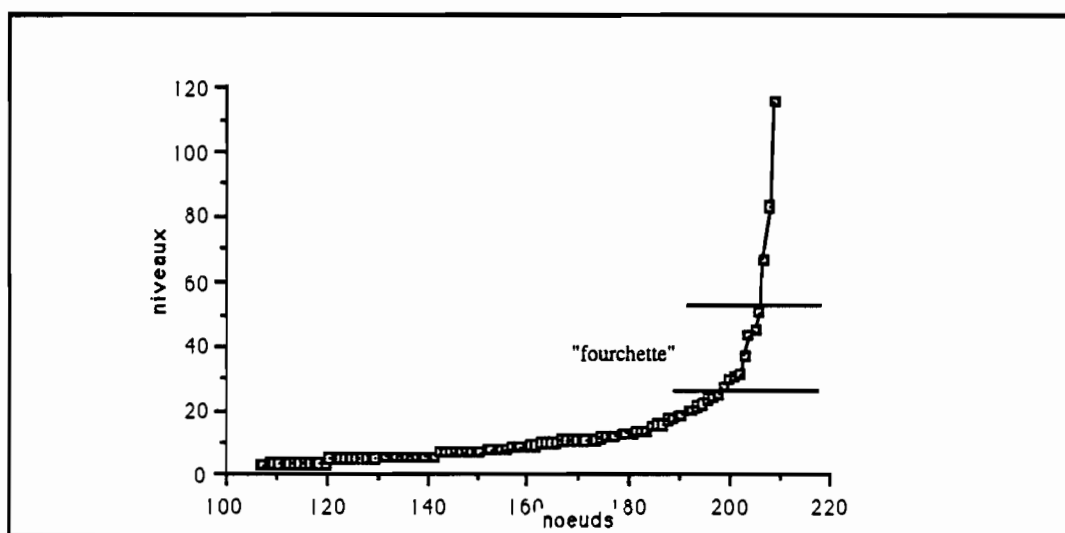


Figure n° 5

DETERMINATION DE LA "FOURCHETTE" DE STABILITE

Image SPOT-Oursi 4 septembre 1986

4.6- Filiation des classes

Nous avons vu précédemment que la méthode des centres mobiles était appliquée de façon croissante à la population échantillon. Cela étant, on peut se demander s'il existe une filiation des classes lorsque nous passons d'une partition P_i à une partition P_{i+1} pour les classes déjà présentes. Si ces classes persistent au cours des partitions successives depuis leur apparition jusqu'à la partition P_{max} , on parlera alors d'unités. Bien sûr, ces "unités" subiront, plus ou moins marqués selon la densité de leur centre de gravité, des déplacements au sein du nuage statistique. La signification thématique variera et ira en s'affinant, mais la filiation étant connue, on peut alors interpréter le sens du déplacement des unités instables.

La figure 5 a,b,c présente les graphes des couples de partition 4/5, 5/6, 6/7. On voit nettement qu'il existe une filiation pour les quatre unités déjà présentes dans la partition quatre. Pareillement, chaque nouvelle unité apparue par la suite, possède une filiation dans les partitions suivantes. Ces graphes servent aussi à observer le degré de filiation d'une unité.

Cependant, s'agissant ici d'une phase exploratoire, la validité thématique des filiations des thèmes est vérifiée sur écran couleur en mode inter-actif. On a pu mettre facilement en relation les unités spatiales visibles sur écran et l'évolution de ces mêmes unités sur ces graphes. Cette vérification a été faite systématiquement durant la phase de mise au point de la démarche. Ceci a permis de comprendre visuellement l'apport d'information supplémentaire induit par l'apparition de nouvelles classes et leur évolution à la fois spatiale et thématique quand on augmente le nombre de classes. Par la suite, l'analyse des résultats statistiques, mieux maîtrisée, s'est révélée suffisante pour suivre l'évolution des signatures spectrales au cours des partitions successives. L'étude de l'évolution des signatures spectrales des unités est intéressante à deux niveaux:

- elle permet de suivre spatialement le déplacement des centres de gravité des classes au sein du nuage à chaque nouvelle partition.
- elle permet de mettre en évidence de manière concrète la notion de stabilité radiométrique des différentes unités à chaque étape.

La figure n° 6 montre l'évolution des signatures spectrales pour quelques thèmes au cours des partitions 4, 5 et 6. Le tableau n° 4 indique pour l'image du 4 septembre 1986 quelles sont les filiations des classes entre 3 et 14 partitions. Il peut arriver que des filiations ne soient pas complètes. C'est le cas sur ce tableau où la partition en 11 classes fait apparaître un thème nouveau (112) qui persiste à la partition 12 (1211) pour disparaître ensuite.

Tableau n° 4

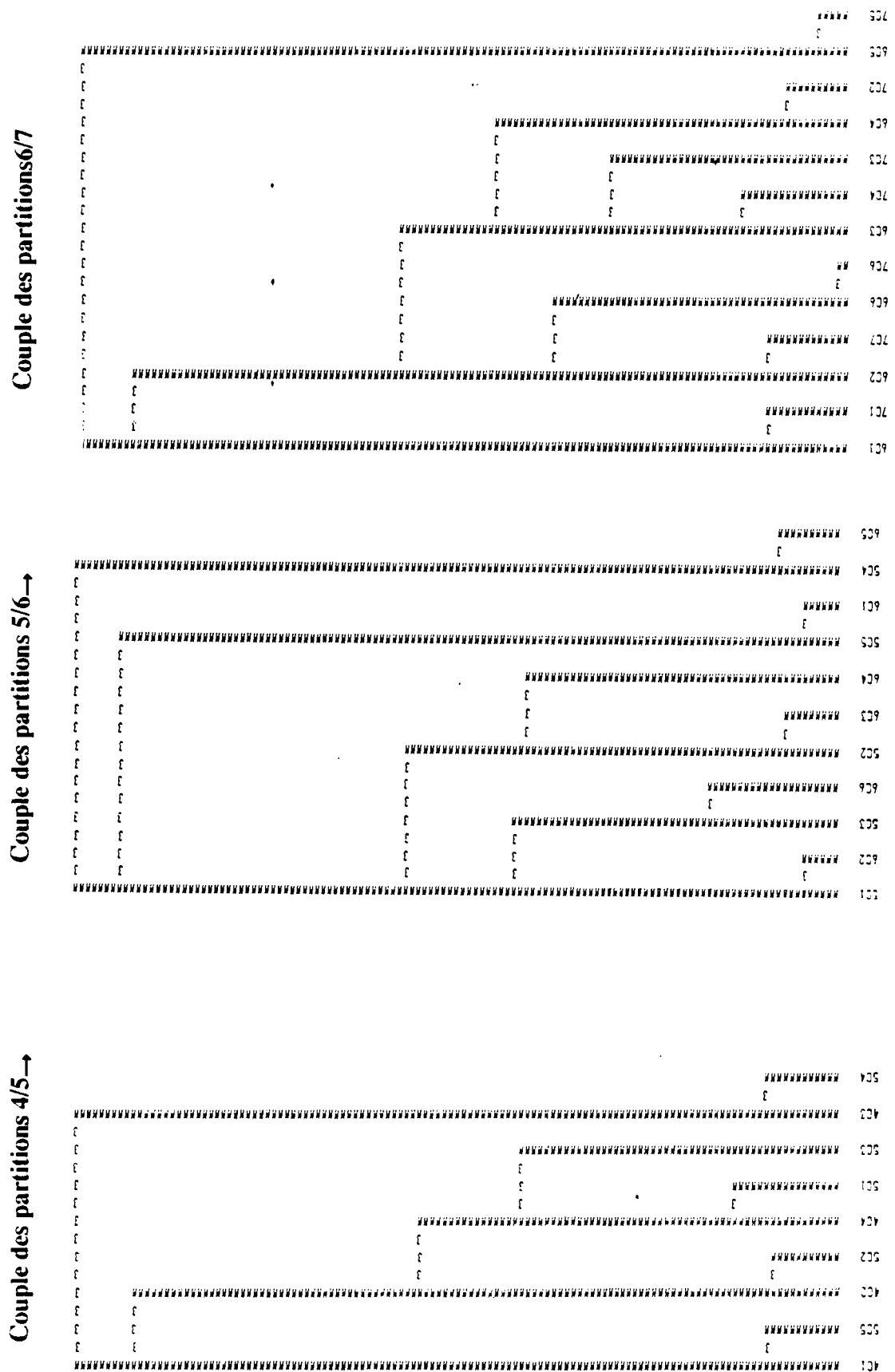
FILIATION DES CLASSES ENTRE 3 ET 14 PARTITIONS

Image du 4 septembre 1986

PARTITIONS	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
FILIATION												
1	31	42	52	63	74	82	92	1010	115	127	139	1414
2	32	44	51	62	77	85	93	108	116	129	1313	1412
3	33	43	54	65	75	88	94	104	1111	122	132	141
4		41	55	61	71	86	95	109	113	125	131	1411
5			53	66	76	81	96	103	114	1210	135	145
6				64	72	84	97	101	119	121	1310	146
7					73	83	91	106	117	123	137	1410
8						87	98	107	111	126	133	1413
9							99	102	118	128	1312	142
10								105	1110	124	134	149
11										1212	138	147
12											1311	144
13											136	143
14												148
15									112	1211		

Figure n° 5

**PARTITIONS DE L'IMAGE DU 4 SEPTEMBRE 1986
AVEC LA MÉTHODE DES CENTRES MOBILES**



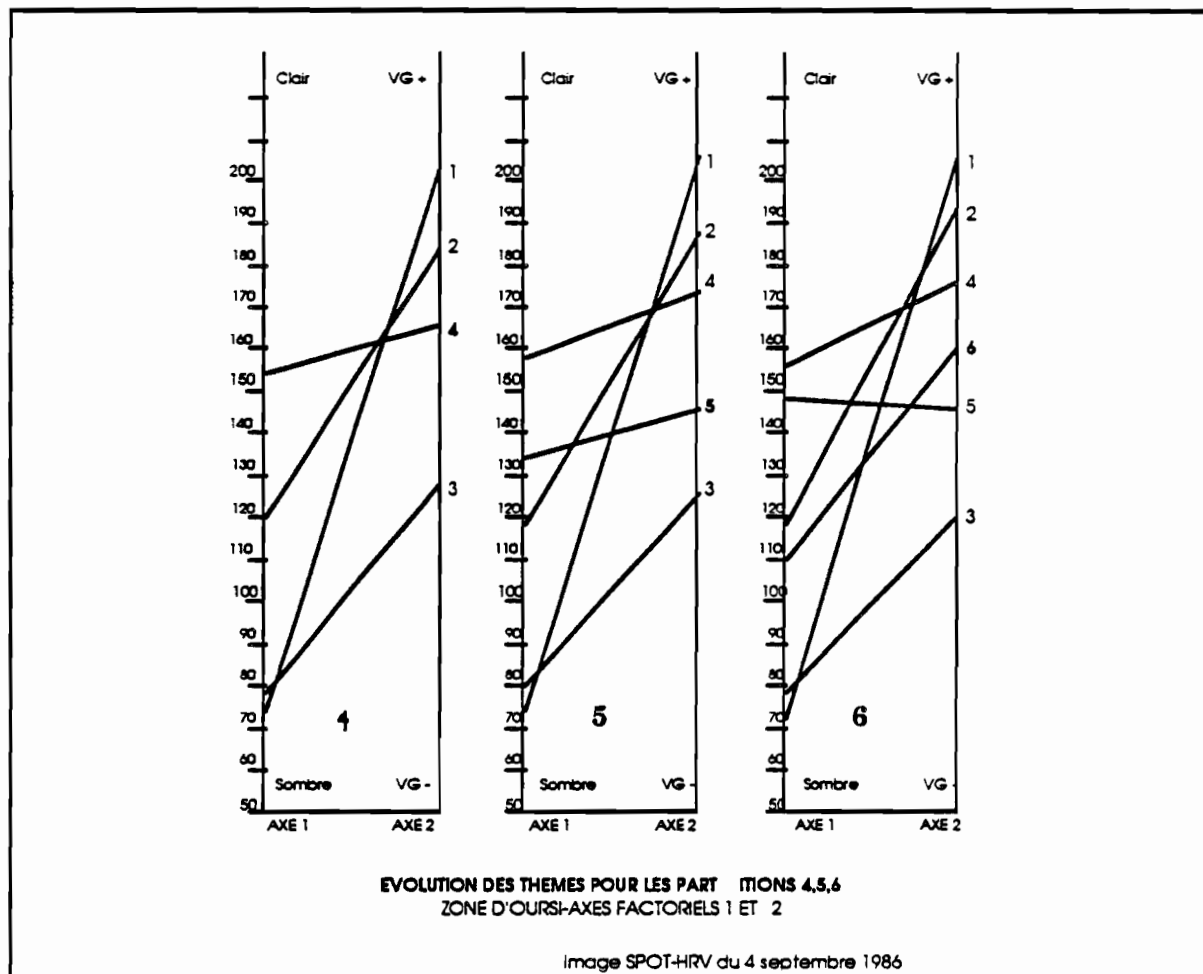


Figure n° 6

4.7- Critères de stabilité des classes

Le principe de la classification en centres mobiles repose sur des critères de stabilité définis en fonction de distance entre individus et entre classes. Partant de là, on peut supposer qu'il existe une partition dont la stabilité générale est plus grande que pour les autres partitions. On peut aussi émettre l'hypothèse suivante : la stabilité maximum réalisée par une partition $P_{stab\ max}$ offre la meilleure lecture d'un paysage en fonction d'un instant t donné (la prise de vue) et pour une population P donnée. Cette population possède à son tour deux groupes de variables bien distincts :

- le nombre de pixels de la scène étudiée (surface représentée, localisation des pixels en lignes et colonnes).
- les valeurs radiométriques correspondant aux longueurs d'ondes spectrales déterminées par les canaux des capteurs.

La question fondamentale est la suivante : *existe-t'il des méthodes objectives pour stabiliser une population quelconque en classes homogènes?*

Ce problème dépasse largement le cadre de nos applications télédéetectives. En mathématiques appliquées, c'est même un des problèmes majeurs non résolus. Des formules approchées permettent de segmenter une population en un certain nombre de classes. C'est d'ailleurs l'une d'entre elles que nous appliquons pour calculer le nombre maximum de classes possibles pour la scène du 4 septembre 1986. Pourtant rien ne prouve que cette partition maximale possible soit la plus stable dans l'intervalle de classe considéré.

Dans ces conditions, il convient aussi de mettre au point des critères de stabilité permettant de trouver la partition rassemblant le plus d'unités stables. Pour la mise au point de ces critères, nous avons été aidé par Andrianasolo.H, statisticien et télédéetecteur à l'O.R.S.T.O.M. Précisons tout de suite que, si ces critères se sont avérés satisfaisants pour notre étude, rien ne prouve qu'ils le soient pour d'autres champs d'application.

Les critères de stabilité proposés se greffent directement sur les résultats obtenus par la méthode des centres mobiles. *Ce que l'on désire c'est hiérarchiser ces informations afin de leur donner une signification thématique.* Une hiérarchisation de l'image en classes fortes constitue uniquement le point de départ d'une classification ordonnée de façon pyramidale qui fait l'objet de la troisième étape. La signification thématique des classes ainsi ordonnées est établie de manière plus aisée.

4.7.1- Logique du raisonnement

Dans l'un des paragraphes précédents nous avons pris soin d'expliquer la méthode des centres mobiles. Au delà même des aspects mathématiques c'est la signification théorique du mode de partition effectué par les centres mobiles qui nous intéresse ici. Cette signification prend un sens pratique par l'utilisation que l'on en fait dans notre démarche.

L'aspect déterminant dans cette partie, engageant l'application du modèle à la réalité d'une image satellitaire, réside dans l'étude faite sur la filiation des thèmes en nombre croissant de partitions. On part du principe qu'une image satellitaires hiérarchisée selon le critère de la stabilité maximum sera la plus représentative du paysage "réel" à un instant donné et en fonction des domaines de longueurs d'ondes prospectés par les capteurs utilisés.

Nous désirons déterminer quelle sera la partition comprise entre 2 et P_{max} partitions, qui possèdera la plus grande stabilité. L'étude de la filiation des unités dans un espace bi-dimensionnel introduit le contrôle possible de l'évolution de ces unités au cours des partitions successives. L'interprétation des déplacements peut être réalisée pour chaque partition et une signification thématique peut être affectée à chaque unité.

Certaines partitions provoquent des déplacements importants des centres de gravité des thèmes. D'autres, à l'inverse, sont minimales ou n'affectent que quelques thèmes du nuage. Rappelons aussi que pour réduire la part d'arbitraire introduite par la méthode des centres mobiles on effectue cinq essais successifs par partition puis on conserve le meilleur, c'est-à-dire celui possédant la plus grande inertie.

Soit la partition d'une population P en i classes. Soit une nouvelle partition de cette population notée $P_i + 1$ et possédant une classe de plus que P_i . Le chapitre précédent a introduit le contrôle possible de la signification des unités et leur évolution au cours des partitions successives. Nous pouvons suivre le déplacement des thèmes dans un espace bi-dimensionnel. L'apparition de la classe 1 au sein du nuage déséquilibrera plus ou moins intensément les centres de gravité des unités déjà apparues. En réitérant cette opération entre P_{min} et P_{max} , on note qu'il existe plusieurs paliers de stabilité. On retient en définitive l'image classée dont le palier de stabilité est le plus fort.

En visualisant sur écran les partitions successives dans un premier temps et en effectuant les calculs de stabilité dans un second temps, nous avons constaté un fait intéressant en comparant les résultats obtenus par les deux méthodes d'approche:

- on observe dans bien des cas, qu'un déplacement minimum des centres de gravité, consécutif à l'apparition d'une nouvelle classe, affecte peu la signification des thèmes déjà répertoriés. Lorsqu'une dégradation spatiale s'effectue, elle est souvent le fait d'une unité précise. Non seulement le nouveau thème apparu dans ces conditions a une signification précise, mais il permet souvent une meilleure analyse globale de l'image. Le nouveau thème contribue à mieux caractériser les thèmes radiométriquement les plus proches de lui. A l'inverse, une forte instabilité constatée impliquera un changement dans la signification des thèmes déjà apparus.

La "densité" du centre de gravité d'une unité est donc plus déterminante pour déduire la stabilité de cette unité que le nombre d'individus qu'elle contient. De nombreux essais effectués dans le cadre de cette étude ont montré que la stabilité d'une classe dépend bien en premier lieu de sa "densité" représentée par sa signature spectrale. C'est pourquoi le principal critère de stabilité se basera sur l'étude de la stabilité des signatures spectrales des unités lors des partitions successives et ce pour chacun des canaux pris en compte.

4.7.2- Critère de stabilité des signatures spectrales

Une fois connu l'intervalle P2-Pmax il faut rechercher la partition la plus stable. Il est donc nécessaire d'établir pour chaque thème apparu à chaque nouvelle partition lui succédant sa filiation si elle existe. Pour cette opération, l'utilisation de la C.A.H. s'avère efficace. Elle est appliquée aux couples de partitions successives. Il y a donc une permanence thématique pour certaines classes lorsque l'on augmente progressivement d'une unité le nombre de classes. Ce fait est vérifié aisément en construisant pour chaque classe apparue sa "signature spectrale" et en notant ensuite son évolution aux partitions supérieures.

D'autre part une classe peut fort bien n'avoir qu'une quantité restreinte d'individus et être très stable. A l'apparition d'une nouvelle classe consécutive à une partition incrémentée d'une unité, seuls les individus placés en périphérie des classes sont "déstabilisés" et "s'échangent" facilement. Dans ce cas les individus se retrouvent soit dans la nouvelle classe apparue soit glissent vers un thème voisin. Ceci est évidemment une image. En fait, les individus restent en place. Ce sont les centres de gravité qui se déplacent à l'intérieur du nuage. Il suffit de calculer la différence de déplacement des thèmes dont on connaît maintenant la filiation lorsque l'on passe d'une partition P à une partition P+1 dans l'intervalle fixé. Le résultat obtenu est forcément intermédiaire entre deux partitions successives (4/5, 5/6, etc, ...). C'est pourquoi il est nécessaire de faire appel à un second critère susceptible de différencier les deux partitions.

•Application à l'exemple

Le principe d'application de ce critère est simple : il consiste à calculer la différence du déplacement de chaque thème sur chaque variable lorsque ce thème passe des partitions P_i à $P_i + 1$ (couple 2,3 ; 3,4 ; 13,14). Cette opération est renouvelée pour chaque thème. Le résultat se situera donc toujours entre deux partitions (3/4 ; 4/5 ; 5/6 etc ...). On fait ensuite la somme à chaque "entre partition" des résultats obtenus pour chaque thème. Le tableau n° 5 a montre les sommations pour 10 thèmes apparus à partir des centres mobiles calculés sur l'image du 4 septembre 1986. On remarque d'emblée que certaines "entre partitions" sont relativement stables alors que d'autres sont affectées d'une grande instabilité. Pour déterminer l'"entre partition" la plus stable il est nécessaire de rapporter les totaux des colonnes au nombre de thèmes compris dans "l'entre partition" considérée. On note les résultats calculés sous forme d'indice. Par exemple sur "l'entre partition" 8/9 il existe 8 thèmes : ce qui donne $8/67,6 = 0,12$. Le tableau n° 5 b indique l'indice pour chaque "entre partition" Plus l'indice est fort plus "l'entre partition" est stable.

Tableau n° 5 a

TEST DE STABILITE DES SIGNATURES SPECTRALES
sur les partitions issues de l'analyse en centres mobiles

ZONE D'OURSI - Image SPOT-HRV DU 4 septembre 1986

ENTRE PART.*	3/4	4/5	5/6	6/7	7/8	8/9	9/10	10/11	11/12	12/13	13/14
THEMES											
1	28,5	8,6	5,6	13,8	2,5	7,0	4,5	0,9	16,7	10,1	17,6
2	9,0	12,4	3,6	10,1	0,4	17,7	3,5	11,0	13,7	5,7	5,4
3	3,1	9,4	7,2	4,7	24,3	2,3	0,5	2,3	1,5	1,4	1,3
4		8,9	3,4	8,3	10,9	4,8	1,3	0,9	23,4	21,4	13,8
5			13,3	1,0	1,3	11,8	3,1	3,3	10,9	10,9	11,9
6				8,0	5,5	10,7	22,9	5,5	26,5	14,0	2,1
7					1,7	8,1	4,6	2,0	14,7	3,8	8,8
8						5,2	10,8	2,6	20,0	16,1	1,6
9							3,0	10,8	6,6	11,7	10,1
10								4,4	9,1	4,2	13,8
TOTAL	40,6	39,3	33,1	45,9	46,6	67,6	54,2	43,7	143,1	99,3	86,4

Tableau n° 5 b

RESULTATS DU TEST DE STABILITÉ DES SIGNATURES SPECTRALES
sous forme d'indice rapporté au nombre de thèmes des "entre partitions"

ENTRE PARTITIONS	3/4	4/5	5/6	6/7	7/8	8/9	9/10	10/11	11/12	12/13	13/14
INDICE	0,07	0,10	0,15	0,13	0,15	0,12	0,17	0,23	0,07	0,10	0,12

De façon évidente la meilleure stabilité est obtenue lorsque nous passons des partitions 10 à 11 (indice 0,23). Remarquons aussi que les partitions se trouvent bien dans la fourchette estimée lors de la précédente étape.

4.7.3- Critère de stabilité quantitative

La fonction de ce critère est uniquement la détermination de la partition la plus stable et son application facile. On procède de la manière suivante :

- pour les deux partitions retenues, on calcule le nombre relatif de pixels de chaque thème. Dans ces conditions, une stabilité quantitative parfaite pour un thème sera notée 100 (pas de variation du nombre de pixels échantillon pour ce thème).
- la partition la plus stable est celle qui réunit dans un intervalle fixé autour de la valeur centrale (90% - 110%) le plus grand nombre de thèmes.

•Application à l'exemple

Le tableau n° 5c indique les résultats de cette dernière étape. Il est exprimé en pourcentage relatif pour chaque unité entre deux partitions successives. Idéalement, une non-variation quantitative sera notée 100. C'est autour de cette valeur centrale que nous avons établi notre critère : dans un intervalle compris entre 90 et 110 % on calcule le nombre de thèmes stables

C'est la partition en 11 thèmes qui se révèle la plus stable radiométriquement à la date du 4 septembre 1986 pour la scène considérée.

Tableau n° 5 c

TEST QUANTITATIF *

ZONE D'OURSI - Image SPOT-HRV du 4 septembre 1986

Partitions	10	11
Classes		
1	82	97
2	93	76
3	100	94
4	94	104
5	90	89
6	62	94
7	88	105
8	69	90
9	118	187
10		90

* en % relatif à la partition précédente

4.8- Classification de l'image

Pour extrapoler la classification obtenue sur la population échantillon à la population totale de la scène, plusieurs méthodes issues de l'analyse des données sont possibles. Les plus simples effectuent la classification uniquement à partir des centres de classes qu'on fournit en fonction d'un type de distance. Par exemple la distance euclidienne.

- Discrimination non paramétrique

Après plusieurs essais l'analyse discriminante non paramétrique (DNP) s'est avérée la plus fiable. L'analyse discriminante est une méthode de description et d'estimation puissante. Elle permet de mettre en évidence les liaisons entre un caractère à expliquer que l'on nommera l'identifié et des caractères explicatifs. Ici les identifiés sont représentés par les classes et les identifiants seront les variables radiométriques.

On utilise la DNP asymptotiquement efficace au sens de Bayes (Celeux et Chevallier, 1982). La DNP effectue une segmentation permettant une interprétation simple des classes *a priori*. Dans le cas présent, il s'agit des classes issues des centres mobiles en 11 classes. Il est nécessaire de mettre un test d'arrêt en fournissant en particulier le nombre minimum d'éléments du segment à découper. L'analyse consiste à séparer les segments par coupure optimale. Elle segmente la population d'un niveau 1 en deux classes disjointes d'un niveau 2 par segmentation itérative jusqu'à vérification du test d'arrêt.

Il est indispensable lorsque l'on effectue une classification de vérifier la pertinence de l'algorithme employé. Cette vérification se fait en comparant les moyennes des classes de la population échantillon à celles des classes de l'image pour les deux variables considérées. La corrélation entre les deux variables est très forte : 0,997 pour l'axe factoriel 1 et 0,998 pour le second (figure n° 7 a et b).

CORRELATIONS POPULATION-ÉCHANTILLON/POPULATION-IMAGE
À PARTIR DES CENTRES DE CLASSES
 Image du 4 septembre 1986

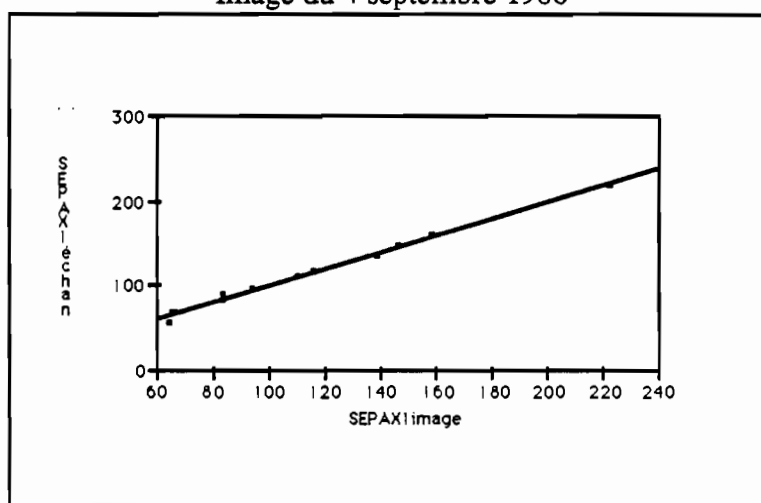


Figure n° 7 a

AXE 1

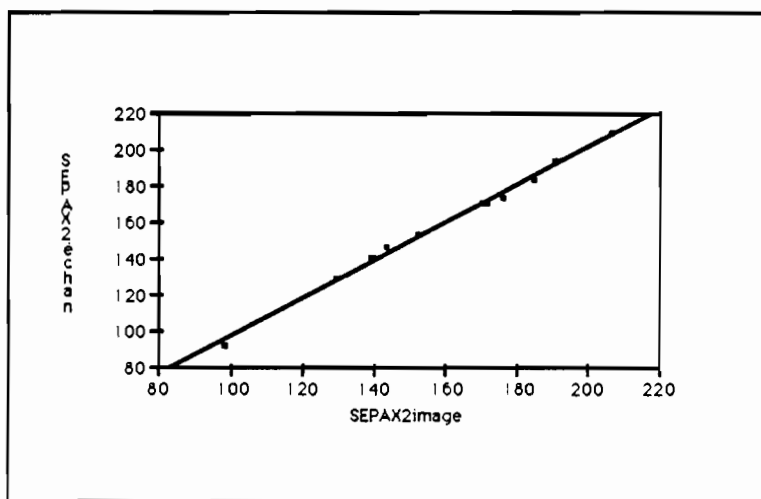


Figure n° 7 b

AXE 2

5- IMAGE DES DYNAMIQUES DU PAYSAGE

5.1- Principes de constitution d'une image dynamique

L'ensemble des modules exposés précédemment permet de générer une image en classes stables. Ceci a été vérifié expérimentalement. Quelques risques de confusion sont toutefois possibles entre certains éléments du paysage de nature différente et qui se regroupent dans une même classe (par exemple les cuirasses ferrugineuses et l'eau libre turbide).

Pour illustrer l'étape de la classification en classes stables nous avons choisi une image de saison des pluies au Sahel. A cette période, de nombreux contrôles terrain au sol étaient disponibles (voir chapitre VI). Les résultats des corrélations entre contrôle terrain et classes radiométriques stables sont à cet égard éloquentes. Les confusions relevées sont facilement détectables. Mais il serait abusif d'affirmer qu'il s'agit bien là des grandes unités du paysage:

- d'une part, parce que les unités stables radiométriques générées présentent des confusions (même faibles et acceptables).
- d'autre part, parce qu'une prise de vue satellitaire à un instant t donné est le reflet d'un état résultant des conditions climatiques et bioclimatiques de cet instant.

Il est possible d'envisager le problème autrement: le paysage est avant tout une entité dynamique et évolutive, dont l'étude à partir d'une seule vue ne permet pas de percevoir, ou très mal, les flux dynamiques qui l'animent. Même si intuitivement, et en connaissant bien la zone d'étude, on saisit certaines relations qui lient les classes entre elles, il est délicat de prévoir l'évolution que subiront ces classes puisqu'elles dépendent en partie des facteurs climatiques et bioclimatiques. Donc si l'on veut caractériser des unités de paysage il est nécessaire de mesurer leur potentiel dynamique à l'intérieur d'un intervalle de temps $t_0 - t_1$. Les deux dates se succèdent à l'intérieur d'une période du cycle annuel et sont choisies en fonction de la modification d'une variable ou d'un groupe de variables que l'on veut observer au cours de cette période temporelle. Ce procédé offre trois avantages :

- établir une échelle de stabilité des unités (par différenciation de la réponse radiométrique aux deux dates).
- caractériser les processus écologiques qui ont agi durant cette période.
- atténuer la part de confusion existant dans certaines unités.

5.2- Formation de l'image multodate

Avant toute chose, il faut vérifier que les images sont bien calées géométriquement et procéder si nécessaire à un recalage. Pour les valeurs radiométriques aucun recalage n'est effectué. Cette opération est inutile dans la mesure où:

- chaque image est traitée séparément.
- la conjonction image ne fait intervenir qu'un recoupement spatial du contour des unités générées.

De même, on ne procède à aucun réétalement des valeurs de l'histogramme sur les deux images pour éviter une distorsion les rendant incompatibles radiométriquement. Dans de telles conditions, on peut se demander si la réalisation d'une image multodate à partir de deux images déjà organisées et hiérarchisées est une opération bien fondée. En fait, c'est l'objectivité de la méthode de classification appliquée rigoureusement de la même manière aux deux images qui le permet. L'association d'une méthode non-dirigée (centres mobiles) et de critères de stabilité des signatures spectrales est le garant d'une classification optimum de l'image.

• DEUXIEME ETAPE

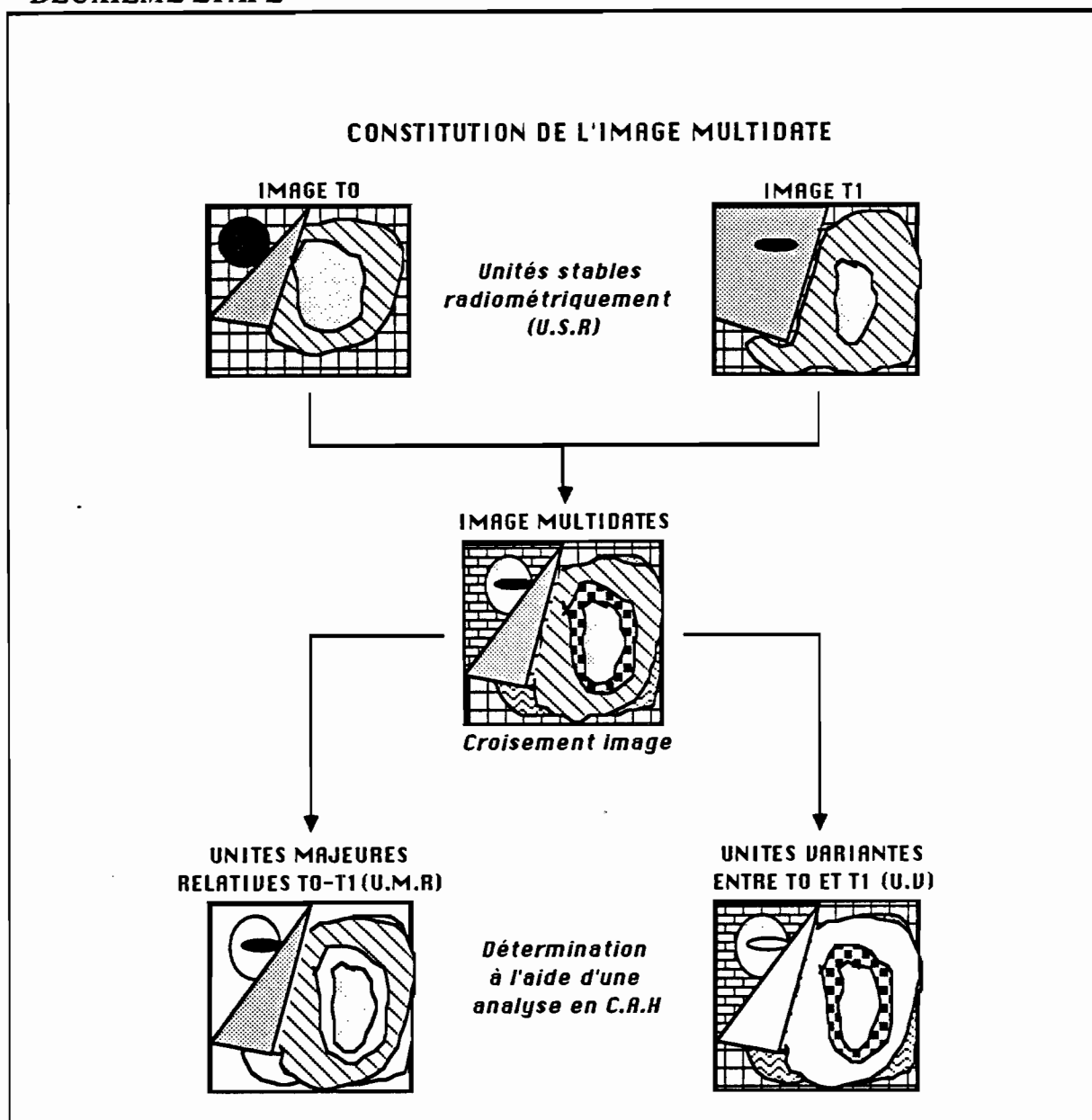


Figure n° 8

Concrètement la construction d'une image des dynamiques du paysage se fait en superposant les deux images classées aux dates retenues. L'image générée contient toutes les unités multirates et mélange deux grands ensembles d'unités selon leur stabilité thématique:

- les unités présentes aux deux dates que l'on qualifiera d'**unités majeurs relatives (U.M.R)**.
- les unités uniquement présentes à l'une des deux dates qui sont regroupées sous le terme d'**unités variantes (U.V)**.

Pour discerner entre ces deux grands groupes il faut définir des critères de hiérarchisation des unités à partir de la manifestation de deux grandes tendances: la stabilité thématique de certaines unités quand on passe d'une date à l'autre - l'évolution thématique des autres unités durant la même période. Pour cela on utilise encore une fois la classification ascendante hiérarchique. La figure n° 8 indique les opérations nécessaires pour obtenir une image multirate et son classement en U.M.R et U.V.

5.3- Unités majeures relatives et unités variantes

Dans notre étude, le potentiel dynamique d'une unité multidate entre deux dates successives sera étudié en fonction de la stabilité de cette unité, critère qui se révèle quantifiable. Cette stabilité est à la fois thématique (donc liée à la réponse spectrale) et spatiale. Le potentiel dynamique d'une unité multidate est lié au saut radiométrique que l'on enregistre entre deux dates d'une période considérée. Le potentiel dynamique d'une unité se manifeste par la conservation plus ou moins grande à la fois des frontières spatiales, mais surtout de la signification thématique de l'unité. C'est donc une certaine permanence que l'on observe dans les unités relatives du paysage, une permanence somme toute relative à l'intervalle de temps

Il est possible dans ce cas de parler d'échelle de stabilité dynamique des unités multidates aux événements climatiques et bioclimatiques qui se sont déroulés durant un laps de temps précis. Stabilité et dynamique ne sont antinomiques qu'en apparence (Bertalanffy, 1973). Dans l'orientation particulière de cette étude ceci exprime une permanence thématique de certaines unités malgré les flux de matière et d'énergie qui se sont produits à leur surface entre les deux dates.

- Les unités les plus stables seront celles dont les constituants abiotiques (minéraux dans notre cas) sont dominants à l'intérieur de l'unité multidate, ou bien celles dont les constituants biotiques ont un cycle végétatif non perturbé par les changements climatiques saisonniers.
- Les unités les plus instables sont celles marquées par des processus hydriques et végétatifs agissant à la première date et ayant disparu à la seconde.
- A partir des deux classifications stables on crée une image multidate. Les unités de recoupement résultantes sont issues de cette conjonction image.

• *En résumé*

Lorsqu'une unité ne varie pas thématiquement entre deux dates mais uniquement en superficie, on la qualifiera d'unité majeure relative (U.M.R.)

- Majeure parce qu'elle témoigne d'une permanence thématique entre les deux dates.
- Relative parce que cette permanence n'est valable que dans l'intervalle de temps étudié.

A l'inverse, toute unité générée par l'image multidate possédant une signification thématique différente aux deux dates est appelée unité variante.

- L'ensemble des U.M.R. et des U.V. compose l'image multidate toute entière.

• *Application : Extraction des U.M.R. et des U.V*

L'extraction des U.M.R. est une opération simple. L'image multidate est réalisée à partir de la combinaison des deux images (A et B). Le nombre de classes générées est inférieur ou égal au produit de (A.B).

Beaucoup de ces unités possèdent des surfaces dont le pourcentage par rapport à l'image totale est très faible et il importe de prévoir un seuil minimum pour éliminer les valeurs faibles. Pour chaque unité générée il est maintenant possible de faire figurer les paramètres statistiques (bornes de l'histogramme, moyenne, variance) qui sont produits par l'une et l'autre date pour chaque unité multidate. Afin de bien comprendre le processus de classement on va encore une fois utiliser l'exemple d'Oursi. Nous joindrons à l'image du 4 septembre prise en saison des pluies, celle du 17 décembre 1986 prise en saison sèche. Etant donné le changement des conditions bioclimatiques entre ces deux dates, les deux images sont très contrastées.

L'image multidate issue du croisement des images SPOT du 4 septembre et du 17 décembre 1986 génère 96 unités. L'application de la classification hiérarchique ascendante sur cette image permet de dégager cinq U.M.R. Nous allons prendre comme exemple la détermination d'une U.M.R. pour montrer les phases de différenciation des deux grands types d'unités. Le tableau n° 6 montre quels sont les caractères de l'unité multidate baptisée "22". On constate

qu'une unité possède deux sous-groupes de caractères : ceux reflétant les conditions du milieu le 4 septembre, l'autre celles du 17 décembre. Ces caractères sont représentés par les canaux bruts des capteurs HRV et par deux indices synthétiques calculés à partir des canaux bruts: l'indice de brillance (IBR) et l'indice de végétation (IVG).

Tableau n° 6 Unité Multidate 22

Canal	Min	Max	Moy	Var
sepXS1	82	113	97,6	11,6
sepXS2	81	126	108,0	15,2
sepXS3	102	133	117,2	7,5
sepIBR	91	125	112,1	7,9
sepIVG	125	146	133,3	4,7
decXS1	61	98	79,6	12,4
decXS2	60	109	93,7	9,3
decXS3	77	115	98,2	9,1
decIBR	72	111	95,4	7,6
decIVG	125	156	131,0	3,3

- Pour qu'une unité multidate puisse être qualifiée d'U.M.R il faut qu'elle possède à la fois une connexion avec une unité radiométrique stable de la première et de la seconde date.
- Lorsque le "branchement" ne se fait pas la condition n'est plus vérifiée et on a alors affaire à une U.V.

Chaque sous-groupe doit être comparé successivement à chaque unité radiométrique stable de la date dont elle est issue. Seul ce critère prouve la permanence de l'unité dans la période considérée. Dans notre exemple il s'agit des images de septembre et de décembre. La classification hiérarchique ascendante est appliquée systématiquement à toutes les unités multirates pour établir s'il existe une double connexion pour chaque unité. Une matrice des distances est utilisée à cette fin. Le tableau n° 7 présente la matrice des unités multirates ayant une connexion à l'unité radiométrique stable "SC2" (septembre classe 2). Seule nous intéresse dans ce tableau la dernière ligne indiquant la proximité des unités multirates à l'unité radiométrique stable. L'unité la plus proche de SC2 est l'unité 22 avec une distance de 2. La même opération est répétée pour la seconde image. Il faut donc rechercher (s'il existe) une deuxième connexion entre l'unité 22 et les unités radiométriques stables issues de l'image de décembre. On constate sur le tableau n° 8 que l'unité 22 possède la distance la plus courte à l'unité radiométrique stable de décembre DC2.

Tableau n° 7 DISTANCE DES UNITES MULTIRATES A L'U.S.R SC2 "SABLES"
4 septembre 1986

	21	22	23	25	26	27	28	29	210
22	5								
23	4	4							
25	6	6	4						
26	8	8	5	2					
27	13	10	14	16	18				
28	7	7	6	3	3	17			
29	13	11	15	17	19	2	18		
210	7	8	6	4	4	18	2	19	
SC2	5	2	6	7	9	9	9	10	10

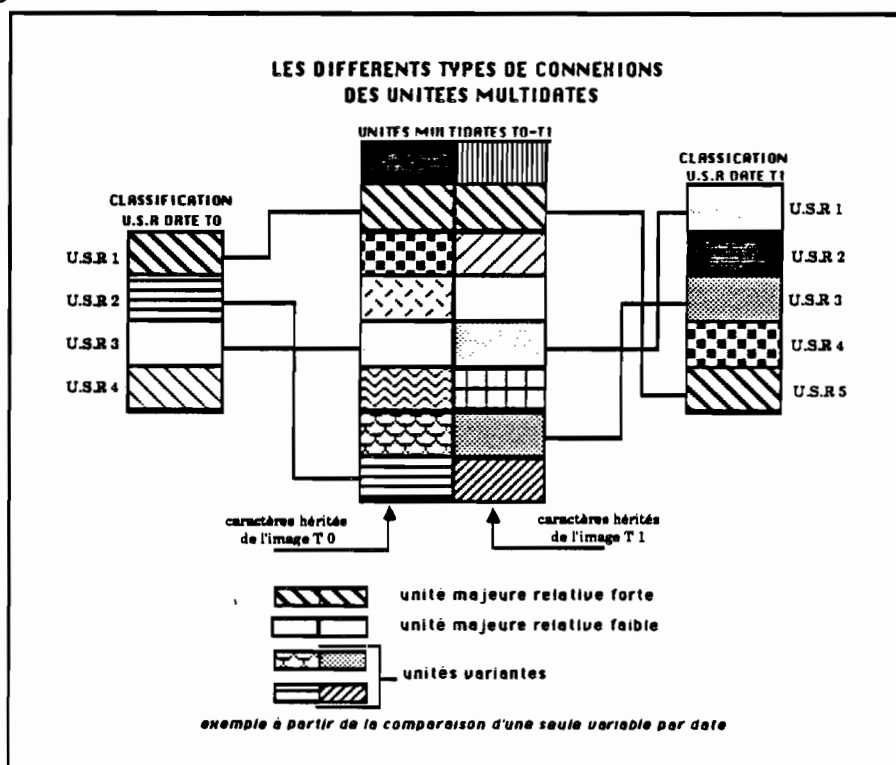
Tableau n° 8

DISTANCE DES UNITES MULTIDATES A L'U.S.R DC2 "SABLES"											
17 décembre 1986											
	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102	112
22	6										
32	7	8									
42	1	5	7								
52	4	8	10	3							
62	3	5	5	3	5						
72	6	3	9	5	5	5					
82	5	4	4	5	8	4	6				
92	1	6	7	1	4	3	6	5			
102	3	6	9	2	2	4	4	6	3		
112	11	8	15	10	9	11	6	12	11	9	
DC2	5	1	7	4	7	4	3	4	5	5	8

Dans ces conditions l'unité 22 peut être désignée comme Unité Majeure Relative. Les tableaux n° 9 a,b,c montrent la relation existante entre l'UMR 22 et les unités radiométriques stables dont elle est issue. La lecture de ces trois tableaux mérite un commentaire: lorsque l'on met en évidence pour une unité multirate une double connexion cette dernière n'est jamais parfaite. Admettons une double connexion parfaite, c'est-à-dire dont les valeurs sont semblables pour les deux sous-groupes reliant une U.M.R aux unités radiométriques stables des deux dates. Cette double connexion est le reflet d'une très grande stabilité des éléments présents dans l'unité pour la période de temps considérée. Il est nécessaire d'introduire alors la notion de gradient pour les connexions des unités multirates qui sont classées selon celui-ci. La figure n° 9 montre bien l'existence de ce gradient pour trois types d'unités multirates:

- la première est parfaitement connectée et ressort comme U.M.R "forte"
- la seconde est faiblement connectée. Elle est qualifiée d'U.M.R "faible"
- la troisième n'est connectée qu'à une seule date. Il s'agit d'une U.V.

Figure n° 9



Tableaux n° 9 a, b, c

BRANCHEMENT DE L'UMR 22**U.S.R - SC2 "sable" de septembre**

Canal	Min	Max	Moy	Var
sepXS1	81	120	97,8	12,2
sepXS2	78	133	108,9	22,2
sepXS3	100	135	118,0	12,5
sepIBR	91	132	113,0	13,7
sepIVG	124	149	133,2	4,9
decXS1	54	119	79,6	15,2
decXS2	46	139	94,6	25,0
decXS3	61	132	99,6	27,3
decIBR	57	135	96,6	24,3
decIVG	122	169	131,0	3,5

U.M.R 22

Canal	Min	Max	Moy	Var
sepXS1	82	113	97,6	11,6
sepXS2	81	126	108,0	15,2
sepXS3	102	133	117,2	7,5
sepIBR	91	125	112,1	7,9
sepIVG	125	146	133,3	4,7
decXS1	61	98	79,6	12,4
decXS2	60	109	93,7	9,3
decXS3	77	115	98,2	9,1
decIBR	72	111	95,4	7,6
decIVG	125	156	131,0	3,3

U.S.R - DC2 "sable" de décembre

Canal	Min	Max	Moy	Var
sepXS1	67	113	95,8	19,8
sepXS2	59	126	104,4	48,4
sepXS3	70	136	115,9	21,7
sepIBR	64	126	109,8	20,8
sepIVG	122	170	134,8	20,6
decXS1	53	100	79,4	12,0
decXS2	53	115	92,7	10,5
decXS3	74	119	97,7	11,2
decIBR	70	115	94,7	8,6
decIVG	118	163	131,3	4,6

5.4- La signification des unités et les variables d'état et de flux

L'évolution des états de surface pour un secteur géographique considéré est produite essentiellement par l'évolution de certains éléments du milieu suite aux changements climatiques ou de l'intervention de l'homme.

L'expérience prouve que les unités majeures relatives (donc présentes aux deux dates) varient peu, en général, au niveau de leur réponse spectrale, suite aux changements des conditions climatiques. Dans ce cas, le pixel intégrateur d'une telle unité fournit une réponse influencée en grande partie par d'autres variables de l'état de surface (rugosité, couleur, etc...) stables d'une date à l'autre. Ainsi, les centres de gravité des U.M.R. peu affectés par des différences sensibles liées aux facteurs climatiques et bioclimatiques, se retrouvent stabilisés pratiquement avec les mêmes coordonnées géométriques au sein du nuage-population.

On peut subdiviser les variables influant sur les caractères des états de surfaces en deux grands types:

- les variables d'état
- les variables de flux

Dans la première catégorie entrent toutes les variables relatives aux affleurement rocheux, aux formations superficielles, au sol... Tous supports physiques sur, ou par, lesquels transitent des flux d'énergie ou de matière. Dans la deuxième catégorie figurent les variables dynamiques: végétation active, plans d'eau, terres humides etc... La figure n° 10 résume bien comment interagissent les deux grands types de variables entre eux et leurs liens avec les unités multitudes générées.

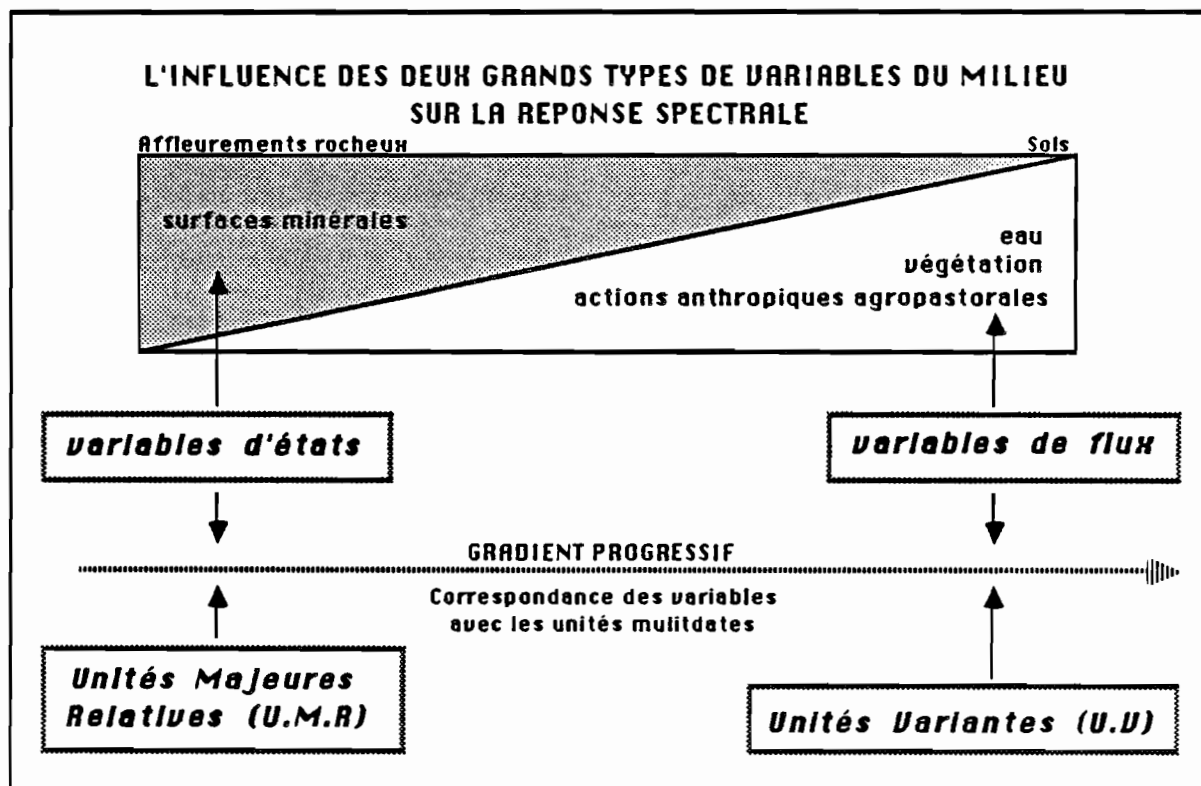


figure n° 10

Lorsque l'on aborde les problèmes de dynamique du milieu physique il faut obligatoirement préciser l'échelle temporelle de référence: une surface minérale brute évolue, bien évidemment, mais à l'échelle géologique. D'autre part sur une période de temps du cycle annuel, où alternent des saisons climatiques contrastées, la vitesse d'évolution de chaque composant du milieu est inégale et répond d'abord à des critères de localisation. Par exemple la sénescence d'une formation végétale particulière en début de saison sèche se produit plus ou moins rapidement selon le substrat et la position topographique (sur laquelle elle se localise). La figure n° 10 montre aussi qu'un état de surface est rarement pur. Il recèle dans certaines proportions un mélange des deux grands types de variables. Il s'agit d'un gradient progressif qui va du substrat rocheux peu ou non altéré à l'afflux d'eau dans les talwegs suite à de violentes averses en passant par la végétation à cycle végétatif rapide. Les actions anthropiques agropastoralistes entrent dans cette catégorie dans la mesure où elles provoquent un changement des états de surface.

6- L'ANALYSE DES SOUS-CLASSES: LA CLASSIFICATION PYRAMIDALE

Les unités radiométriques stables sont quelquefois d'interprétation malaisée. Ces unités sont trop générales et n'apportent pas d'élément nouveau par rapport aux connaissances données par d'autres types d'analyse. Il est alors nécessaire de scinder le volume information que possèdent ces classes en utilisant la même méthode de stratification en unités stables

En appliquant le principe de la classification pyramidale aux unités radiométriques imprécises, on réduit cette part d'erreur en discernant dans bien des cas les divers constituants de la classe qui s'individualisent. Une classification issue de cette méthode produit un document fiable et exploitable pour comparer plus finement les données recueillies au sol à l'ensemble des classes radiométriques.

La figure n° 11 montre comment opère la classification pyramidale. La hiérarchisation progressive du volume information a pour résultat principal de réduire aussi la variance des sous-unités apparues. Elle permet ainsi de restituer peu à peu des informations spatialisées ayant trait à des phénomènes physiques apparaissant hiérarchisés.

- Conclusion

Les méthodes développées, ci-dessus exposées, doivent permettre de traiter les images satellitaires en respectant les principes d'objectivité fixés. La validation des résultats des traitements se fera prioritairement à l'aide des mesures relevées au sol durant les campagnes de terrain qui restent indispensables dans tous les cas. Le tableau n°10 récapitule les nouvelles expressions forgées pour l'étude de la dynamique des unités du paysage par télédétection. Les modules composant la démarche sont entièrement automatisables. Ceci permettra, entre autres, de traiter de gros volumes de données. Dans le cadre d'un projet d'application portant sur la surveillance ou l'étude du paysage sur de vastes territoires, intégrant des emboîtements d'échelles et utilisant plusieurs plates formes de capteurs cet aspect est particulièrement important.

•TROISIEME ETAPE

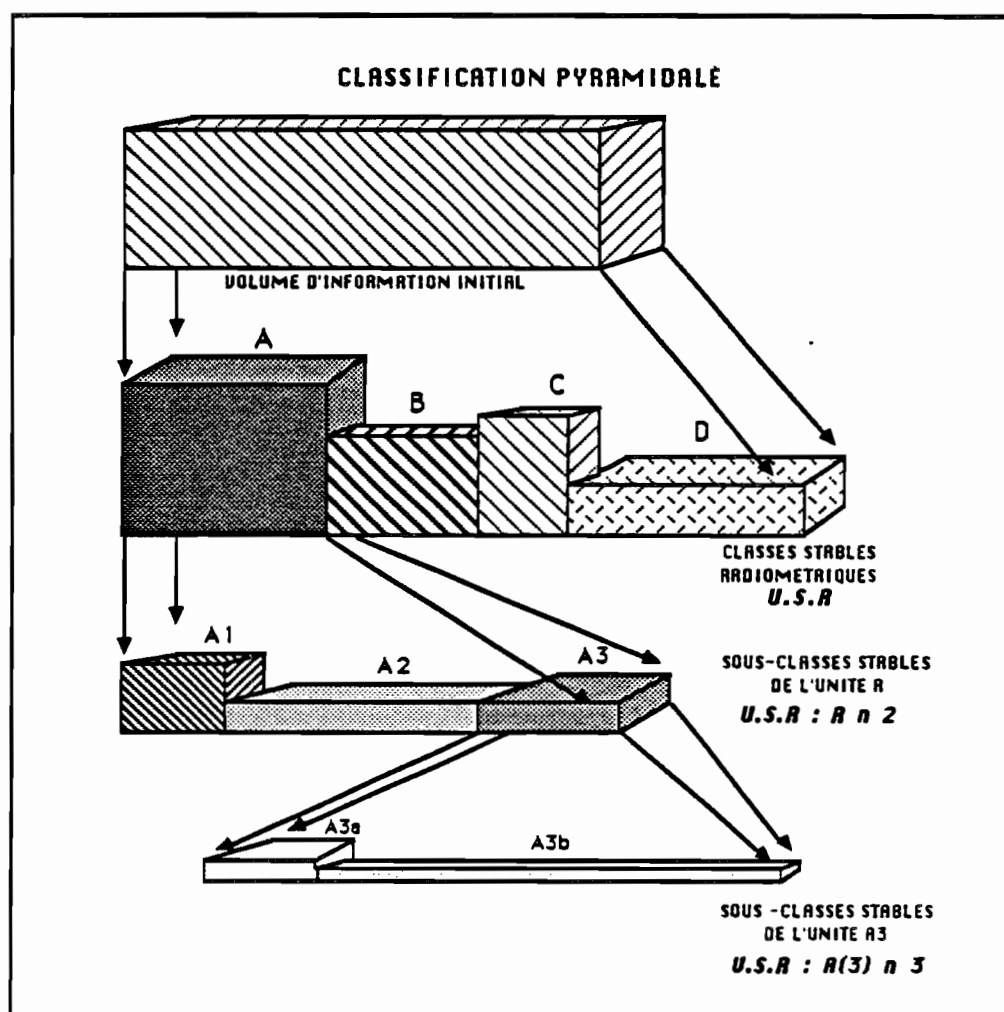


Figure n° 11

Tableau n°10

RÉCAPITULATIF DES EXPRESSIONS GÉNÉRÉES

ABREVIATION	TYPES D'UNITES	DEFINITIONS
U.S.R.	UNITÉ STABLE RADIOMÉTRIQUEMENT	Unité issue d'une classification effectuée à l'aide d'une démarche non-dirigée et possédant des critères de décision basés sur la stabilité des signatures spectrales des thèmes apparus progressivement et permettant de déterminer le nombre de classes optimales contenues dans une image.
U.S.R.(X)/nx	SOUS-UNITÉ STABLE RADIOMÉTRIQUEMENT	Sous-unité obtenue en opérant une nouvelle hiérarchisation d'une U.S.R. Dans ce cas on désignera les classes apparues en ajoutant à "U.S.R" la classe dont elle est issue (X), le niveau de partition (n), le numéro de la nouvelle classe (x).
U.M.R.	UNITÉ MAJEURE RELATIVE	Unité multodate qui ne varie pas thématiquement entre les deux dates mais uniquement en superficie. Ce type d'unité est qualifié de relative parce que valable seulement dans la période d'observation
U.V.	UNITÉ VARIANTE	Unité multodate variant thématiquement entre les deux dates d'une période d'observation
U.R.P	UNITÉ RELATIVE DU PAYSAGE	Unité multodate d'origine U.M.R ou U.V qui figure sur la restitution finale après avoir procédé au regroupement des unités variantes en fonction de leur proximité

Deuxième Partie

*APPLICATION DE LA METHODE
Analyse d'un bassin versant sahélien*

CHAPITRE IV

CADRE GEOGRAPHIQUE REGIONAL DE L'LOUDALAN

1- L'LOUDALAN RÉGION SAHÉLIENNE

Le bassin-versant de la mare d'Oursi, notre site test, se situe dans la province administrative de l'Oudalan au Burkina-Faso (figures n°1 a et b). D'une superficie de 10 000 km², cette région est comprise entre les parallèles 14°10' et 15°5N et les méridiens 1°W et 0°12'E. Elle se situe dans la boucle intérieure du Niger, et Barral (1977) note qu'elle forme une entité originale au sein du domaine sahélien (figure n°2).

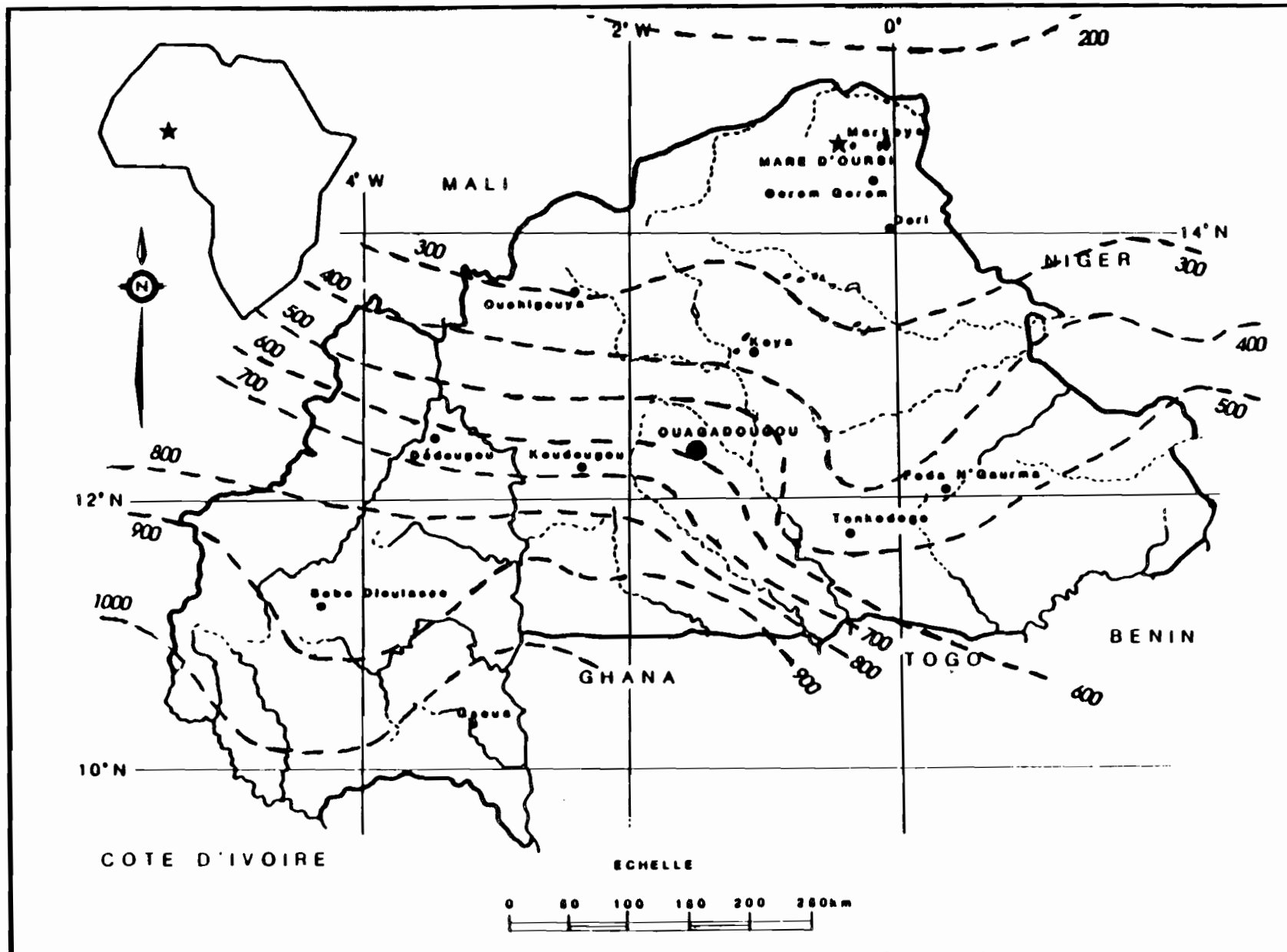
Plusieurs définitions ont été proposées pour caractériser la zone sahélienne. On retiendra celle, concise, proposée par Courel (1985), et reposant sur des critères physiologiques :

- "• Le Sahel est l'espace compris entre les isohyètes 200 et 700 mm ; espace dans lequel, nonobstant la grande variabilité interannuelle des pluies, les cultures sont possibles.
- Le Sahel est compris entre la limite méridionale de l'aire de *Stipagrostis pungens* et la limite septentrionale de l'aire de *Vilhelmsia paradoxa* (le Karité), limites qui, à peu de choses près, correspondent aux isohyètes 150 et 700 mm.
- La limite sud du Sahel coïncide avec la limite méridionale des ensembles dunaires pléistocènes aujourd'hui fixés."

2- LES CONDITIONS DU MILIEU

2.1- Géologie

L'Oudalan est formé de deux grands ensembles géologiques. Les deux-tiers de sa surface appartiennent au craton ouest africain tandis que le nord correspond à la couverture sédimentaire. Les roches cristallines du Précambrien sont composées de roches magmatiques et volcano-sédimentaires plissées et métamorphisées dans la mésozone, l'ensemble étant traversé de nombreuses venues granitiques (Delfour et al, 1970). Les roches sédimentaires du nord sont datées de l'infra-Cambrien et le passage entre les deux ensembles se marque par la présence d'alignements de reliefs de grès et de conglomérats quartzitiques affleurant de façon discontinue.



(Fond de carte : Chevallier et al, 1985)

BURKINA-FASO

Pluviométrie sur le Burkina-Faso entre le 01 mai et le 31 octobre 1986 (Lahuec et al, 1986)

(- - - : isohyètes en mm)

Figure n°1

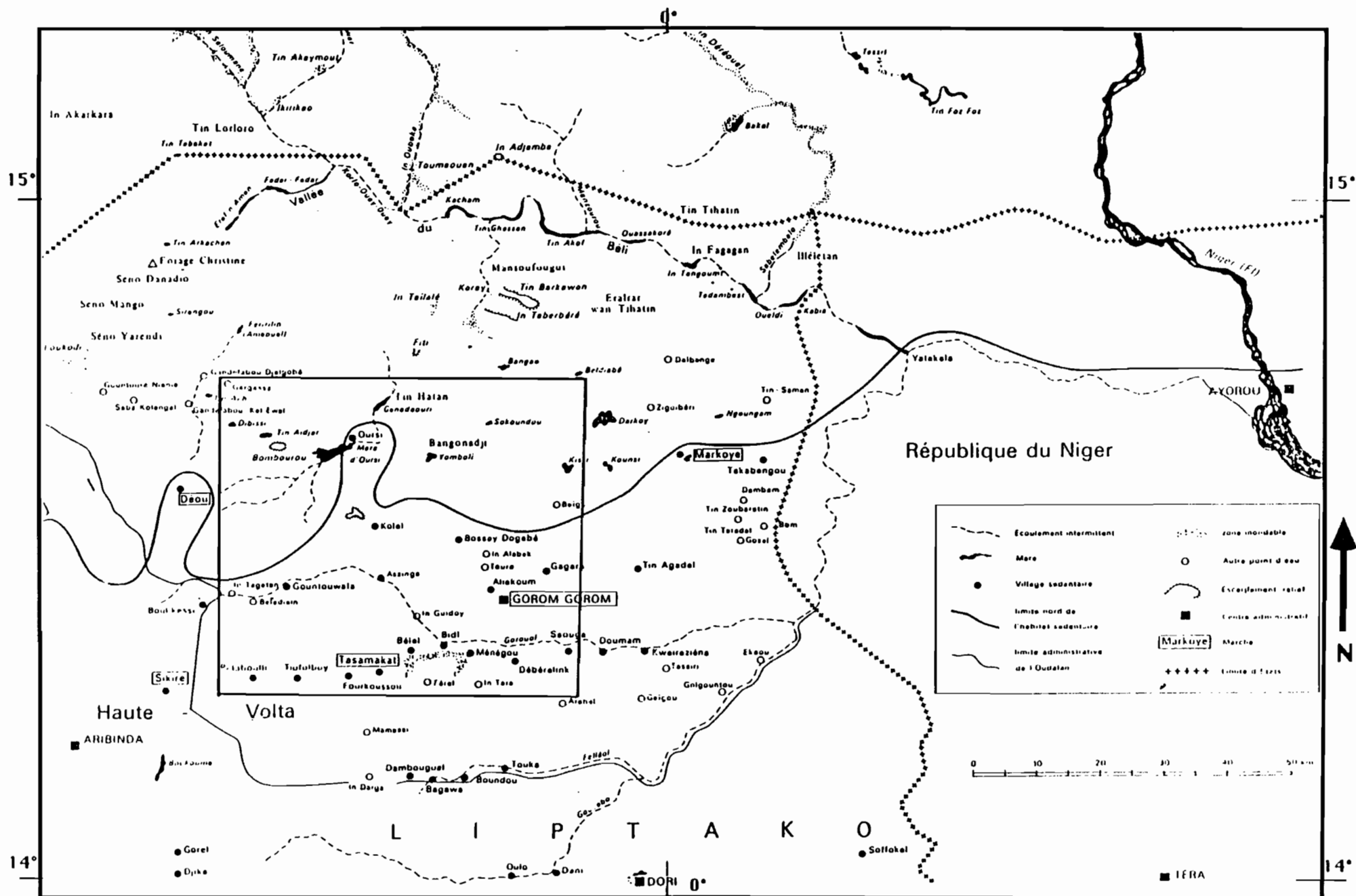


Figure n°2

LA PROVINCE DE L'OULDALAN - BURKINA-FASO (Barral 1977)
Le cadre entourant le bassin d'Oursi matérialise les limites des scènes SPOT utilisées

2.2- Les unités de paysage

On peut distinguer grossièrement quatre ensembles morphologiques dans l'Oudalan sahélien :

- a - les massifs rocheux et buttes cuirassées
- b - les glacis
- c - les dépressions
- d - les systèmes dunaires et placages éoliens

Comme la majeure partie du Burkina, l'Oudalan présente un modèle de pénéplaine mûre avec de faibles oscillations altitudinales variant entre 250 et 350 m.

• Pour les massifs rocheux on distingue :

- les massifs de gabbros qui sont les plus imposants et les plus élevés. Le plus haut est le massif de Tin Edjar à l'ouest d'Oursi de 518 mètres, et dominant de 200 mètres le fond de la
- les massifs granitiques qui se présentent sous plusieurs formes. Quelquefois sous forme d'inselbergs bien conservés comme par exemple dans la région d'Aribinda. Mais dans l'ensemble il s'agit surtout de tors, de chaos de blocs et de dos de baleine qui surgissent au milieu d'arènes peu épaisses.

Sans être à proprement parler des massifs rocheux, les buttes cuirassées sont des éléments marquants de cette région sahélienne, témoins d'anciennes morphologies induites par des conditions climatiques particulières. L'épaisseur de la dalle sommitale est variable et peut dépasser 5 m. Sous la corniche apparaît une zone d'altération kaolinique qui fait la transition avec la roche saine souvent d'origine granitique. L'épaisseur de l'altération ferrallitique peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Les flancs de ces buttes sont très raides et armés de blocs de cuirasses éboulés. Le socle cristallin forme des interfluves de grande amplitude, et des talwegs larges et peu marqués s'y inscrivent.

• Généralement, les versants des interfluves se présentent comme de longues topographies plates avec des pentes faibles inférieures à 10% et bien souvent très inférieures à 1% que l'on désigne sous le nom de glacis. Dans notre étude, le terme de glacis aura un sens uniquement topographique. On peut distinguer schématiquement trois types de glacis :

- les glacis arénacés portant des sols ferrugineux tropicaux lessivés. L'aspect de surface est une mosaïque de plages glacées et de sables d'arène en transit sur cette surface.
- les glacis sur sols bruns vertiques ou modaux et sols ferrugineux tropicaux peu lessivés associés à des sols gravillonnaires. La composition de surface de ces glacis dépend à la fois du substrat en place, des substrats de l'amont mais aussi des conditions morphoclimatiques passées et présentes. L'aspect unitaire de surface des glacis sur sols bruns est la présence remarquable d'un pavage de cailloux et graviers recouvrant parfois de façon homogène une grande partie du glacis.
- les glacis cuirassés qui sont souvent recouverts d'une fine couverture sableuse d'origine éolienne. Ces néocuirasses ont une origine allochtone et semblent s'être constituées à partir des produits d'altération des cuirasses supérieures.

Ces trois types de glacis ont en commun de posséder des formations superficielles sous-jacentes compactées qui empêchent l'infiltration de l'eau dans le sol. Ils sont donc de mauvais supports physiques pour la végétation. Cependant les glacis cuirassés supportent une végétation ligneuse appelée "brousse tigrée", bien visible sur les photographies aériennes. L'aspect général de cette formation arbustive est une alternance de bandes sinueuses de végétation et de sol nu (Ambouta , 1984. Ambouta et Icole , 1986). Il peut aussi s'agir de

- Les dépressions peuvent être scindées en deux ensembles :

- l'ensemble des cours d'eau occupant les talwegs du socle cristallin et formant un réseau arborescent dont les émissaires incisent les interfluves. L'écoulement y est discontinu et intermittent, actif seulement durant la période d'"hivernage". Les sols de ces larges dépressions sont soit des vertisols et paravertisols soit des sols hydromorphes minéraux. En saison des pluies, ces sols portent une prairie de fonio sauvage (*Panicum laetum*) exploitée pour l'alimentation humaine ou pour le bétail. La densité en ligneux des dépressions est beaucoup plus importante que dans les autres milieux. La composition de cette strate ligneuse varie selon un gradient climatique du sud vers le nord mais les espèces les plus abondantes sont toutes issues de la famille des Mimosées (*Acacia seyal*, *Acacia senegal*, etc, ...).

- l'ensemble des mares permanentes ou semi-permanentes. Leur formation est liée au phénomène d'endoréisme et elles constituent les points centraux des écosystèmes de l'Oudalan. Ces mares sont alimentées par les cours d'eau.

- Ce qui distingue l'Oudalan du reste du pays, c'est la présence de dépôts éoliens ordonnés suivant un système de cordons dunaires fixés, hauts d'une vingtaine de mètres et de deux à six km de large environ. La longueur de ces cordons dépasse généralement plusieurs dizaines de km et certains se prolongent sur des centaines de km. Ces cordons sont dissymétriques avec un versant abrupt vers le nord et une pente douce vers le sud. Leur modelé est complexe et résulte de la superposition de deux générations d'ondulations avec des orientations ESE-WNW et NNE-SSW (Courel, 1977). La superficie de ces cordons est évaluée à environ 30% de la surface de l'Oudalan et peut atteindre près de 50% dans la partie nord.

Pour Delfour et al, (1970) les sables de ces dunes, essentiellement à quartz fin (0,5 mm), peuvent provenir d'anciennes altérites et des lithomarges érodées. Ces grands alignements dunaires occupent indistinctement les talwegs et les interfluves. Ils barrent de ce fait l'écoulement des marigots vers le nord créant ainsi un véritable chapelet de mares, car les cours d'eau ayant réussi à percer ces barrages dunaires sont rares.

Les sols développés sur ces formations sont reconnus comme étant des sols ferrugineux tropicaux, peu lessivés, à drainage interne limité en profondeur pour ce qui est des sables de l'ancien cordon dunaire, et isohumiques à complexe saturé brun-rouge pauvres en argiles et limons pour les sables de l'erg récent. L'exploitation par l'homme du système dunaire est fonction des qualités édaphiques propres aux deux types de sables reconnus. Les cordons anciens sont pratiquement tous occupés par des champs de mil sauf dans le nord-ouest vers le Seno Danadjio où les points d'eau permanents sont inexistantes. Les cordons récents et certains placages portent la plus grande partie des réserves fourragères herbacées.

L'Oudalan possède deux réservoirs biologiques complémentaires qui ont déterminé sa vocation pastorale :

- les mares permanentes ou semi-permanentes
- les stocks fourragers se développant sur les cordons dunaires.

2.3- Le macro-climat sahélien

2.3.1- Alternance saisonnière

Le trait dominant du climat sahélien est l'alternance d'une longue saison sèche (8 à 9 mois), d'octobre à mi-mai, suivie d'une courte saison des pluies (3 à 4 mois), de mi-mai à septembre. La longueur de la saison des pluies est variable et liée au gradient climatique; les régions plus au sud ont généralement des totaux pluviométriques plus élevés que le nord de l'Oudalan. On distingue généralement quatre saisons (Barral, 1977) :

- une saison sèche et fraîche de novembre à mars. Les valeurs extrêmes relevées des températures à la station de Djallafanka vont de 7,6 °C à 36,5°C. L'hygrométrie est d'environ 21% en novembre et les vents soufflent des secteurs N et NE (harmattan).
- une saison sèche et chaude de mars à juin. Les maxima peuvent dépasser 45°C en avril. L'humidité relative remonte (30%). Les vents sont toujours de secteur N et NE en début de saison, mais évoluent progressivement et passent aux secteurs W et SW en fin de saison.
- une saison humide de juin à octobre. L'humidité relative remonte (jusqu'à 62,4% à Djallafanka).
- une saison relativement chaude et encore humide de mi-septembre à mi-novembre. Les températures remontent et l'hygrométrie est encore forte (31,8%).

La saison des pluies est réglée par le déplacement du front inter tropical (F.I.T.) qui matérialise la limite entre les masses d'air tropical humide et tropical sec. Les mécanismes de la circulation générale sont assez bien connus (Courel 1985 ; Desbois et al 1988). Le F.I.T. remonte vers le nord progressivement depuis les latitudes 5 à 7°N où il se situe en janvier, et atteint fréquemment les latitudes de 20° à 25°N (et au delà). L'arrivée des masses d'air tropical humide provoque le débourrage des bourgeons qui précède les pluies de quelques semaines. Il constitue un facteur écologique important pour le pastoralisme. Le feuillage des ligneux permet l'alimentation des troupeaux à une période où les herbacées annuelles ne sont pas encore disponibles. Des estimations dans le Ferlo Sénégalais ont été faites pour mesurer la part de la consommation des pousses de ligneux en fin de saison sèche - début de saison humide. Elles montrent que le pâturage aérien représente 75 % de la ration quotidienne des troupeaux à cette période de l'année (A.C.C - G.R.I.Z.A (LAT), 1983).

2.3.2- La pluviométrie

Ce facteur est étudié plus particulièrement car de lui dépend beaucoup de l'évolution du paysage et les conditions d'existence pour la population sahélienne.

Les caractères des pluies sont dûs principalement aux amas nuageux à grand développement vertical qui s'organisent souvent en lignes de grains. Des études climatologiques montrent que ces derniers sont responsables de 75 à 80% des précipitations enregistrées dans cette zone (Domergue et al, 1987).

La pluviométrie au Sahel est marquée par une forte hétérogénéité spatiale, temporelle et quantitative. Au cours de la période 1968-1982, le dépouillement statistique des données pluviométriques d'un grand nombre de stations sahéliennes a permis de conclure à l'accentuation prolongée de la sécheresse pour cette période (Courel ., 1985). En 1986 (figure n° 3) les pluies, sans être normales, ont été suffisantes dans l'Oudalan pour reconstituer les pâturages et permettre au petit mil d'arriver à maturité. On constate l'existence d'un gradient pluviométrique sur l'Afrique de l'ouest qui va en décroissant du sud en partant de la côte atlantique au nord vers le Sahara.

Le tableau n°1 et la figure n° 4 donnent la pluviométrie de trois postes de l'Oudalan situés à des latitudes différentes (Dori ne se situe pas dans l'Oudalan mais près de sa frontière nord). Dori se trouve à 84 km au SSE de Djallafanka, station climatique de l'O.R.S.T.O.M (au centre de l'Oudalan sur le bassin d'Oursi), Gorom-gorom à 36 km au SE, et Markoye approximativement sur la même latitude que Djallafanka. Le gradient est bien marqué puisque les précipitations décroissent régulièrement entre Dori à Markoye.

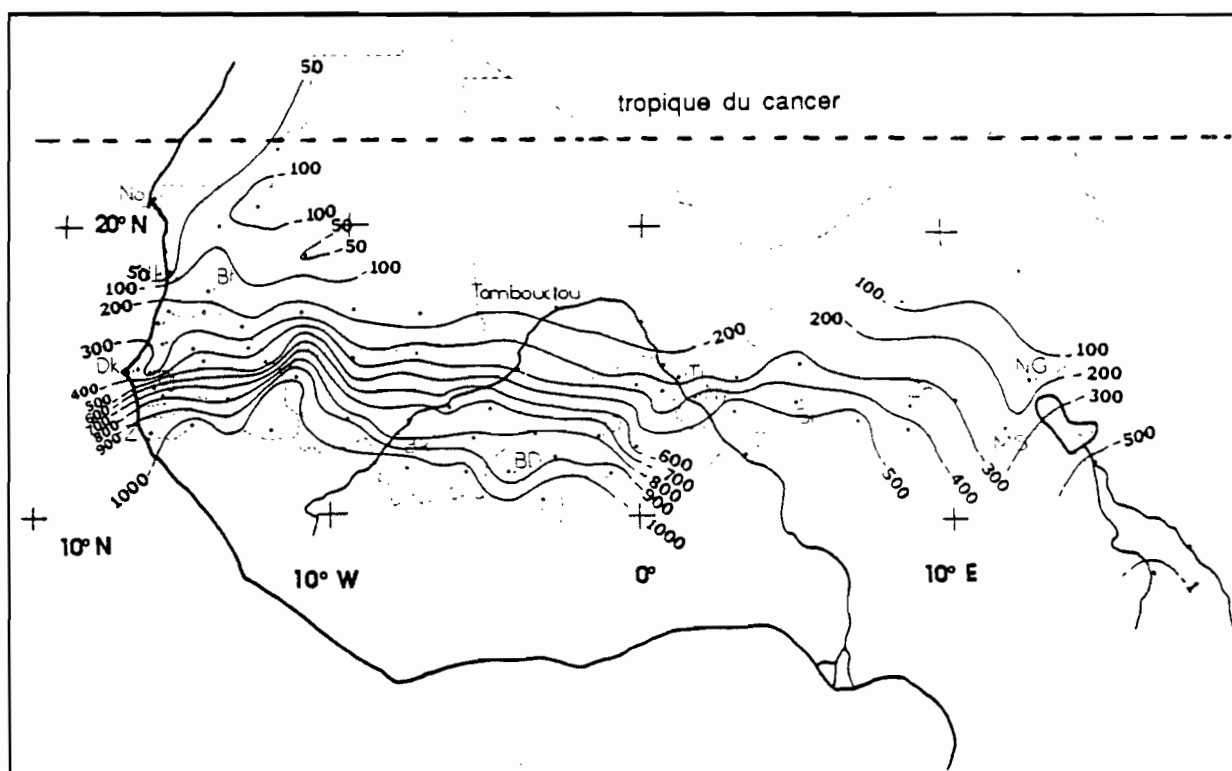


Figure n° 3

PLUVIOMETRIE 01 MAI-31 OCTOBRE 1986

Lahuec et al (1986)

Ce tableau indique aussi que la répartition des pluies durant l'hivernage est sensiblement la même pour les trois stations. Chevallier P. et Al (1985), notent qu'en simplifiant, on peut discerner trois grands types d'épisodes pluvieux :

- en début et en fin de saison des pluies (mai-juin et septembre) les averses sont les plus violentes. Elles accompagnent le passage du F.I.T. dans son oscillation annuelle et sont souvent précédées de vents de sable, surtout au tout début de la saison des pluies.
- en milieu de saison, les lignes de grains s'étalent sur plusieurs centaines de km. Les pluies sont issues de plusieurs corps d'averses et leur intensité est moyenne.
- de petites pluies fines et persistantes avec des volumes d'eau restreints sont observables quelquefois en milieu d'hivernage.

Tableau n° 1
MOYENNES INTERANNUELLES DES PRECIPITATIONS ANNUELLES
ET MENSUELLES (MM) ET % DU TOTAL ANNUEL

POSTES	ANNÉE	J	F	M	A	M	Jn	Jt	A	S	O	N	D
GOROM GOROM (26 ans)	462 (100)	0 (0)	0 (0)	1 (0,3)	4 (0,8)	18 (4,0)	68 (4,0)	124 (15,0)	158 (27,4)	67 (34,9)	12 (14,8)	1 (2,6)	0 (0,1)
MARKOY (26 ans)	402 (100)	0 (0)	0 (0)	1 (0,2)	4 (0,9)	12 (3,0)	59 (14,6)	106 (26,3)	143 (35,4)	64 (15,9)	14 (3,5)	0 (0)	0 (0)
DORI (61 ans)	535 (100)	1 (0,2)	1 (0,2)	1 (0,2)	5 (0,9)	25 (4,8)	64 (12,3)	139 (26,8)	177 (34,1)	88 (17,0)	17 (3,3)	1 (0,2)	0 (0)

Chevallier et al (1985)

REPARTITION DES PRECIPITATIONS

(Voir tableau ci-dessus)

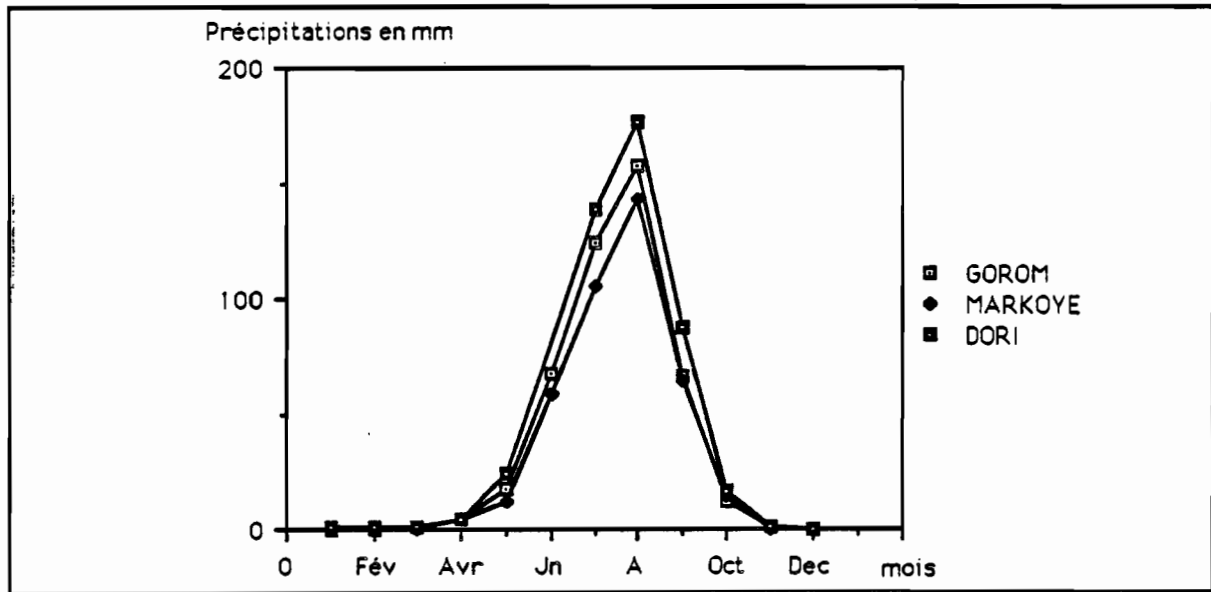


Figure n° 4

3- LA POPULATION DE L'UDALAN.

La province de l'Oudalan comptait 109 000 habitants en 1985 (recensement I.N.S.D 1986). Si les statistiques sont exactes, cette population est en évolution rapide puisqu'en 1975 65 000 personnes étaient recensées (I.N.S.D 1978), la densité passant de 6,5 à 10,9 habitants au km² en 10 ans, ceci semble cependant hautement improbable au regard des conséquences dramatiques de la sécheresse sur la population sahélienne.

3.1- Les pasteurs

75% de la population est composée de pasteurs nomades. Ce nomadisme est dicté par la nécessité de concilier sans cesse la recherche de nouveaux pâturages pour les troupeaux et la proximité de points d'abreuvement indispensables à la survie du bétail. Ces pasteurs évoluent sur des espaces très grands en fonction notamment du déplacement des champs de pluie vers le nord de la province et vers le Gourma malien. L'espace pastoral est exploité à partir d'un calendrier saisonnier de transhumance à caractère pluri-annuel si les pluies le permettent. On remarque très souvent que ces pasteurs pratiquent un peu l'agriculture pour compléter leurs besoins.

Ces pasteurs nomades sont composés de deux ethnies :

- les Kel Tamachek (Touareg et Bella)
- les Peul (Djelgobé et Gaobé)

En raison d'une faible pluviométrie, l'exploitation des ressources renouvelables au Sahel est surtout tournée vers la production de bétail. Oudalan détient à elle seule 1/10 du cheptel du Burkina-Faso (Bovins 70.000 têtes, ovins 40.000 et caprins 50.000 pour les productions les plus importantes, Rouamba, 1983). L'intérêt économique de cette région est donc plus grand que ce que l'on pense généralement et cela détermine en partie la recherche de solutions pour améliorer le système de production agro-pastoral et l'exportation du bétail vers les centres de consommation. Cela influe parfois indirectement sur le "genre de vie" des populations nomades. Par exemple, suite aux deux derniers épisodes de sécheresse (1972 à 1974 et 1984) certains pasteurs "irréductibles" Peul ont été convaincus de se mettre à l'agriculture en pratiquant celle-ci en semi-nomadisme.

3.2- Les sédentaires

Ils sont regroupés en gros villages (Déou, Oursi, Markoye). Les ethnies les plus représentées sont les Songhaï, les Rimaïbé, les Haoussa et les Mossi. Ce sont des agriculteurs pour la plupart qui pratiquent la culture du mil sur les zones sableuses et du sorgho et même du maïs dans les dépressions argileuses humides. Le plus souvent l'entretien d'un petit cheptel d'ovins et de bovins complète l'activité principale. Un enquête réalisée par Milleville (1982) conclut à une tendance à la saturation de l'espace exploitable. Il confirme en cela Peretti M. (1977) qui estime que l'extension des surfaces cultivées entre 1955 et 1976 est de 75% et qu'elle est fortement corrélée au rythme d'accroissement de la population estimé pour sa part à 64% pour la même période.

D'autre part il faut noter l'existence d'une forte migration saisonnière d'une frange de la population masculine en direction des grandes villes de la côte en particulier vers Abidjan. Les départs s'effectuent après la période de récolte et les retours coïncident avec la période des semis.

- Conclusion

L'Oudalan possède les caractéristiques des milieux sahéliens tant du point de vue des facteurs physiques du milieu que du genre de vie des populations sahéliennes. Les conditions climatiques, marquées par une longue saison sèche, sont contraignantes pour les activités agro-pastorales. De plus les informations sur les potentialités du milieu, reconnues au 1/50.000, sont partielles et limitées bien souvent à des études ponctuelles. Dans ces conditions les images satellitaires haute résolution représentent une alternative intéressante susceptible de fournir des informations localisées sur les potentialités de ces territoires.

CHAPITRE V

LE BASSIN DE LA MARE D'OURSI

1- LES DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES DE REFERENCE

Dans le chapitre I ont été exposées les raisons majeures du choix du site test. Elles ont trait principalement à l'existence de nombreux travaux tant sur les conditions du milieu physique que sur la population et ses activités. Après avoir dépouillé de nombreux documents, nous n'avons retenu que les travaux ayant abouti à des synthèses cartographiques et les données climatiques relevées par la station climatologique installée par l'O.R.S.T.O.M. de façon permanente entre 1977 et 1987.

1.1- Les documents cartographiques et les photographies aériennes

On peut scinder en deux sous-groupes les documents cartographiques.:

- les cartes réalisées à partir de levées au sol et à l'aide des photographies aériennes
- les cartes issues de données satellitaires antérieures à notre étude.

1.1.1.- Cartes thématiques

Outre la carte hypsométrique au 1 : 50.000 réalisée par l'IGN sur le bassin de la mare d'Oursi, pour les besoins des thématiciens, quatre autres cartes thématiques sont retenues :

- La carte géologique

Il s'agit de la carte de l'Oudalan de Delfour et al, éditée en 1970. Levée au 1 : 200.000, cette carte est assez précise pour comprendre l'évolution géologique de la région. Particulièrement pour l'étude des phénomènes de météorisation des roches saines.

- La carte géomorphologique et géodynamique

Cette carte, levée au 1 : 50.000, a été réalisée par Joly et al. en 1978 durant le programme D.G.R.S.T. Elle permet de connaître avec une grande précision les formations superficielles

issues de l'altération des roches saines ainsi que leur dynamique actuelle. Ce document constituera une base pour l'interprétation des classifications ultérieures.

- L'esquisse pédologique

Malheureusement, les travaux pédologiques qui devaient être menés sur le bassin ont été écourtés, ne permettant pas d'aboutir à un document réellement efficace au 1 : 50.000. Produite à partir des travaux de Leprun (1977) cette esquisse s'avère trop générale pour réellement constituer un document de référence pédologique. La réalité pédologique au 1 : 50.000 est beaucoup plus nuancée que ne le présente l'esquisse. Néanmoins, pour l'étude au 1 : 100.000 du cadre régional, on peut se référer à cette cartographie.

- La carte des ressources fourragères du bassin

Elle a été réalisée par Toutain (1976) et représente les unités de végétation du bassin-versant.

Notons que ces quatre documents apparaissent comme complémentaires pour la compréhension des unités de paysage.

1.1.2- Les documents satellitaires

On peut citer deux documents d'origine satellitaire produits tous deux à partir des données Landsat MSS:

- la carte de reconnaissance des phénomènes géomorphologiques dans le bassin de la mare d'Oursi restituée au 1 : 100.000.. L'interprétation de cette carte a été réalisée par Simonin et al (1981) sur la scène Landsat 2 du 17/01/1976. Il s'agissait précisément d'évaluer les capacités de Landsat 2 pour l'extrapolation de la carte géomorphologique du bassin d'Oursi à l'ensemble de la scène. Finalement, ce projet n'a pas abouti.
- la carte des états de surface du ruissellement du bassin au 1 : 50.000. Cette carte a été produite par des hydrologues de l'O.R.S.T.O.M (Chevallier et al, 1985). Cette classification a montré qu'il existait une bonne corrélation entre les pluies simulées et les états de surfaces reconnus par le satellite Landsat 2.

1.2- Les photographies aériennes

Trois missions étaient disponibles pour notre étude :

- La mission A.O.F , ND-30-XVIII , 1955-1956 , 1/50.000 (format 18 x 18 cm).
- la mission 74 HV, 010/500 , SAG , 2019. 1R (format 24 x 24 cm).
- la mission U.A.G.I., 6022 , 153.31 , I.G.N France , 1981 , SPOT HV 02 IRC.

2- LE MILIEU PHYSIQUE

Le bassin-versant de la mare d'Oursi se situe entre les latitudes 14°20' et 14°50'N et les longitudes 0°10' et 0°40'W. Sa superficie est de 280 km² (figure n°5). L'aspect général du bassin peut être décrit de la manière suivante : vers le sud ouest, une demi-ellipse très allongée est limitée par un ensemble de reliefs raccordés par des surfaces planes légèrement surélevées par rapport à l'axe de la dépression centrale. Au nord, un cordon sableux rectiligne barre les écoulements, permettant l'installation de la mare. A l'est, un large

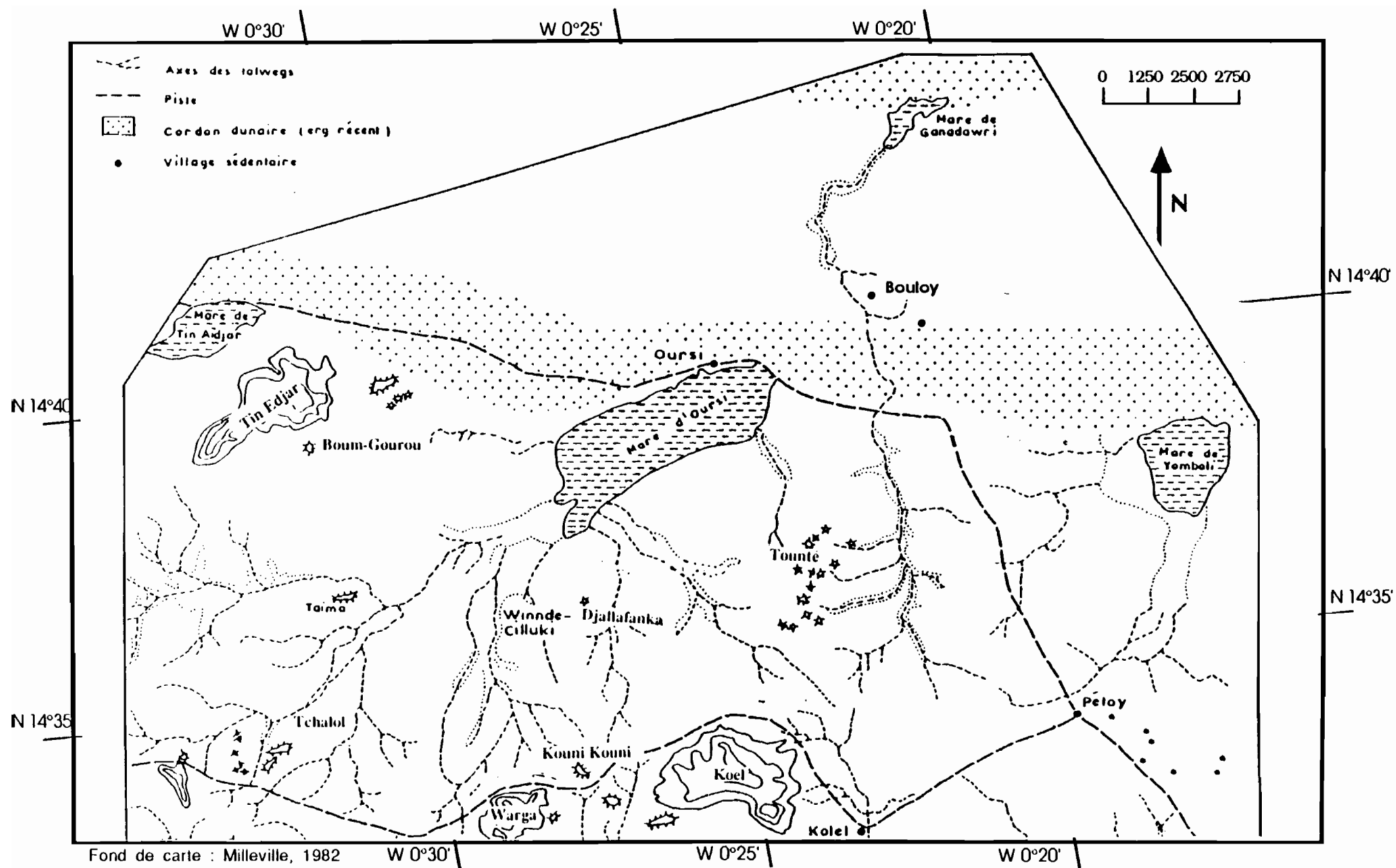


Figure n° 5

LE BASSIN DE LA MARE D'OURS
LOCALISATION DES PRINCIPAUX LIEUX CITES

interfluve granitique est surmonté par de petits reliefs. Les glacis ne sont pas toujours continus. On note sur leur surface l'existence de sous bassins versants bien individualisés.

La monotonie apparente de ce bassin cache en réalité une complexité très grande tant par la diversité des constituants géologiques que par le nombre de géofaciès reconnus. Les sols, très variés eux aussi, supportent des groupements végétaux nettement différenciés. On retrouve sur ce bassin, les quatre grandes unités de paysage proposées au chapitre précédent.

2.1- Les massifs et buttes

Comme au chapitre précédent trois types de reliefs peuvent être distingués :

- les massifs de gabbros forment les reliefs les plus élevés du bassin : 518 m pour le Tin Edjar à l'ouest, 372 m pour les massifs de Koel et 365 m pour Warga au sud. Ces collines sont profondément altérées sur plusieurs dizaines de mètres et les blocs ne sont sains qu'en apparence (Pion, 1979). Les pentes et les ravines de ces reliefs sont soumises à une intense érosion durant les fortes pluies. Les versants du Tin Edjar sont surmontés d'une cuirasse ferrugineuse sur certaines parties et sur d'autres une brèche de pente appelée "canga" recouvre ses flancs.
- les reliefs granitiques ont des proportions beaucoup plus modestes surplombant la surface de 5 à 20 mètres. On les rencontre un peu partout sur le bassin mais particulièrement sur l'interfluve de Tounti. Tors, chaos de boules, dos de baleines et demi-oranges forment la palette complète de l'altération granitique rencontrée sur le bassin.
- les buttes cuirassées se situent toutes au sud-ouest et au sud du bassin où elles constituent la ligne de partage des eaux. L'altitude atteint 400 mètres pour la butte de Gouba, mais généralement comprises entre 350 et 380 mètres.

2.2- Les glacis

On retrouve sur le bassin d'Oursi les trois grands types de glacis décrits au chapitre précédent :

- les glacis arénacés circonscrits aux zones d'arène granitique juste à l'aval des zones d'arènes granitiques grossières. Ils apparaissent dès que la pente devient très faible induisant l'existence de plages de cuirasses gravillonnaires d'hydromorphie liée à l'imperméabilité du manteau d'altération du substrat granitique et à l'absence d'écoulement (Joly et al, 1980).
- les glacis sur sols bruns et ferrugineux largement majoritaires. Ils occupent les versants nord ouest et sud ouest du bassin ainsi que son centre.
- les glacis cuirassés peu nombreux et souvent en cours de démantèlement. C'est le cas sur le piémont sud du Tin Edjar et sur les sous bassins versants du centre.

2.3- Les dépressions

- Les marigots drainant le bassin sont tous répartis au sud et à l'ouest. Les axes principaux exploitent souvent les quelques failles et fractures du socle cristallin. A l'amont des talwegs, et tant que la pente reste sensible, le fond du chenal est de composition hétérogène. Sables en place et alluvions transportés par saltation alternent sur les deux tiers supérieurs environ du chenal. On trouve aussi des limons fins qui peuvent provenir du ruissellement diffus sur les versants de glacis lors des épisodes pluviométriques intenses. Vers l'aval, la pente est souvent

très faible et les argiles gonflantes de vertisols et paravertisols se forment. Toutefois, on note encore la présence de limons et de sables fins. Excepté un marigot au sud ouest, tous les autres convergent à l'ouest de la mare en un "delta" couvert par une dense végétation ligneuse.

• La mare est d'une superficie d'environ 14 km². Elle est alimentée soit directement par les eaux de pluie, soit par ruissellement concentrés et diffu, soit par drainage latéral interne. La quantité d'eau reçue varie évidemment en fonction de la pluviométrie générale du bassin collecteur: pour une pluviométrie annuelle de 456 mm relevée à Djallafanka en 1976, le volume est de 26,5 x 10⁶m³. Pour la plus faible pluviométrie annuelle enregistrée en 1983, soit 204 mm, le volume est de 7,3 x 10⁶m³ (Chevallier et al, 1985). Les sols de la mare sont des vertisols et paravertisols vers le sud-ouest et des sols minéraux bruts vers le nord-est (Leprun, 1977).

2.4-Les systèmes dunaires

Quatre ensembles peuvent se distinguer :

- l'erg récent apparaît sur les photographies aériennes comme un long cordon rectiligne avec une pente raide vers le nord et une pente douce en direction de la mare. Il est superposé à l'erg ancien bien visible au nord de la limite de l'erg récent. Au contraire, vers le sud, les sables issus des deux ergs sont souvent mélangés. On note d'ailleurs que la composition en sables de l'erg récent est loin d'être homogène puisque certaines plages apparaissent rubéfiées et d'autres beiges, ocres. Cet erg a subi de sévères dégradations près du village d'Oursi. A cet endroit, les sables se sont remobilisés suite aux passages quotidiens du bétail qui va s'abreuver à la mare et repart pâture sur les dunes situées au nord. On ignore le degré d'ancienneté de cette dégradation. L'origine de cet erg serait anthropique, probablement liée aux pratiques agricoles. On ne peut donc pas imputer son existence aux cinq périodes de sécheresse qui se sont succédées depuis le début du siècle (Courel, 1985).

- l'erg ancien est surtout occupé par des champs de mil sur le revers du cordon. Au nord, près de la mare de Ganadaori, la zone de champs est pratiquement continue et son extension, constatée par photographies aériennes, est manifeste.

- les dunes de placages forment les piémonts nord des massifs gabbroïques de Koel et de Warga. L'exploitation de ces piémonts par l'homme est surtout agricole : champs de mil sur les parties en pente, champs de mil associés à du sorgho dans les zones de concentration des eaux en contrebas du piémont.

- les placages amorphes sont peu développés sur le bassin d'Oursi mais sont présents sur le bassin voisin du Gountouré entre les villages de Koel et de Petoy. Ces placages ont une épaisseur qui excède rarement 2 m et portent aussi des cultures de mil. Les sols de ces placages sont identiques aux sols de l'erg ancien : sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à drainage interne limité en profondeur. Cependant la granulométrie de ces sables est identique à celle de l'erg récent.

3- LES VARIABLES CLIMATIQUES

Les principaux paramètres climatiques du bassin d'Oursi ne sont guère différents de ceux exposés au chapitre précédent pour l'ensemble de l'Oudalan. Seuls sont donnés dans ce chapitre les paramètres concernant la station de Djallafanka relevés sur une période de 8 ans (1976 -1983). Les données ont été dépouillées par les hydrologues de l'O.R.S.T.O.M et sont résumées dans un ouvrage consacré à l'hydrologie de la mare d'Oursi (Chevallier et al, 1985).

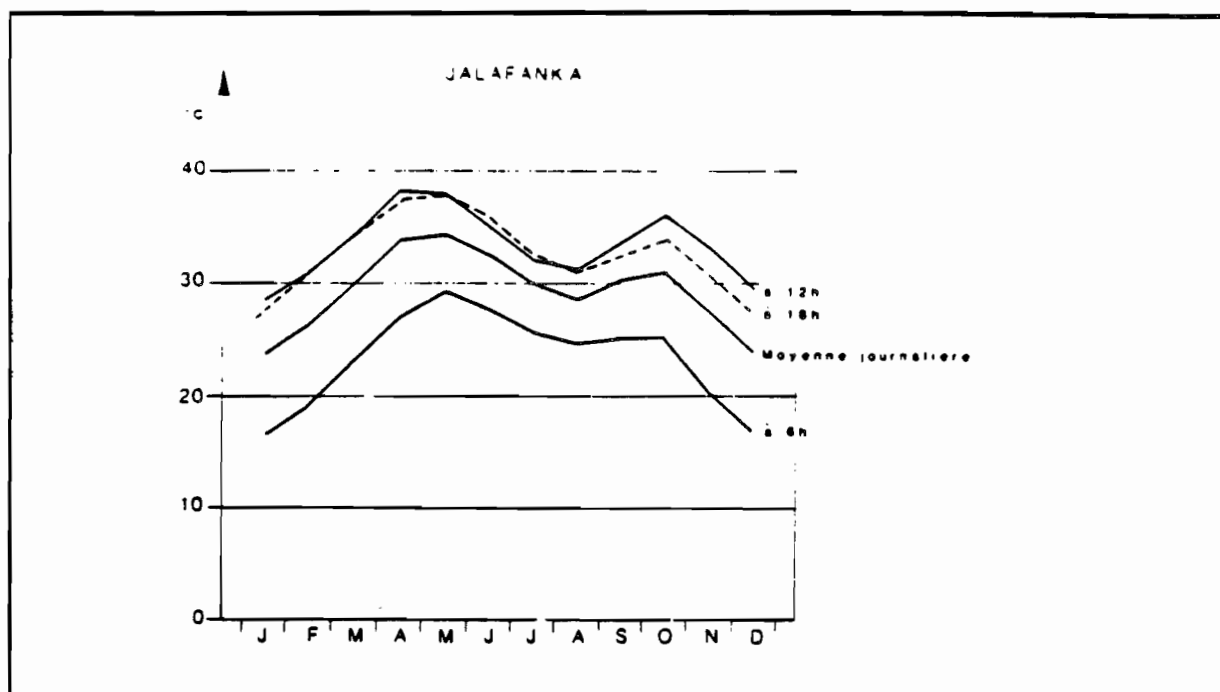


Figure n°6 TEMPERATURES MENSUELLES MOYENNES

• *Températures de l'air sous abri*

La figure n° 6 indique les températures mensuelles moyennes à 6h, 12h, et 18 h. L'allure de ces courbes est classique pour le domaine sahélien : les températures maximales se situent en avril-mai et les minima en décembre-janvier.

TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES
EN 1981 DANS LE SOL

Tableau n°2

(En °C)

profondeur	1981	J	F	M	A	M	Jn	Jt	A	S	O	N	D
10 cm	33,4	25,1	29,2	35,1	37,5	38,4	38,2	33,7	33,9	35,3	36,9	30,7	26,4
20 cm	33,2	24,6	28,7	33,5	37,0	38,1	38,1	34,3	34,3	35,2	36,9	30,8	28,8
50 cm	33,7	26,4	29,0	32,0	36,1	38,1	38,4	35,5	35,0	35,5	37,0	32,3	28,2
100 cm	33,6	29,2	31,7	34,7	36,5	37,7	35,9	35,0	35,1	36,3	33,7	29,8	33,6
ABRI	29,4	24,5	26,5	30,4	33,6	34,5	32,5	29,7	28,5	29,7	30,9	27,6	23,8

Chevallier et al (1985)

• *Température du sol*

Le tableau n° 2 indique la température dans les sols à différentes profondeurs comparée à la température de l'air. On constate d'une part que les températures du sol sont toujours supérieures à la température de l'air et d'autre part, que les températures relevées à 100 cm sont les plus constantes annuellement. Les amplitudes journalières varient en fonction de la saison mais surtout de la profondeur :

- à 10 cm l'amplitude est de 5°C en août et 8,5°C en avril.
- à 20 cm, l'amplitude varie entre 2 et 3°C.
- à 50 cm, la variation est comprise entre 0,2 et 0,5°C.
- à 100 cm, l'amplitude atteint 0,1 °C.

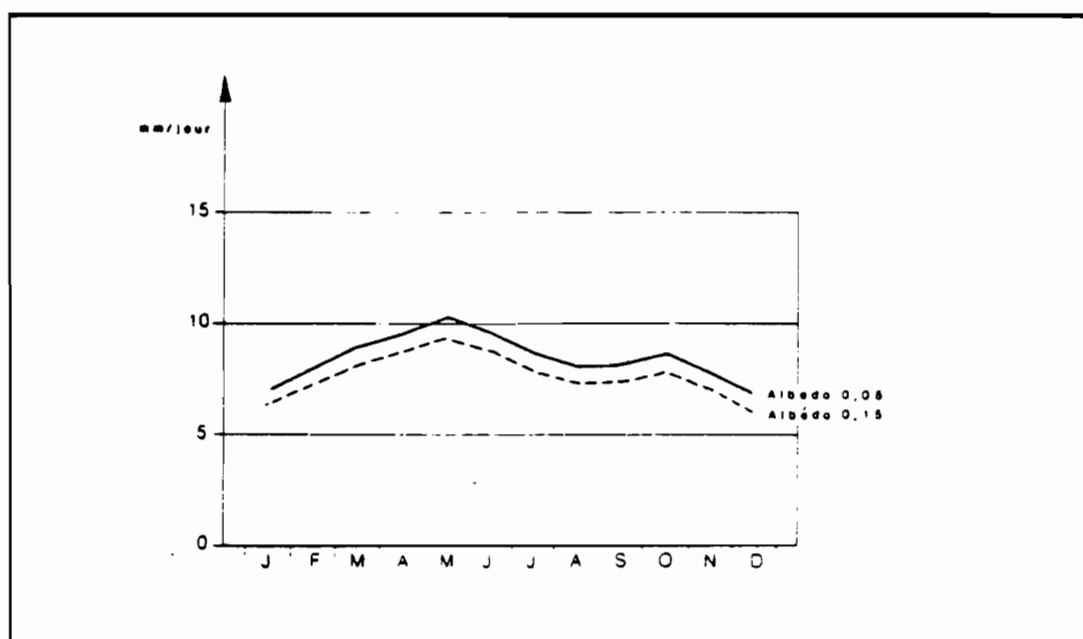


Figure n° 7 **EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE MOYENNE**
CALCULÉE PAR LA FORMULE DE PENMAN *Chevallier et al (1985)*

• Les vents

La direction des vents s'inverse entre saison sèche et saison humide. De novembre à avril, ils sont de secteurs NE et E (harmattan). De mai à octobre les vents sont de secteurs SW et S. Ils accompagnent le passage du F.I.T. La vitesse maximum des vents est atteinte en fin de saison sèche et en début d'"hivernage". En juin et juillet, elles atteignent $4,1 \text{ m.s}^{-1}$. Les plus faibles sont enregistrées en octobre-novembre : $2,2 \text{ m.s}^{-1}$.

• L'évapotranspiration

L'évapotranspiration élevée en zone sahélienne est l'une des caractéristiques les plus remarquables de ce milieu. La mesure de l'ETP Penman pour la station de Djallafanka (figure n° 7), montre que l'ETP passe par un premier maximum en mai ($10,3 \text{ mm}$) et un deuxième en octobre ($8,67 \text{ mm}$).

• La pluviométrie

Le tableau n°3 et la figure n°8 comparent la pluviométrie mensuelle des moyennes interannuelles à Djallafanka et à Gorom-gorom. Les deux stations ont un régime pluviométrique identique.

Tableau n°3 **REPARTITION MENSUELLE DES PRECIPITATIONS***
COMPARAISON ENTRE LE BASSIN D'OURS ET GOROM-GOROM

Postes	J	F	M	A	M	Jn	Jt	A	S	O	N	D
Djalafanka (mm) (6 années) (%)	0 (0)	2 (0)	2 (1)	21 (1)	70 (7)	124 (13)	164 (29)	72 (32)	10 (12)	0 (5)	0 (0)	(0)
Gorom (mm) (26 années) (%)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	4 (1)	18 (4)	68 (15)	124 (27)	158 (35)	67 (15)	12 (5)	1 (0)	0 (0)

*Moyennes interannuelles (mm) et pourcentage du total annuel (%)
Chevallier et al (1985)

COMPARAISON DES PLUVIOMETRIES ENTRE OURSI ET GOROM-GOROM *

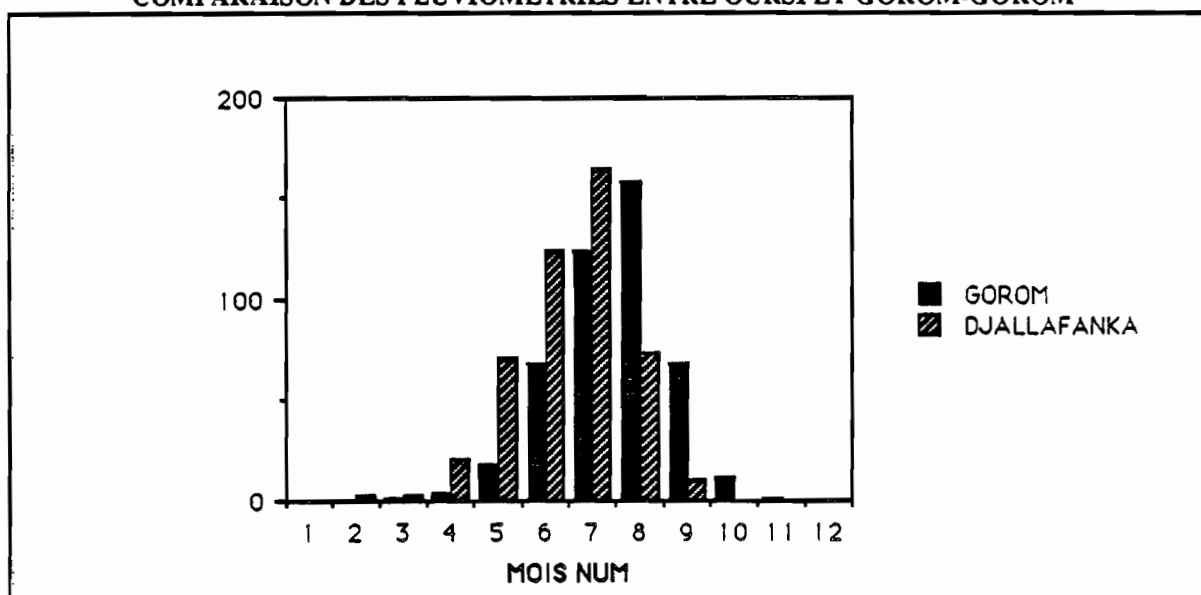


Figure n°8

* exprimées en mm

4- LA VÉGÉTATION

La région de la mare d'Oursi appartient au domaine de la steppe à épineux (Grouzis, 1987). C'est une formation herbeuse ouverte dans laquelle les graminées présentent des caractères de xéromorphie.

L'installation de la végétation est déterminée par les conditions édaphiques. Toutain (1976) reconnaît 23 groupements végétaux que Grouzis (1987) classe en quatre ensembles (tableaux n° 4 a et 4 b) :

- les formations des dunes et des ensablements.
- les formations inondables dont une formation ripicole arborée.
- les formations liées aux cuirasses ferrugineuses.
- les formations liées aux affleurements rocheux.

Le recouvrement de la strate herbacée sur les sables éoliens peut atteindre 80% si les unités ne sont pas dégradées (Grouzis, 1987). Il est aussi fonction de la hauteur cumulée des pluies et de leur distribution temporelle. Le recouvrement de la strate arbustive de l'erg récent est faible, ne dépassant pas 5% alors que sur l'erg ancien, il peut atteindre 10% (Badiara, 1986). La densité ligneuse est plus importante dans les creux dunaires et cette contraction est due à l'aridification du milieu.

Le recouvrement herbacé très faible des glacis s'explique par le compactage très fort des formations superficielles. L'installation des herbacées se localise le plus souvent sur des microbuttes sableuses édifiées par apport éolien. Le point de départ de ces accumulations sableuses est habituellement une branche ou un tronc mort et tombé à terre. C'est dans les dépressions que les recouvrements herbacés et ligneux sont les plus fortement liés à la proximité des réserves en eau.

5- SCHÉMA D'ENSEMBLE

A travers la présentation du milieu physique, on voit que l'écosystème de la mare d'Oursi est complexe. La figure n° 9 proposée par Sicot (1978) résume bien cette complexité et les relations existant entre les divers éléments du milieu.

En définitive trois dynamiques agissant sur l'évolution du milieu peuvent être invoquées:

- la dynamique anthropique
- la dynamique éolienne
- la dynamique hydrique et végétale

Le facteur végétation est intimement lié au facteur hydrique. C'est pourquoi il est ici rattaché à ce dernier.

- La dynamique anthropique

Elle est liée aux activités agro-pastorales des sahéliens. Il convient de localiser sur les images satellitaires les secteurs de culture, et les secteurs de pâture. La dynamique anthropique peut s'apprécier de façon directe en étudiant successivement une vue en saison des pluies puis une vue en saison sèche. Pour les actions liées au pâturage des espèces fourragères on utilise les données de terrain relatives à l'état phénologique du couvert herbacé sur plusieurs sites test situés sur les secteurs de parcours du bétail. La période la plus favorable se situe en fin de saison humide lorsque les troupeaux ont commencé à entamer le stock fourrager. Si le repérage des zones de pâturage est satisfaisant avec le degré de résolution SPOT (20x20m), il en va autrement des zones de cultures. Les champs au Sahel possèdent la particularité d'être très hétérogènes du point de vue des états de surface. Il est en effet fréquent que l'agriculteur procède à des resemis sur les parties de la parcelle où le mil n'a pas levé. Ceci induit des taux différents de recouvrement du mil. De ce fait dans une classification de l'image satellitaire les champs portant la même culture appartiennent fréquemment à deux ou trois classes différentes. Il sera donc nécessaire d'en tenir compte pour l'évaluation du domaine agricole.

- La dynamique éolienne

Le vent possède une efficacité remarquable en zone semi-aride. Il n'existe malheureusement pas d'étude spécifique de l'action éolienne avec élaboration d'un dispositif de mesure. De nombreux témoignages de chercheurs ayant travaillé sur le site d'Oursi font état de déplacements et d'accumulations importantes de sables d'origine éolienne. C'est le cas de Pion qui a constaté l'édification d'accumulations sableuses sur le versant NE du massif de Koel en 1976 avec des épaisseurs comprises entre 3 et 5 mètres sur des sites qu'il avait prospecté 10 ans auparavant ! C'est exactement sur ces accumulations sableuses que le centre de techniques forestières tropicales (C.T.F.T) avait installé ses parcelles d'érosion (C.T.F.T, 1976-1977). En revenant sur les lieux en 1981 soit 3 ans après Pion constate alors que ces accumulations sont en phase de démantèlement sous les actions conjuguées de l'érosion hydrique et éolienne. Par ailleurs l'action éolienne est repérable sur certaines photographies aériennes lorsque l'on compare les jeux de 1955 et 1978 au 1:50.000 sur la zone d'interfluve au sud du bassin. Des blocs rocheux hauts d'un mètre environ sont visibles en 1978 alors qu'ils n'apparaissent pas en 1955. Ceci montre à quel point il serait erroné de considérer l'action éolienne comme négligeable. Il est essentiel d'en tenir compte même si elle est surtout axée sur l'action hydrique.

En ce qui concerne l'action éolienne, il serait utopique de tenter son étude de manière approfondie à l'aide des données satellitaires. Nous ne disposons pas d'informations quantitatives sur les modalités d'action du vent, l'importance des stocks de sables déplacés et des modifications subies par le paysage durant le cycle annuel. Rappelons que la déflation éolienne est surtout efficace pendant la longue saison sèche notamment dans sa phase finale.

ESPECES DOMINANTES DES UNITÉS DE VÉGÉTATION DÉFINIES PAR TOUTAIN (1976)*
Tableau n° 4 a (extrait de la notice de la carte) (Grouzis, 1987)

Symboles	Désignation des parcours	Strate herbacée	Strate ligneuse	Etat
FORMATIONS DES DUNES ET DES ENSABLEMENTS				
AMs ○	Pénéplaines dunaires du nord-ouest de l'Oudalan.	<i>Aristida mutabilis</i> et <i>Schoenefeldia gracilis</i>	<i>Guiera Senegalensis</i> et <i>Acacia senegal</i>	2 3
Cd	Cordons dunaires	<i>Cenchrus biflorus</i>	<i>Combretum glutinosum</i>	
○ Cdc	Faciès du centre de l'oudalan	+ <i>Aristida longiflora</i>		1 2 3
Cds	Faciès du sud de l'Oudalan	+ <i>Andropogon gayanus</i>	<i>Balanites aegyptiaca</i> et <i>Acacia albida</i>	3 4
(Cdo)	Faciès de crête au nord d'Oursi	+ <i>Schoenefeldia gracilis</i>	+ <i>Acacia raddiana</i>	
Ce	Ensablement peu épais	<i>Cenchrus biflorus</i>	<i>Acacia raddiana</i>	
○ Ces	Faciès des bas de pentes dunaires et des pénéplaines interdunaires	+ <i>Aristida mutabilis</i> et <i>Schoenefeldia gracilis</i>		2 3
○ Cee	Faciès des ensablements éoliens et des anciens cordons dunaires arasés	+ <i>Eragrostis tremula</i> et <i>Andropogon gayanus</i>	+ <i>Piliostigma reticulatum</i> et <i>Acacia adansonii</i>	2 3
○ Cep	Faciès sur piemont d'inselberg	+ <i>Schoenefeldia gracilis</i> et <i>Aristida mutabilis</i>	+ <i>Acacia adansonii</i> <i>Combretum glutinosum</i>	2 3
● Csd (Cdsa)	Creux interdunaire faciès anthropique	<i>Schoenefeldia gracilis</i> et <i>Chloris pilosa</i>	<i>Bauhinia rufescens</i> + <i>Acacia albida</i>	1 2
FORMATION RIPICOLE				
FRS ▽	Talweg important	<i>Echinochloa colona</i> et <i>Panicum anabaptistum</i>	<i>Anogeissus leiocarpus</i> <i>Piliostigma reticulatum</i>	1 2
FORMATIONS INONDABLES				
MFs	Mare à inondation de faible durée	<i>Echinochloa colona</i> et <i>Oryza barthii</i>	<i>Mitrigyna inermis</i> ou <i>Acacia seyal</i>	
MVs	Mare inondée en début de saison sèche	<i>Vetiveria nigriflora</i>	<i>Acacia nilotica</i>	
MBS	Mare à inondation prolongée	<i>Oryza longistaminata</i> et <i>Echinochloa stagnina</i>	sans	

* La légende se trouve après le tableau 5b.

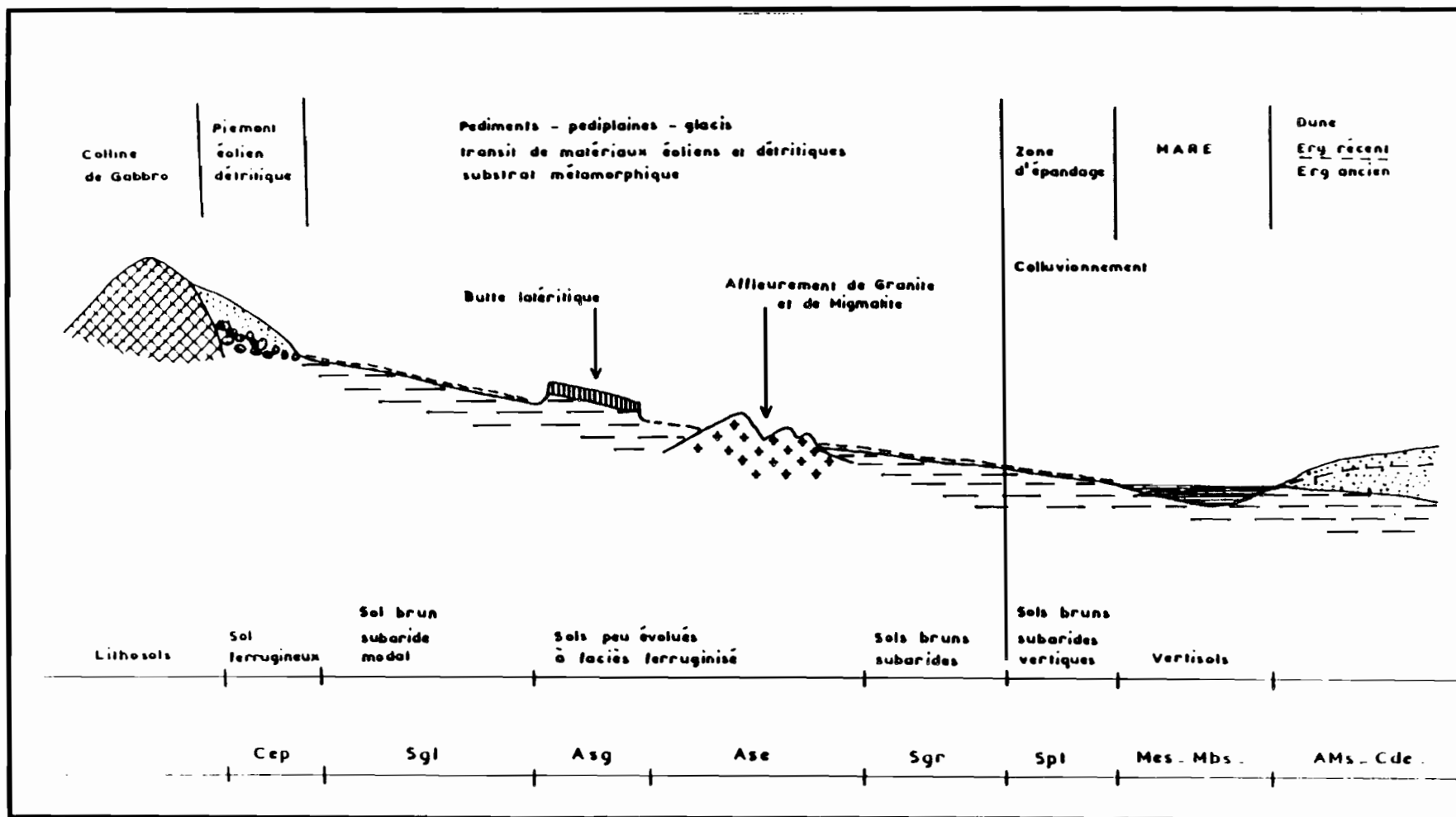
ESPECES DOMINANTES DES UNITÉS DE VÉGÉTATION DÉFINIES PAR TOUTAIN (1976)
Tableau n° 4 b (extrait de la notice de la carte) (Grouzis, 1987)

Symboles	Désignation des parcours	Strate herbacée	Strate ligneuse	Etat
FORMATIONS LIEES AUX CUIRASSES FERRUGINEUSES				
II	Bowé et inselberg latéritique	<i>Aristida adscensionis</i>	<i>Combretum micranthum</i> <i>Pterocarpus lucens</i>	
AS	Bush	<i>Aristida adscensionis</i> et <i>Schoenefeldia gracilis</i>	<i>Combretum micranthum</i> <i>Pterocarpus lucens</i>	
■ ASg	Faciès sur pentes gravillonnaires	+ <i>Schizachyrium exile</i>	+ <i>Acacia laeta</i> et <i>Boscia senegalensis</i>	3
■ ASc	Faciès sur sol colluvionné	+ <i>Panicum laetum</i> et <i>Pennisetum pedicellatum</i>	+ <i>Commiphora africana</i> <i>Acacia laeta</i> et <i>Grewia bicolor</i>	2 3 4
□ ASe	Faciès sur sol plus ou moins sableux	+ <i>Eragrostis tremula</i> et <i>Panicum laetum</i>	+ <i>Ziziphus mauritiana</i> et <i>Acacia raddiana</i>	2 3 4
ASd	Faciès des bas de pentes et des dépressions	+ <i>Brachiaria lata</i> , <i>Pennisetum pedicellatum</i> <i>Panicum laetum</i>	+ <i>Grewia bicolor</i> et <i>Acacia laeta</i>	1 2
FORMATION LIEES AUX AFFLEUREMENTS ROCHEUX				
IR	Affleurements et inselberg <i>Aristida funiculata</i>	<i>Aristida adscensionis</i> et	Variable	
Sg	Glacis	<i>Schoenefeldia gracilis</i>	<i>Acacia spp.</i>	
△ Sgl	Faciès sur glacis pierreux	<i>Urochloa trichopus</i>	<i>Acacia laeta</i>	3 4
Sgs	Faciès sur glacis pierreux	<i>Panicum laetum</i>	<i>Acacia seyal</i>	1 2
▲ Sgr	Faciès des glacis colluvionnés sur sol halomorphe	<i>Aristida adscensionis</i> <i>Panicum laetum</i>	<i>Acacia raddiana</i>	3 4
Spt	Depressions et talwegs	<i>Panicum laetum</i> et	<i>Acacia seyal</i>	1
▽		<i>Schoenefeldia gracilis</i>	<i>Acacia adansonii</i>	2 3 4

+ indique que la composition floristique du faciès s'additionne à celle du groupement général

L'état de la végétation est exprimé selon la classification suivante :

- 1 Bon état du tapis herbacé et de la strate ligneuse
- 2 Début de dégradation, tapis herbacé éclairci, strate ligneuse stable.
- 3 Dégradation importante, tapis herbacé très discontinu, mort de quelques ligneux.
- 4 Dégradation très avancée, tapis herbacé très réduit ou disparu, nombreux ligneux morts ou disparus.



(Sicot, 1978)

**SCHEMA D'ORGANISATION DU BASSIN DE LA MARE D'OURSI
SUIVANT UNE TOPOSEQUENCE**

Figure n° 9

- La dynamique hydrique

L'eau est un facteur dynamique puissant agissant sur l'évolution du paysage aussi bien en ce qui concerne la production végétale primaire, que l'évolution des sols et le façonnement morphoclimatique. La dynamique hydrique sur le milieu sahélien est mieux connue et les informations disponibles sont nombreuses en particulier sur le bassin d'Oursi. De plus, la dynamique hydrique se révèle beaucoup plus efficace dans le façonnement du paysage que la dynamique éolienne, particulièrement dans cette partie du Sahel. On dispose ainsi pour Oursi du travail effectué par toute une équipe d'hydrologues de l'O.R.S.T.O.M de 1975 à 1981 dans le cadre du projet D.G.R.S.T. L'étude fine des caractères hydrodynamiques des états de surface a été faite sur chaque sous bassin-versant composant celui de la mare d'Oursi (Chevallier et al, 1985). Les modalités de façonnement des reliefs ont été décrites par une équipe de géomorphologues toujours au sein du projet D.G.R.S.T. (Joly et al, 1980) et constituent des indications précieuses qui vont servir à guider notre approche.

La figure n°10 synthétise les phases du cycle de l'eau en milieu sahélien. Deux grands comportements hydrodynamiques semblent prédominer après la pluie : l'infiltration ou le ruissellement. Il convient toutefois de ne pas oublier le rôle de l'évaporation qui est important durant toutes les phases du cycle. L'infiltration se produit surtout dans les zones de sables éoliens et sur les piémonts des massifs cristallins. Quant au ruissellement diffus, il est lié aux zones de glakis et aux lithosols. Le bassin-versant d'Oursi est composé de sous bassins versants autonomes. L'étude du ruissellement sur ces derniers a été faite par les hydrologues de l'O.R.S.T.O.M. Pour chacun des sous-bassins le ruissellement dépend des formations superficielles. Or ces dernières sont hétérogènes à l'intérieur d'un même sous-bassin, d'où la difficulté à mesurer ce facteur. Néanmoins l'estimation qui en est faite montre que le ruissellement peut atteindre des valeurs élevées pour les sous-bassins dont les formations superficielles sont de nature argileuse. Sur une période de 5 ans (1977-1981), la lame ruisselée du sous-bassin de Djallafanka est de 138,4 mm pour une pluviométrie de 377,9 mm. Il possède le coefficient de ruissellement le plus fort du bassin d'Oursi (36,6%). A l'inverse le sous-bassin de Koel a le coefficient de ruissellement le plus bas (12,6) ce qui correspond à une lame ruisselée de 44,9 mm pour une pluviométrie de 357,1 mm (Chevallier et al 1985).

- Conclusion

Le bassin-versant de la mare d'Oursi possède des états de surface variés et souvent complexes. De plus l'étude des dynamiques agissant sur le paysage est connue partiellement. En effet les études des facteurs du milieu ont été réalisées sur des sites-tests que l'on estime représentatifs de certaines unités du paysage. L'appréhension de ces facteurs à l'aide d'images satellitaires haute résolution peut contribuer à mieux comprendre les interactions entre ces différents facteurs et localiser, de manière précise, leurs lieux d'action.

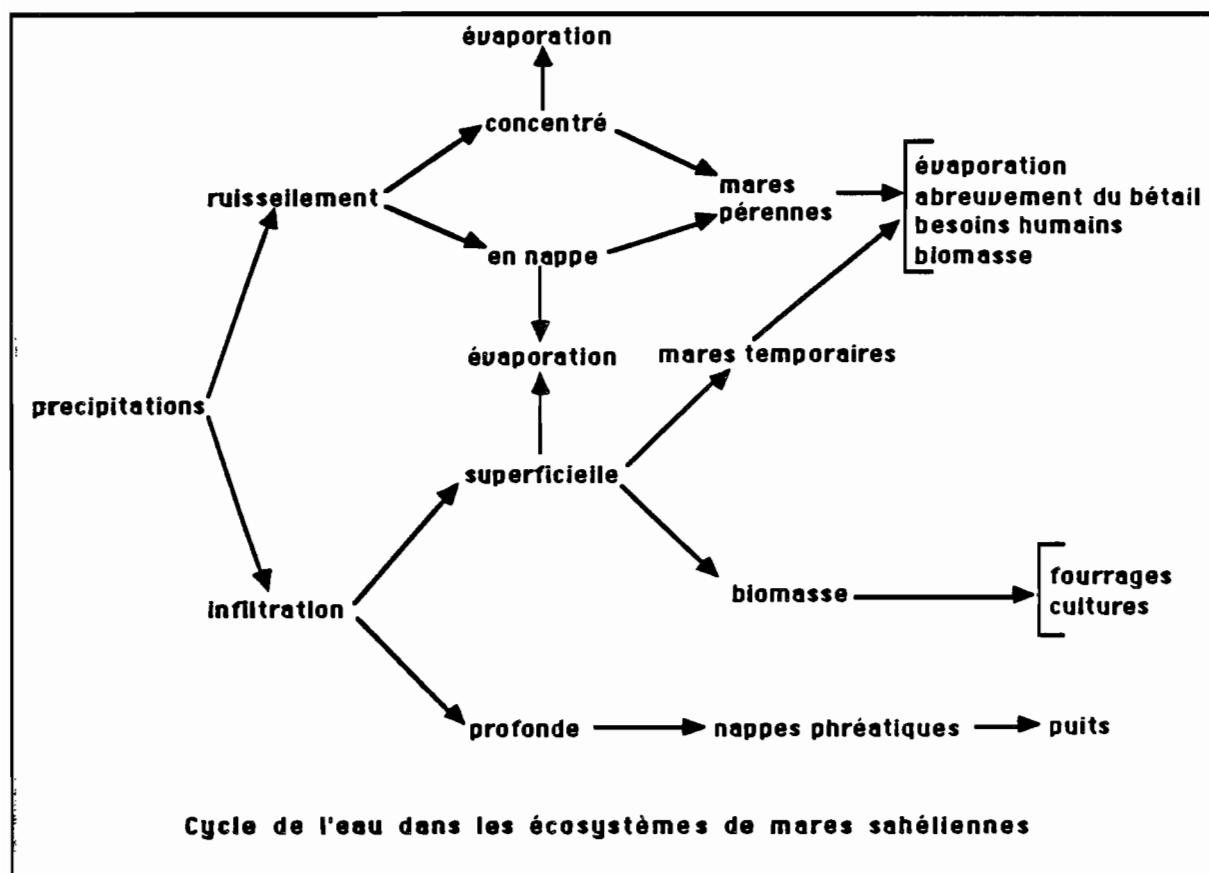
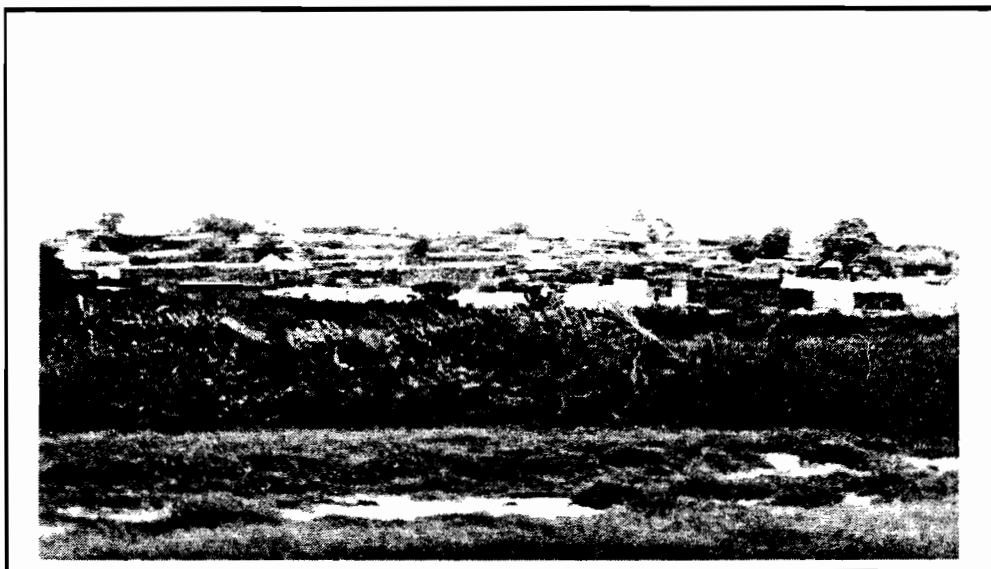


Figure n°10



Bordure nord de la mare à proximité du village d'Oursi



Parc à *Acacia albida* près du village d'Oursi



**Erg récent: régénérescence de ligneux
sur une zone dégradée (*Balanites aegyptica*)**

BASSIN D'OURS

- De Koel vers Tin Edgar

**a: glacis de Koel, b: marigots, c: station ORSTOM de Djallafanka
d: zone de convergence des marigots, e: glacis de Tin Edgar, f: Tin
Edgar**



- De Koel vers Warga

**a: boules de gabbros, b: piémont sableux, c: glacis arénacé,
d: butte cuirassée de Kouni-Kouni, e: Warga**



- Butte cuirassée de Kouni-Kouni
a: dalle sommitale, b: altérites granitiques
recouvertes par le débris ferrugineux, c: Kaolinite



- Zone de convergence des marigots
a: mélange sablo-argileux, b: strate herbacée à *Panicum laetum*,
c: strate ligneuse à *Acacia seyal* et *Acacia nilotica* var *adansonii*

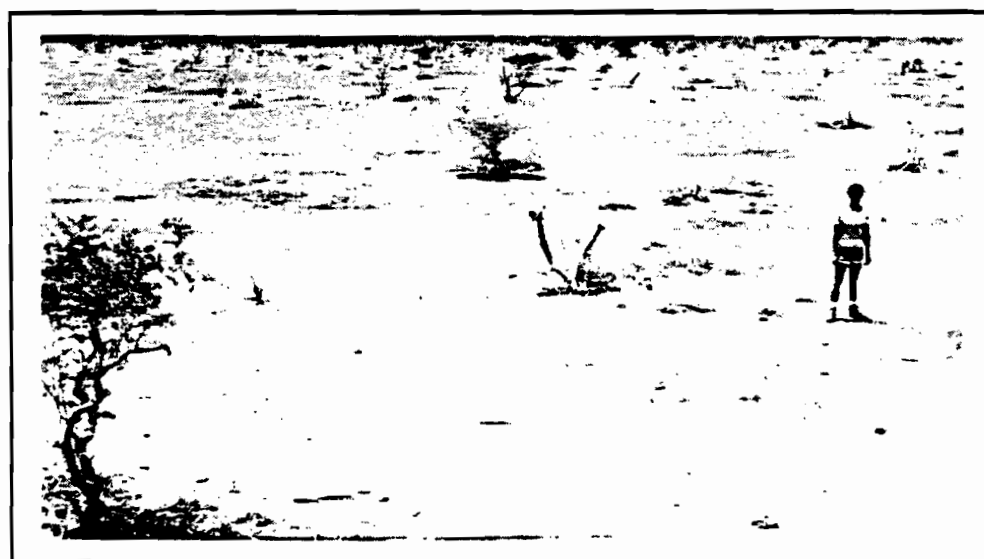
DEGRADATION DES UNITES DU PAYSAGE



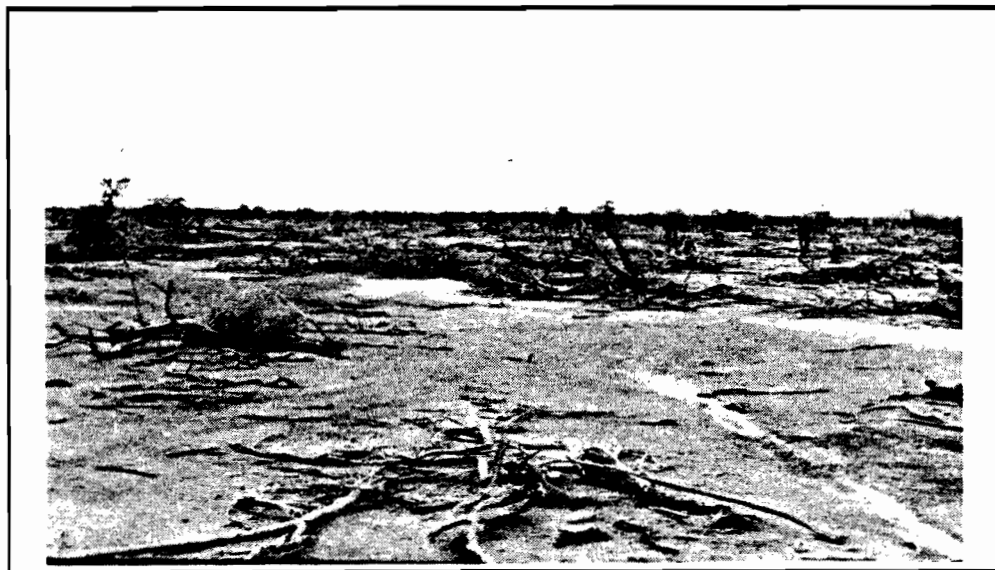
Remobilisation de l'erg récent au nord d'Oursi



Sapement des berges des marigots



Dénudation du glaciis autonome des Outardes



Brousse tigrée dégradée vers Zamarkoye



Ravinement du piémont sableux de Koel



Réseau digité d'incisions sur un glais arénacé

CHAPITRE VI

LES DONNEES SATELLITAIRES LES DONNEES TERRAIN

1- CHOIX DES DATES

1.1- Les dates retenues

C'est évidemment l'objectif que nous nous sommes assigné qui fixe le choix des dates. Dans le cadre du projet P.E.P.S. initial, le choix des dates était dicté par l'observation de la phénologie des plantes herbacées de façon préférentielle. A cette fin, quatre vues avaient été programmées dont trois en 1986 et une en 1987.

- La première se situe en début d'hivernage entre le 20 juillet et le 10 août. La végétation herbacée est en début de croissance.
- La deuxième entre le 20 août et le 10 septembre, période à laquelle théoriquement la végétation herbacée possède une croissance maximum.
- La troisième entre le 20 octobre et le 10 novembre. La végétation herbacée est alors sénescence et le stock de fourrage sec peut être estimé.
- Enfin, une quatrième vue était programmée entre le 20 avril et le 10 mai 1987 en fin de saison sèche.

Durant ces quatre périodes une équipe de chercheurs devait procéder à des relevés de terrain selon un protocole précis et répéter la même opération aux périodes retenues. En définitive, les données SPOT-HRV ont été acquises aux dates suivantes :

- image 1 : 9 août 1986
- image 2 : 4 septembre 1986
- image 3 : 17 décembre 1986
- image 4 : 27 mai 1987

L'objectif initial étant d'analyser la dynamique d'un paysage sahélien au cours d'un cycle annuel, il était donc nécessaire de disposer de plusieurs vues réparties sur le cycle annuel à des périodes propices et de procéder par ailleurs à des contrôles de terrain synchrones avec les prises de vues du satellite.

Or l'image du 27 mai 1987 n'a pas subi de contrôle au sol à cette période et il est donc pour le moins délicat d'exploiter cette image. En ce qui concerne l'image du 17 décembre 1986, les données de terrain les plus proches dans le temps ont été relevées fin octobre. Il est donc impossible de mettre en relation les observations terrain relatives à la biomasse sèche et l'image du 17 décembre, certaines zones ayant été pâturées par le bétail. En prenant la précaution d'exclure les observations relatives aux bas-fonds, unités encore sujettes aux variations des phénomènes climatiques et bioclimatiques, les autres variables observées au sol peuvent servir à l'interprétation de l'image du 17 décembre. La fin des pluies datant de mi-septembre, les états de surface ont évolué lentement entre la fin du mois d'octobre et le 17 décembre. Il convient cependant de rester prudent dans les conclusions que l'on peut en tirer. L'image du 9 août est peu contrastée par rapport à celle du 4 septembre et ne sera pas retenue.

En conséquence deux images seulement ont été sélectionnées: celles du 4 septembre et du 17 décembre 1986, l'objectif consistant alors uniquement à évaluer le potentiel dynamique des unités du paysage entre la saison des pluies et la saison sèche.

1.2- Caractéristiques des prises de vues sélectionnées

Les paramètres concernant les prises de vues du 4 septembre et du 17 décembre 1986 sont consignés en annexe II. L'angle de visée des capteurs est le même aux deux dates : $10^{\circ}4$. La comparaison des deux tableaux montre que les coordonnées géographiques des scènes sont légèrement décalées. Un recalage géométrique sera donc nécessaire avant la création d'images multidates. On constate d'autre part une différence dans les hauteurs d'élévation solaire. Ce qui induit l'existence d'ombres portées en plus grande proportion sur l'image de décembre. La comparaison des histogrammes canal par canal des deux images (annexe II) indique des changements intervenus dans cette région du point de vue climatique et bioclimatique.

Les histogrammes des canaux de décembre sont plus étalés. En particulier, les canaux XS1 et XS2 possèdent une dissymétrie marquée vers les valeurs élevées surtout pour XS2. L'observation de ce même canal en septembre montre au contraire une faible dissymétrie des valeurs faibles. Cette différence de comportement est à imputer principalement à la végétation active en septembre qui masque les états de surface minéraux.

1.3- Sélection du cadre de travail

La zone d'étude englobe une surface beaucoup plus grande que le seul bassin d'Oursi. Il a paru intéressant, en effet, de tenter une première extrapolation des résultats obtenus sur le bassin-versant d'Oursi à celui du Gountouré et d'une partie de celui de Yomboli situés tous les deux à l'est du bassin d'Oursi (figure n° 11). La fenêtre analysée comporte 1101 lignes sur 1500 colonnes ce qui représente 660,6 km², soit environ 1/6 de l'image SPOT totale.

Les histogrammes des canaux de la fenêtre sélectionnée sont à comparer d'une part avec ceux de l'image totale et d'autre part entre les deux dates étudiées (annexe II). On remarque qu'en septembre les histogrammes des canaux sont sensiblement similaires pour la comparaison image/scène. Au contraire, en décembre, le comportement des courbes spectrales s'avère différent. En particulier, il n'y a pas de dissymétrie marquée des valeurs élevées sur les canaux XS1 et XS2.

CADRE DE TRAVAIL SÉLECTIONNÉ
SUR LES SCENES SPOT-HRV

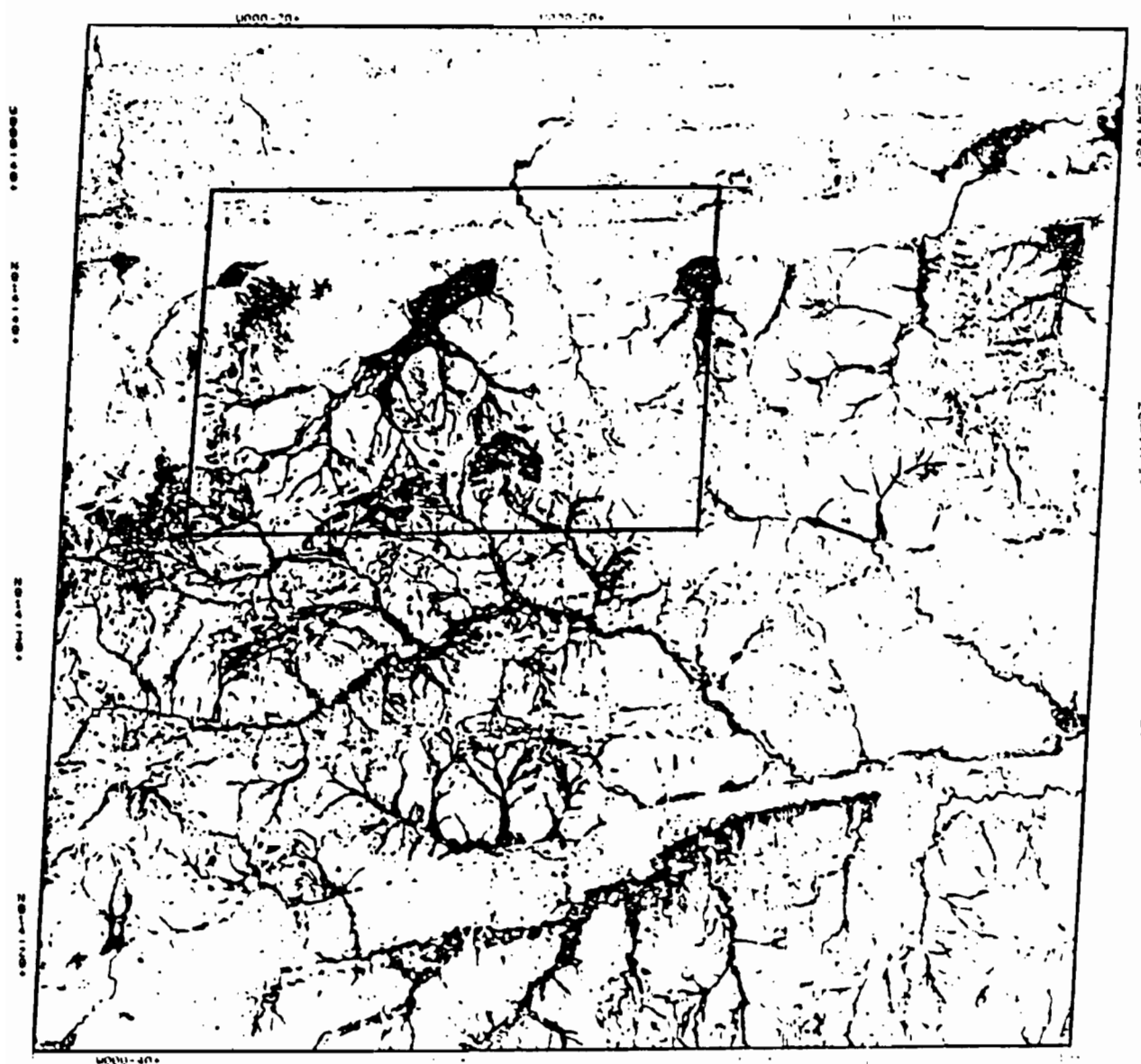


Figure n° 11

L'étude comparative des images de septembre et de décembre pour la fenêtre sélectionnée montre que les courbes d'histogrammes des trois canaux de décembre présentent des pics plus fins et un étalement plus grand des valeurs radiométriques. Les deux dates présentent une légère dissymétrie à gauche sur l'ensemble des canaux. Elle indique une végétation active aux deux dates mais avec cependant une notable diminution des surfaces par cette végétation. On note en décembre la présence dans la partie dissymétrique des canaux d'un petit pic bien individualisé. La distribution est donc bimodale et le pic mineur signale précisément la végétation active des bas-fonds, très restreinte à cette époque, tranchant avec le reste du milieu devenu aride. En septembre, la végétation active qui couvre à la fois les dépressions et les unités sableuses du paysage se traduit sur les courbes des histogrammes par des paliers successifs et progressifs dans les parties dissymétriques à gauche.

2- CHOIX DES PARAMETRES IMAGES

2.1- Les variables images disponibles

On peut regrouper les variables images en trois groupes bien distincts :

- Les canaux bruts SPOT

SPOT-HRV possède trois canaux (XS1, XS2, XS3). XS1 se révèle inutilisable car il présente des artéfacts importants dus à la non-égalisation des barrettes du détecteur. On rencontre ce problème sur toutes les scènes en notre possession. Des essais de rectification radiométrique effectués sur la scène du 9 août 1986 par le C.N.E.S se sont avérés inefficaces. En conséquence, XS1 ne sera pas pris en compte dans les modules de classification des images. Cependant les trois canaux bruts seront utilisés pour dresser les graphes des signatures spectrales des unités radiométriques.

- Les néocanaux synthétiques

Les néocanaux synthétiques sont des combinaisons mathématiques réalisées à partir des canaux originaux. Il s'agit de ratios ou de combinaisons linéaires. Il existe de nombreux indices, déjà testés par des équipes de chercheurs, qui peuvent être appliqués aux canaux SPOT-HRV. En fonction du fait que seuls XS2 et XS3 sont disponibles, deux indices normalisés d'une utilisation courante sont réalisables :

- l'indice de végétation verte (TVI6 Rouse et al, 1973).

$$IV = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2} + 0,5$$

L'indice de végétation verte, permet, en principe, de distinguer la biomasse synthétiquement active du reste, sol ou végétation sèche. Ceci est dû à la forte corrélation qui existe entre la réponse spectrale du rouge caractérisée par une forte absorption, et la concentration en chlorophylle, la réponse dans le proche infra-rouge, caractérisée par une forte réflexion, et l'indice foliaire ou densité de végétation verte (Bariou et al 1985). Par ailleurs divers travaux ont montré que dans le cas des recouvrements végétaux verts inférieurs à 25%, l'indice de brillance offrait une meilleure corrélation que l'indice de végétation verte (Diakité, 1987).

- l'indice de brillance utilisé est le suivant (Anglade, 1982).

$$IB = \sqrt{(XS2)^2 + (XS3)^2}$$

- Les axes factoriels

L'analyse en composantes principales (A.C.P.) a pour rôle de "compresser" l'information contenue dans un nuage de points en procédant à une rotation du système d'axes (Volle, 1985). L'information originelle est restituée sous forme d'axes factoriels qui sont les combinaisons linéaires des variables initiales. Notons deux caractéristiques intéressantes à propos des axes factoriels :

- ils sont hiérarchisés
- ils ne sont pas corrélés linéairement entre eux

Divers essais de classification ont été faits tant sur les canaux bruts que sur les néocanaux synthétiques et les axes factoriels. Ce sont ces derniers qui se sont révélés les plus aptes à la classification des images. Par contre, leur utilisation pour l'interprétation des unités radiométriques est assez délicate. En effet, le graphe visualisé sur un espace à deux dimensions est une image déformée de la réalité, les points étant des projections d'espace à n dimensions.

2.2- Sélection des axes factoriels

Tableau n° 5

PARAMETRES DES AXES FACTORIELS

Images SPOT-HRV - zone de la mare d'Oursi

4 SEPTEMBRE 1986				17 DECEMBRE 1986		
CANAUX	AXE1	AXE2		CANAUX	AXE1	AXE2
MATRICE DES CORRELATIONS				MATRICE DES CORRELATIONS		
XS2	1,00	0,67		XS2	1,00	0,90
XS3	0,67	1,00		XS3	0,90	1,00
VALEURS PROPRES				VALEURS PROPRES		
	249,69	48,81			278,24	14,52
COEFFICIENT A APPLIQUER				COEFFICIENT A APPLIQUER		
XS2	0,75	0,66		XS2	-0,70	0,71
XS3	0,66	-0,75		XS3	-0,71	-0,70

Le canal XS1 étant inopérant, les axes factoriels ont été calculés uniquement par XS2 et XS3 pour les deux dates. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau n° 5

- L'image du 4 septembre 1986

La matrice des corrélations indique que XS2 et XS3 ont un indice de corrélation moyen à cette date. La visualisation de ces deux axes factoriels montre que l'axe 1 donne des indications sur la brillance des états de surface (contribution des variables aux axes 0,75 et 0,66) et l'axe 2 des indications sur l'état de la végétation verte. Une comparaison visuelle Axe 1 - IB et Axe 2 - IV indique que l'on obtient une plus grande précision avec les axes factoriels, phénomène somme toute logique puisque les images générées sont stratifiées selon leur taux de variance.

- L'image du 17 décembre 1986

Les canaux XS2 et XS3 sont corrélés de façon hautement significative à cette date. Bien sûr ceci est à mettre en relation avec les conditions climatiques et bioclimatiques du moment. Ceci indique qu'il y a peu de végétation active dans la fenêtre étudiée à cette période.

3- LES REALITES TERRAIN

Afin d'obtenir des relations interprétables entre les valeurs radiométriques enregistrées et les états de surface, des opérations de contrôle ont été effectuées au sol durant les périodes des passages programmés de prise de vue du satellite SPOT. Ces opérations de contrôle sont faites sur des sites-tests choisis à partir de la classification réalisée d'après les simulations SPOT d'octobre 1981. La validité de cette classification a été au préalable vérifiée sur le terrain par les chercheurs. Le nombre de sites-tests sélectionnés est de 36 (figure n° 12) répartis sur l'ensemble du bassin-versant. En outre quatre champs cultivés sur sable ont été partiellement suivis. Le protocole de terrain sur les 36 sites-tests, comprend les opérations suivantes :

- analyse et caractérisation de l'organisation du couvert végétal (méthode des points-contacts).
- analyse et caractérisation des organisations pédologiques superficielles.

Sur ces 36 sites, 11 ont été suivis de façon plus intensive. Il s'agit des sites notés B1 à B10 et G5. Les opérations complémentaires sont les suivantes :

- coupe de phytomasse herbacée
- mesures radiométriques couplées avec la coupe de biomasse (avec un radiomètre portable CIMEL)
- mesures radiométriques sur des transects de 500 m, avec un pas de mesure de 2,5 m.
- mesures topographiques fines le long des transects de 500 m.

De plus, un réseau formé de cinq pluviographes et de onze pluviomètres répartis sur l'ensemble du bassin a permis de suivre la pluviométrie journalière dans la période du 1er juin au 30 septembre 1986. Complétant ce dispositif, un limnigraphe est placé dans la mare d'Oursi ; la station climatique de Djallafanka située au centre du bassin recueille depuis 1976 les données climatiques.

3.1- Situation bioclimatique au 4 septembre 1986.

- La pluviométrie

L'examen de la composition colorée du 4 septembre 1986 suggère une hétérogénéité dans la répartition inégale des pluies sur l'ensemble du bassin (figures n° 13, 14 et 15) à travers l'examen de la végétation active. Ce fait est induit par l'hétérogénéité du couvert herbacé que l'on observe sur l'image. En particulier, au nord-ouest de la scène, le phénomène est parfaitement visible. Les tableaux n° 6 et 7 donnent la répartition des pluies sur le bassin entre le 1er juin et le 30 septembre 1986. Leurs examens confirment la grande hétérogénéité du champ de pluies qui existe sur le bassin comme le montrent aussi les figures n° 18, 19 et 20. Les hauteurs d'eau maximales de la mare sont atteintes début septembre (hauteur maximale le 7 septembre, 294 mm) puis qu'elles diminuent régulièrement jusqu'au 10 novembre, date de fin d'observation (cf; annexe II).

- Etat de la végétation verte

Le suivi des sites b1 à b10 effectué par Badiara (1986) montre aussi que la phytomasse verte possède un comportement différent selon qu'elle se situe en zone de glacis, au sud de la fenêtre, ou en zone dunaire au nord.

- La zone des glacis possède peu de végétation herbacée active. Celle-ci est concentrée pour l'essentiel sur les piémonts de placage sableux au nord des massifs de gabbros et aux abords des talwegs là où l'humidité des sols est suffisante pour permettre le développement des plantes. Dans la zone de glacis, la végétation herbacée verte augmente lentement entre fin juillet et atteint son maximum début septembre (figure n°16).

- La zone dunaire sableuse offre les meilleures conditions édaphiques à l'implantation des herbacées. Mais à la date de prise de vue cette zone, à l'exception des champs de mil, ne semble pas avoir beaucoup de végétation herbacée active alors que ce fait est bien établi sur l'image du 9 août 1986 (un mois plus tôt). En zone dunaire, la régression brutale de la végétation verte est consécutive au manque de pluies utiles pour la période considérée. Le tableau n°7 montre bien le déficit enregistré sur ces secteurs, indiquant la pluviométrie décadaire par postes.

3.2- Situation bioclimatique au 17 décembre 1986

- Etat hydrique

Les pluies ont cessé depuis la mi-septembre. En comparant l'évolution entre le 4 septembre et le 17 décembre, images 1 et 2, on constate une nette diminution du niveau de la mare. L'évaporation de la mare d'Oursi, mesurée à l'aide de limnigraphe et en saison sèche, est de 4,2 à 13,3 mm/jour de janvier à mai pour les années 1977-1983 (Chevallier et al 1985). Ces valeurs élevées, relevées sur l'échelle du limnigraphe doivent être mises aussi en relation avec l'infiltration des eaux à travers les fractures du socle infra-Cambrien du fond de la mare.

Les mares temporaires et de manière générale les bas-fonds argileux sont asséchés à cette date. Ils apparaissent sur l'image dans des teintes variant du gris sombre au brun clair suivant leur degré d'assèchement. La baisse du niveau de la mare d'Oursi met aussi en évidence les points d'abreuvement du bétail situés au nord près du village d'Oursi.

- Etat de la végétation

Sur la composition colorée la végétation herbacée active en septembre (teinte rose à cette époque sur l'image) forme maintenant un tapis graminéen sec de teinte grisée. Seules sont encore actives les espèces hydrophiles du centre de la mare et les ligneux situés aux abords des zones dépressionnaires soulignant notamment le cours des marigots.

- Conclusion

Les paramètres du milieu relevés durant les campagnes de terrain en 1986 serviront à interpréter les classifications d'images. On note cependant qu'au mois de décembre les contrôles de terrain ont été faits fin octobre. Ils devront donc être utilisés avec prudence.

Tableau n° 6

REPARTITION MENSUELLE DES PLUIES SUR LE BASSIN D'OURSI *

Période du 1 juin au 30 septembre 1986

STATIONS PLUVIOMETRIQUES								
Stations	1	2	3	4	5	6	7	8
MOIS								
JUIN	39,9	37,8	31,8	65,7	20,1	38,4	26,2	37,3
JUILLET	-	55,0	48,5	33,0	48,7	55,0	53,8	57,8
AOUT	43,3	47,2	32,6	50,4	24,6	37,4	26,1	47,5
SEPTEMBRE	65,0	64,1	60,0	54,5	45,9	50,0	49,0	61,0
TOTAL stations	148,2	204,1	172,9	203,6	139,3	180,8	155,1	203,6
Stations	9	10	11	12	13	14	15	16
MOIS								
JUIN	42,1	38,4	64,0	55,8	44,0	44,6	39,5	34,3
JUILLET	78,8	105,4	125,5	122,0	104,4	-	56,9	62,9
AOUT	41,9	63,6	120,8	100,6	99,0	-	77,6	76,5
SEPTEMBRE	46,5	-	113,5	83,7	91	-	38,0	37,8
TOTAL stations	209,3		423,8	362,1	338,4		212,0	211,5
STATIONS (pour le repérage des stations se reporter à la figure n° 15) - 1: Polaka - 2: Boum-Gourou - 3: Tin Edjar - 4: Mare de Tin Edjar - 5: Ouest Oursi - 6: Tin Araf - 7: Champs Oursi - 8: Est Oursi - 9: Gontouré - 10: Tounté - 11: Koel - 12: Kouni Kouni - 13: Djallafanka - 14: Warga - 15: Tchalol est - 16: Tchalol ouest								

(-) Enregistrements défectueux pour ces périodes ; * en mm

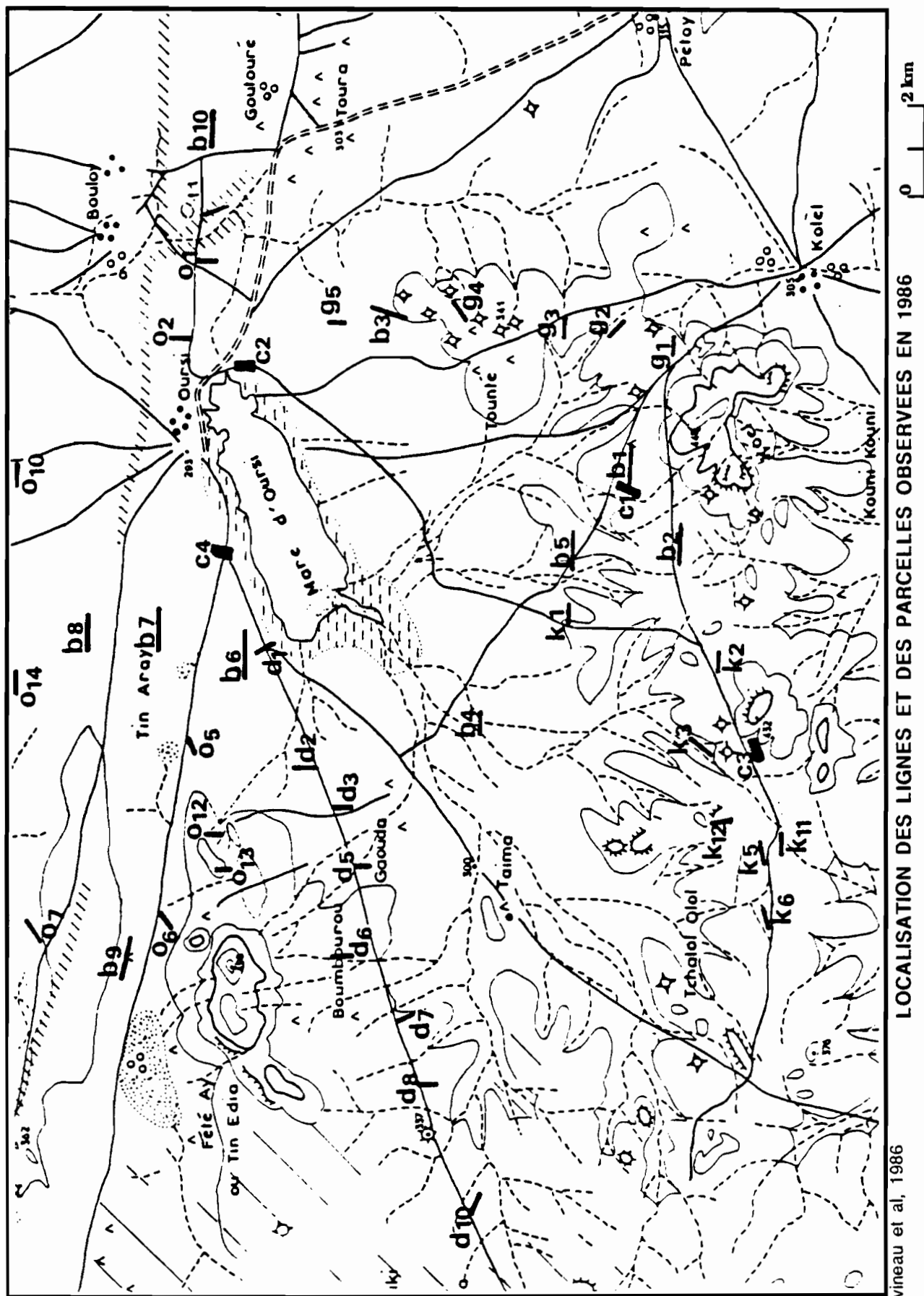


Figure n° 12

Tableau n° 7

REPARTITION (DECADAIRE) DES PLUIES SUR LE BASSIN D'OURSI
Période du 1 juin au 30 septembre 1986

		STATIONS PLUVIOMETRIQUES							
Stations		1	2	3	4	5	6	7	8
DECADE	I					2,5	3,0	3,5	
JUIN	II	27,0	27,8	30,2	59,2	13,6	31,5	15,0	23,8
	III	12,9	10,0	1,6	6,5	4,0	3,9	7,7	13,5
JUILLET	I	-	11,0	8,5	5,0	11,2	9,1	13,0	11,3
	II	-	40,0	36,0	27,0	32,0	38,7	36,5	38,9
	III	-	4,0	4,0	1,0	5,5	7,2	4,3	7,6
AOUT	I	7,1	9,0	6,7	14,5	11,6	17,8	12,7	21,5
	II	19,2	14,2	14,0	19,7	3,0	5,6	5,6	7,0
	III	17,0	24,0	11,9	16,2	10,0	14,0	7,8	19,0
SEPTEMBRE	I	50,0	49,0	45,0	39,5	30,9	35,0	34,0	46,0
	II								
	III	15,0	15,0	15,0					
		9	10	11	12	13	14	15	16
DECADE	I	9,5	4,0	3,5	4,0	6,2			
JUIN	II	22,6	18,1	41,5	38,8	15,5	34,0	26,9	23,0
	III	10,0	16,3	19,0	13,0	22,3	10,6	12,6	11,3
JUILLET	I	35,5	32,0	52,5	49,9	41,1	-	16,2	16,2
	II	36,0	62,9	55,0	61,8	54,1	-	31,5	40,7
	III	7,3	10,5	18,0	10,3	3,2	-	9,2	6,0
AOUT	I	13,5	31,6	30,1	27,5	32,1	18,7	20,5	14,3
	II	7,0	7,0	8,5	6,0	7,2	9,0	8,5	12,5
	III	21,4	25,0	82,2	67,1	59,7	-	48,6	49,7
SEPTEMBRE	I	32,5	-	107,0	79,7	87,2	-	33,0	32,8
	II		-				-		
	III	14,0	-	6,5	4,0	3,8	-	5,0	5,0

Pour la localisation des stations se reporter au tableau n°6

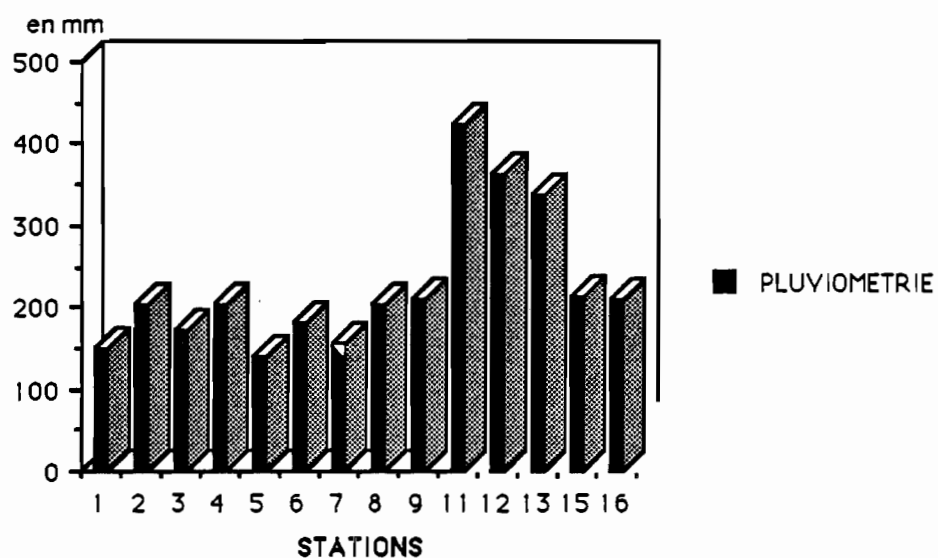


Figure n° 13

GRAPHE DE LA REPARTITION DES PLUIES SUR LE BASSIN D'OURSI
 Pluviométrie totale en 1986 (en mm)

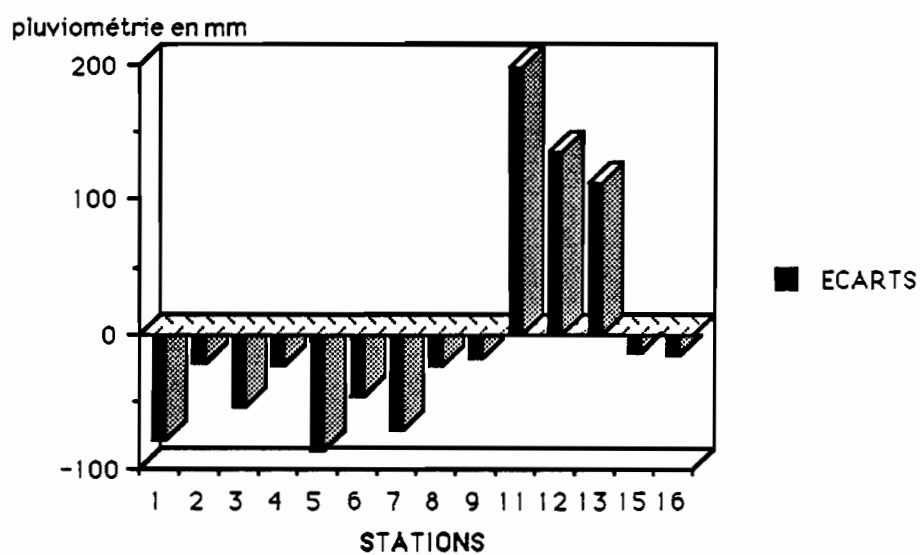
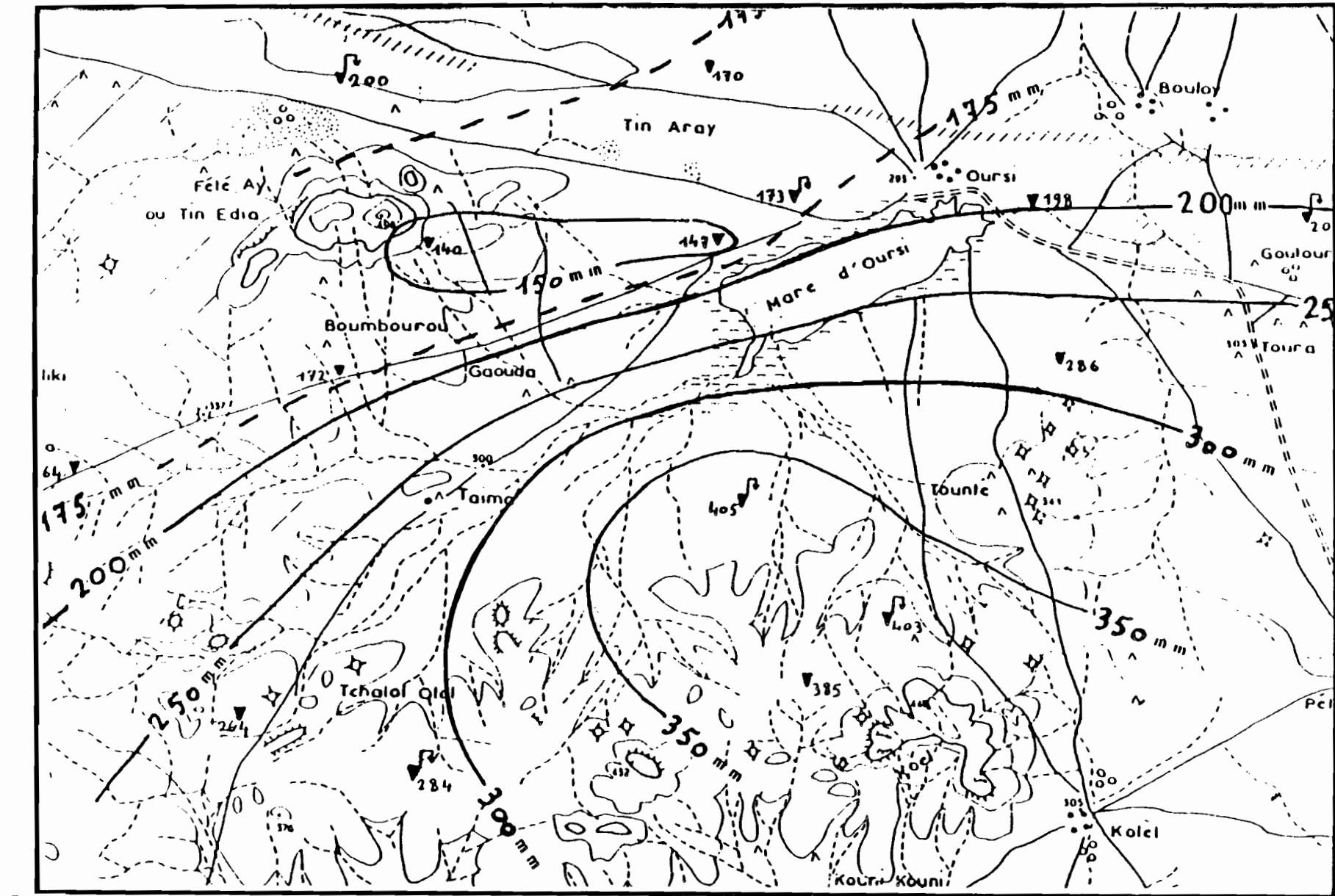


Figure n° 14

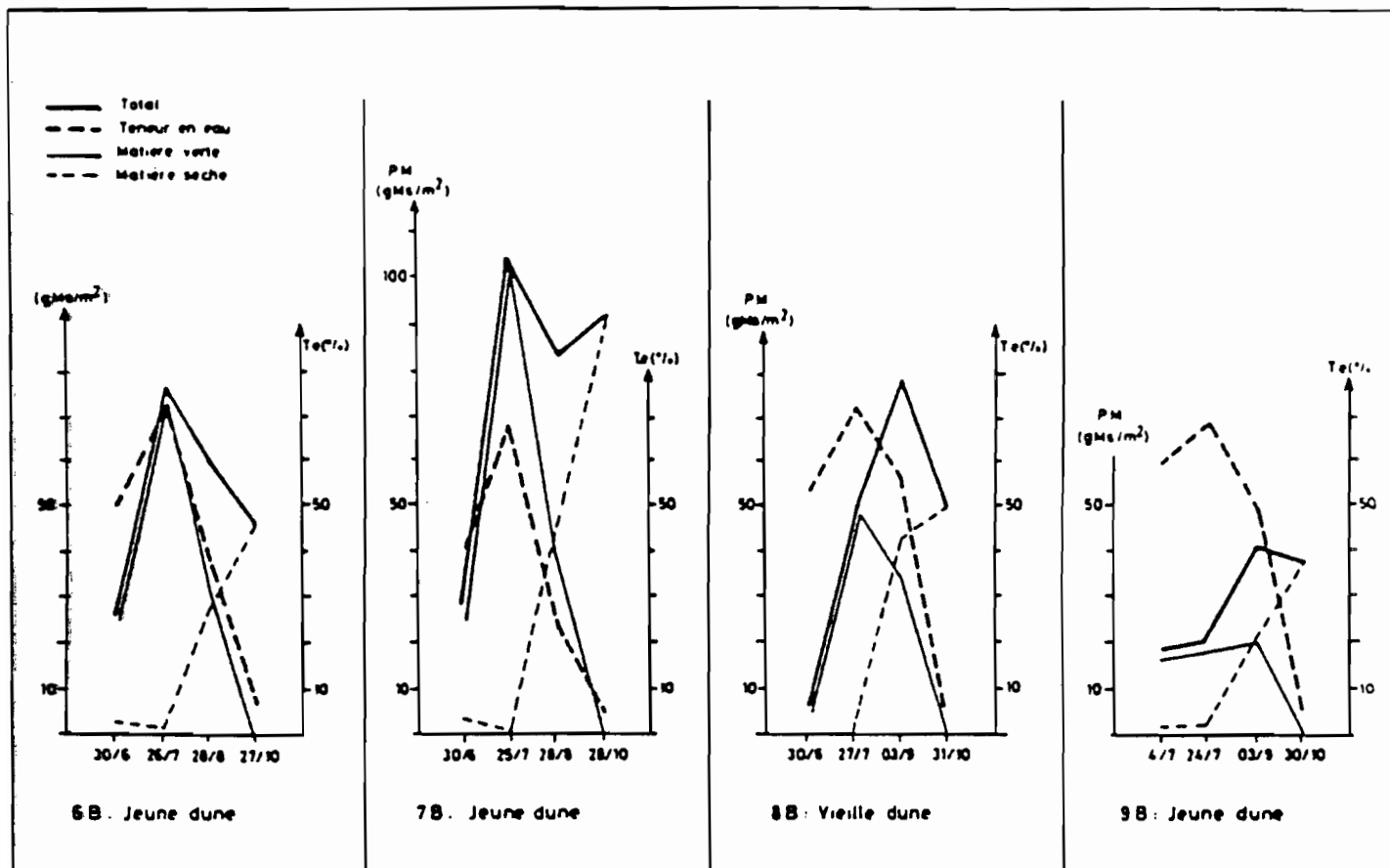
ECARTS A LA MOYENNE DE LA PLUVIOMETRIE DES STATIONS
 Pluviométrie totale en 1986 (en mm) - Moyenne = 226 mm



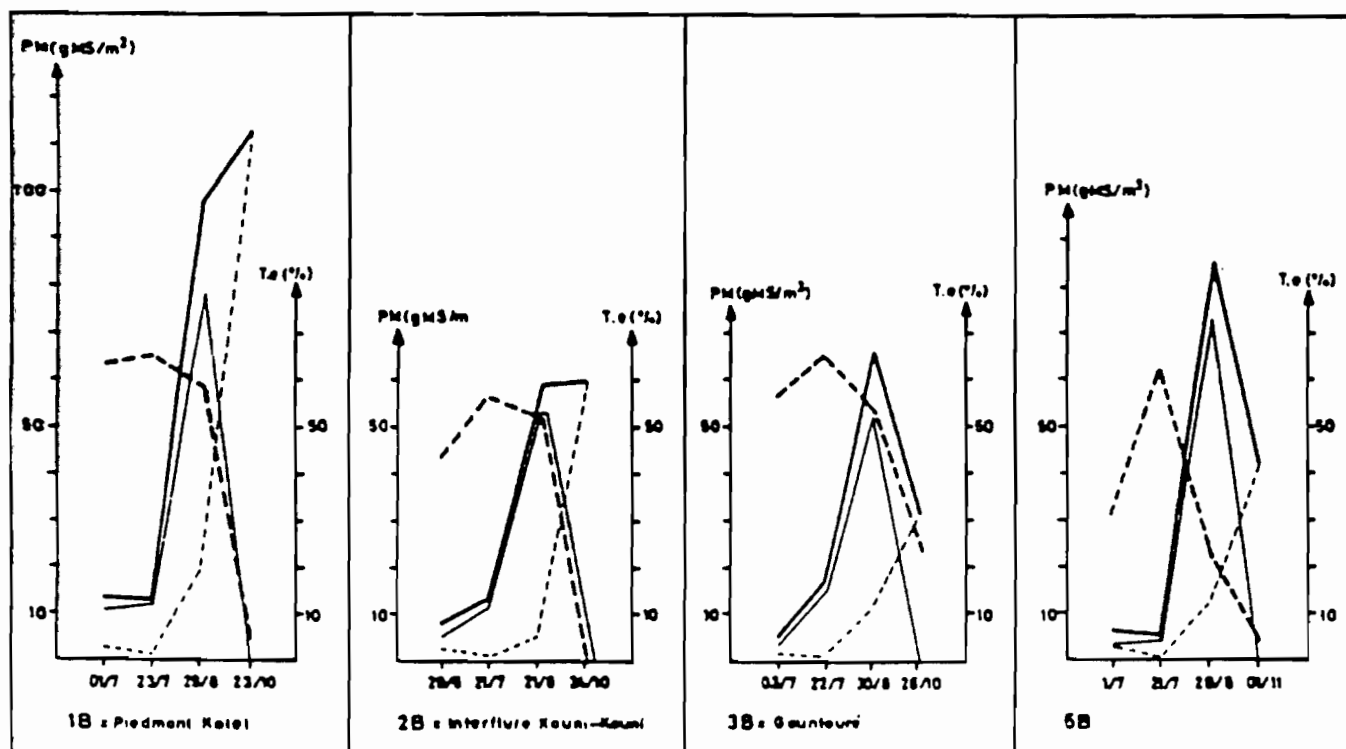
Devineau et al, 1986

PLUVIOMETRIES ANNUELLES OBSERVEES EN 1986
SUR LE BASSIN DE LA MARE D'OURS

Figure n° 15



a) sites de dunes



b) sites de glaciais

EVOLUTION DE LA PHYTOMASSE HERBACÉE SUR HUIT SITES
 Figure n° 21 (Badiara, 1986)

CHAPITRE VII

TRAITEMENT DE L'IMAGE SPOT-HRV DU 4 SEPTEMBRE 1986

Dans les chapîtres VII et VIII consacrés au classement des images en unités radiométriquement stables, il n'est pas nécessaire de justifier toutes les étapes de la méthode exposée en détail au chapitre III. Seuls sont donnés les résultats intermédiaires essentiels que sont les paramètres de segmentation de l'image en classes radiométriques stables. Les divers modules de classement sont regroupés dans la première partie des chapîtres.

Selon la méthode exposée précédemment chapitre III, l'analyse de l'image se fera en deux temps:

- recherche du nombre maximum de classes stables avec application logique du chaînage de méthodes et de critères statistiques.
- interprétation des classes obtenues en appliquant dans un premier temps une méthode d'extrapolation des classes statistiques à l'ensemble de l'image, puis en analysant les résultats statistiques des classes obtenues et en les confrontant aux documents de contrôle disponibles.

1- STRATIFICATION DE L'IMAGE

• Extraction de la population échantillon

Rappelons que l'échantillonnage est du type aléatoire systématique. Cette image à déjà été traitée comme exemple dans la partie méthodologie au chapitre III. Le niveau de confiance demandé est de 95%, ce qui donne $r = 1,96$. La variance du canal XS2 est la plus forte (tableau n° 8). 622 individus sont nécessaires pour travailler avec le niveau de confiance demandé pour une amplitude de deux écarts-types.

Tableau n° 8

IMAGE SPOT-OURS: 4 SEPTEMBRE 1986
BASSINS D'OURS ET DE GOUNTOURS
STATISTIQUES DES CANAUX

canal	min	max	moyenne	variance
XS1	66	123	90,53	52,43
XS2	54	148	95,88	161,97
XS3	57	146	106,40	136,52

La population échantillon retenue finalement est de 2700 individus ceci pour accroître au maximum la fiabilité de l'échantillonnage. Les calculs d'analyse en centres mobiles sur un nombre aussi élevé sont possibles grâce à la puissance des ordinateurs employés. La population est donc nettement supérieure au nombre d'individus nécessaire, ce qui permet d'accroître la qualité de la représentation (en prenant un intervalle de un écart type nous n'aurions eu besoin que de 1270 individus).

• **Calcul du nombre maximal de classes**

L'application de la formule $K < 5 \log n$ à la population échantillon calculée pour le canal XS2 parce qu'il possède la variance la plus grande, donne un nombre maximal de classes possibles inférieur à 13,97. Soit au maximum 14 unités radiométriques.

• **Evaluation de l'intervalle de stabilité**

Le calcul à partir d'une analyse en classification ascendante hiérarchique montre que la classe la plus stable se situe entre sept et quatorze (figure n°17).

• **Filiation des classes**

Elle est réalisée entre deux et quatorze classes. La figure n°18 montrent comment évoluent le centre des thèmes au sein du nuage lors des partitions successives depuis leur apparition. Il est facile de constater que pour certaines partitions le déplacement des thèmes est minimum comme par exemple entre les partitions huit et neuf. Par contre d'autres ne provoquent qu'un léger déplacement ce qui est le cas lorsque l'on passe de six à sept.

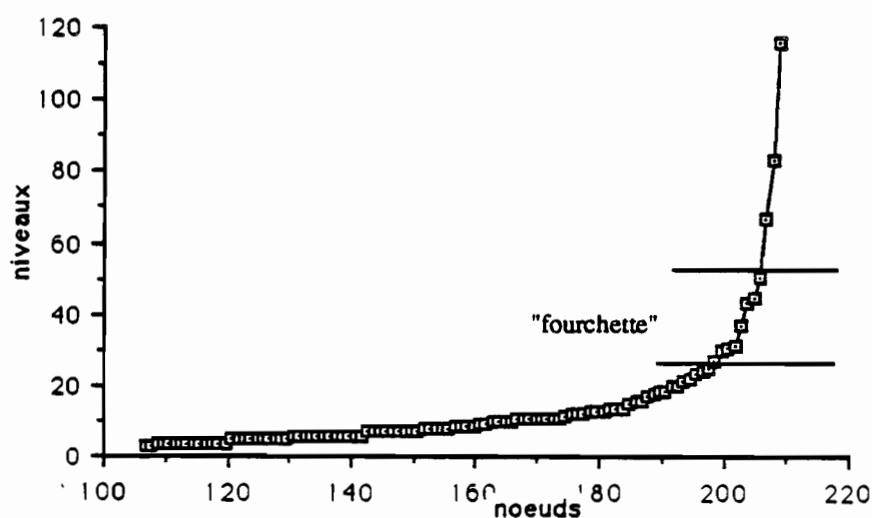
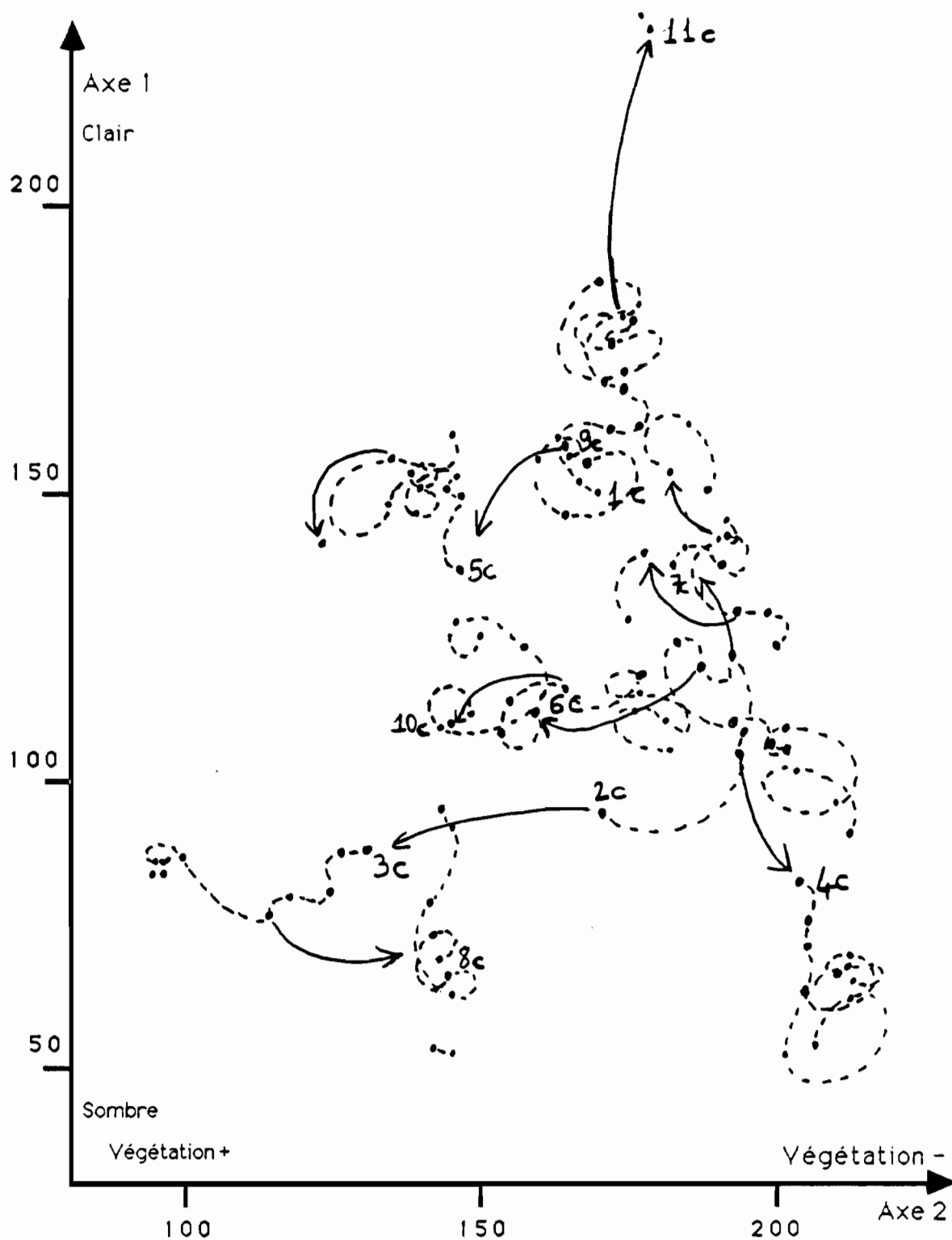


Figure n°17

DETERMINATION DE LA "FOURCHETTE" DE STABILITE

Image SPOT-Oursi 4 septembre 1986



EVOLUTION DES CENTRES DE CLASSES EN SEPTEMBRE
PARTITIONS 2 A 14 SUR LES AXES FACTORIELS 1 ET 2
ZONE D'OURS I

Image SPOT-HRV du 4 septembre 1986

Figure n° 18

• Critère de stabilité des signatures spectrales

La partition la plus stable se situe entre 10 et 11 (tableau n° 9).

Tableau n° 9

TEST DE STABILITE DES SIGNATURES SPECTRALES
sur les partitions issues de l'analyse en nuées dynamiques

ZONE D'OURSI Image SPOT-HRV DU 4 septembre 1986

ENTRE PARTITIONS	3/4	4/5	5/6	6/7	7/8	8/9	9/10	10/11	11/12	12/13	13/14
INDICE	0,07	0,10	0,15	0,13	0,15	0,12	0,17	0,23	0,07	0,10	0,12

• Critère quantitatif de détermination

Le tableau n° 10 montre que c'est la partition en 11 classes qui est la plus stable.

Tableau n° 10

TEST QUANTITATIF *

ZONE D'OURSI - Image SPOT-HRV du 4 septembre 1986

Partitions	10	11
Classes		
1	82	97
2	93	76
3	100	94
4	94	104
5	90	89
6	62	94
7	88	105
8	69	90
9	118	187
10		90

* en % relatif à la partition précédente

2- INTREPRÉTATION

2.1- Classification de l'image

L'extrapolation à la scène toute entière des résultats obtenus sur la population-échantillon montre que la corrélation entre les deux variables - axes de l'échantillon et population totale - est très forte : 0,997 pour l'axe factoriel 1 et 0,998 pour le second (annexe II).

- Image obtenue des classes stables au 4 septembre 1986.

L'image n° 3 associée au tableau n° 16 et la figure 29 représentent la classification en 11 classes issue de la méthode de discrimination non paramétrique. Un lissage majoritaire de maille 3x3 est appliqué à l'image pour réduire l'effet de pointillé, rendant la lecture du document plus aisée. Cette opération est en partie similaire à celle effectuée par le cartographe lorsqu'il reporte sur la carte définitive les levés de terrain. Ceux-ci sont toujours effectués à une échelle supérieure à la restitution finale avec un facteur 2. Par exemple, quatre levés au 1 : 25. 000 sont nécessaires pour réaliser une carte au 1 : 50. 000 sur une même portion de territoire. En agissant ainsi, le cartographe intègre les informations pour ne garder finalement que les facteurs qu'il juge essentiels en fonction de sa problématique.

L'étude de l'image montre de toute évidence que la classification a opéré une structuration précise du paysage. Il convient de comparer la classification obtenue et les documents de référence du 4 septembre 1986 (en particulier la composition colorée) aux cartes thématiques du bassin d'Oursi au 1 : 50 000. Par ce biais, il est possible d'obtenir certaines clefs interprétatives de la signification des classes.

Dans l'immédiat, il n'est cependant pas opportun de tenter une interprétation exhaustive de l'image. Les données statistiques fournies avec les résultats de la classification seront exploitées en premier lieu. Une interprétation plus poussée des classes obtenues en consultant les documents de référence se fera dans un second temps. Ceci pour trois raisons :

- la première a trait à l'aspect rigoureux de la démarche qu'il faut conserver en vue d'une automatisation future (système expert). L'injection d'informations exogènes issues de banques de données doit se faire de façon logique.
- la seconde est induite par notre choix initial d'une classification non-supervisée pour classer l'image. Toute méthode non-supervisée suppose une interprétation minimale *a posteriori*, de l'image classée. Le thématicien doit s'appuyer sur les paramètres fournis par la méthode de classification afin de poser des bases interprétatives qui sont vérifiées par la suite *in situ*.
- la troisième est d'ordre didactique. Une bonne compréhension des paramètres statistiques permet d'établir une meilleure comparaison entre données de référence terrain et valeurs radiométriques de surface des classes.

2.2- Etude statistique des classes

Quatre documents issus des paramètres statistiques vont aider à l'interprétation de l'image.

- Le premier document à étudier est l'arbre hiérarchique des 11 classes stables, établi encore une fois, à l'aide d'une C.A.H. L'analyse de l'arbre s'effectue par paliers successifs en partant du niveau le plus élevé. L'analyse de la C.A.H. a permis d'observer les grandes structures hiérarchiques du paysage sur cette classification, mais ne fournit plus d'autres informations dans l'immédiat. On s'appuie sur le dendrogramme des unités (figure n° 19) et le tableau n° 11 qui fournit les valeurs des relations entre unités.
- Le deuxième est l'étude des signatures spectrales des unités. Faisant suite à l'étude de l'arbre hiérarchique, cette seconde analyse va permettre de définir de manière plus affirmative la signification thématique des classes. Remarquons que l'étude des signatures spectrales se fait sur les canaux bruts (figures n° 20 et 21b et le tableau n° 12). En effet, il est plus commode de lire les signatures spectrales des canaux bruts que celles des axes factoriels. Les signatures spectrales constituent la base de la détermination des phénomènes observés au sol en télédétection satellitaire. De nombreuses études ont été menées sur les propriétés spectrales des divers types de substrats minéraux et nombreux types de couverts végétaux (Bariou R. 1985).

• Le troisième réside dans l'étude des indices de végétation et de brillance. Ces deux derniers paramètres permettront de confirmer ou d'infirmer les précédentes interprétations (tableau n° 13).

• Le quatrième est l'histogramme bidimensionnel des axes factoriels 1 et 2 qui permet de vérifier la position des thèmes projetés sur un espace à deux dimensions et de voir leurs relations (figure n° 20 a).

Les résultats de ces interprétations ont été synthétisés par un tableau indiquant l'apport de chaque module à l'interprétation (tableau n° 14).

Tableau n° 11

DESCRIPTION DE LA HIERARCHIE AVEC 11 CLASSES

Image SPOT-HRV du 4 septembre 1986

NOEUDS	AINES	BENJAMINS	POIDS	NIVEAUX
N&12	C4	C9	2	24,00
N&13	C2	C8	2	25,00
N&14	C1	C3	2	26,00
N&15	C6	C7	2	33,00
N&16	N&12	C10	3	40,00
N&17	N&13	N&15	4	41,50
N&18	N&14	C5	3	46,00
N&19	N&18	N&17	7	61,75
N&20	N&19	N&16	10	74,62
N&21	N&20	C11	11	121,60

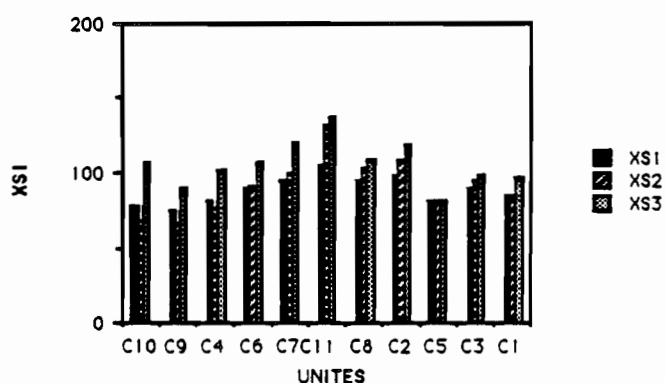
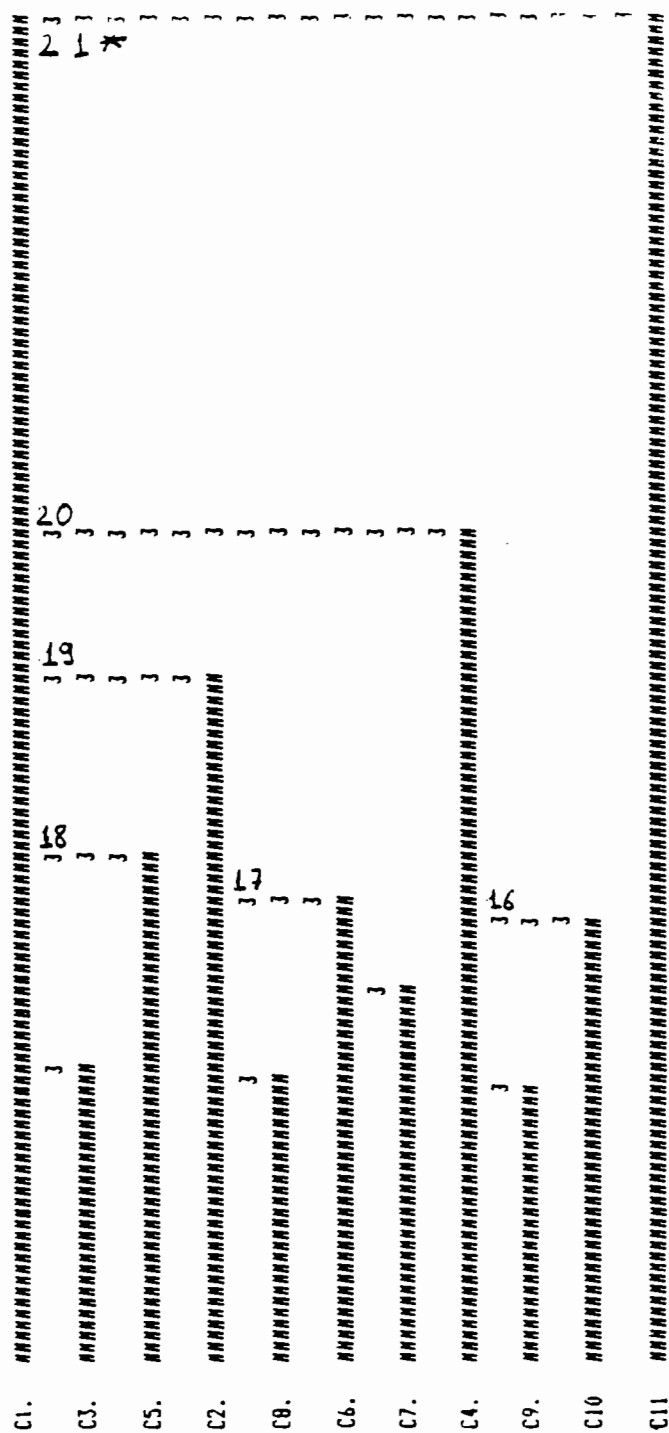


Figure n° 20 VISUALISATION DES GRAPHES DES CANAUX BRUTS

4 septembre 1986



HIÉRARCHISATION DES CLASSES RADIOMÉTRIQUES STABLES
Dendrogramme

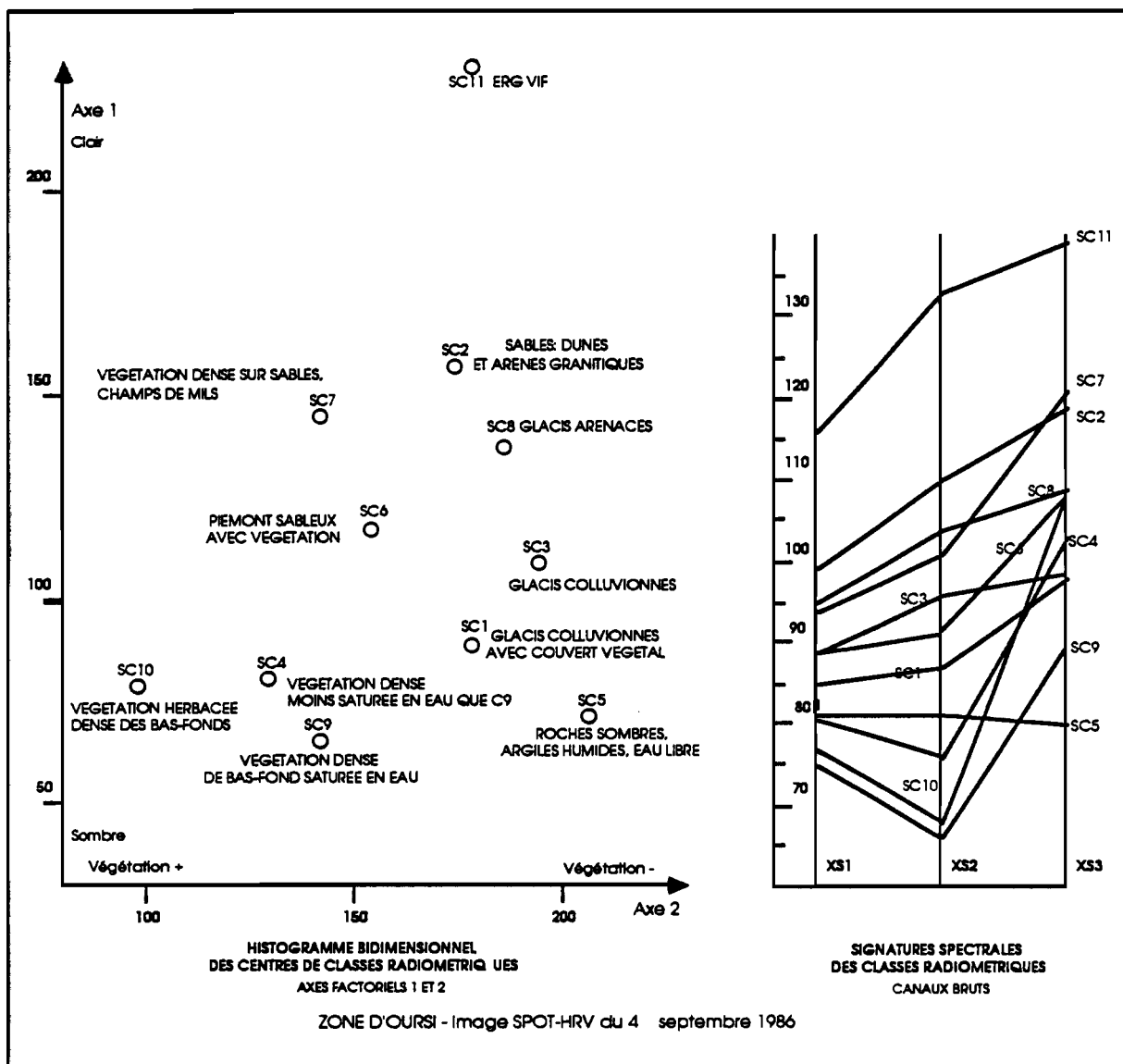
Figure n°19

Image du 4 septembre 1986

Tableau n° 12

STATISTIQUES DES CLASSES OBTENUES
UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT
 Paramètres des classes - Image SPOT-HRV du 4 septembre 1986

UNITES	CANAL XS1		CANAL XS2		CANAL XS3.....	
	moyenne	variance	moyenne	variance	moyenne	variance
SC10	77,5	11,	67,9	48,6	107,6	37,8
SC9	74,4	13,6	66,8	31,8	89,	34,7
SC4	80,9	8,6	76,3	21,5	102,5	13,6
SC6	88,6	12,1	91,2	23,3	107,4	11,2
SC7	93,7	14,6	99,7	27,6	119,7	20,1
SC11	105,6	22,8	131,9	51,	137,1	16,8
SC8	95,	11,4	103,5	16,1	108,4	9,8
SC2	97,8	12,2	108,9	22,2	118,	12,5
SC5	81,3	19,1	82,	46,4	80,9	34,
SC3	88,7	7,5	94,8	11,	97,6	16,2
SC1	84,5	8,3	85,6	15,3	97,	13,2
IMAGE TOTALE	90,5	52,4	95,9	162,	106,4	136,5



Figures n° 20 a et b

Tableau n° 13

**INTERPRETATION DES UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT
À L'AIDE DES INDICES DE VÉGÉTATION ET DE BRILLANCE**

Classification: image 4 septembre 1986

<u>unités</u>	<u>signification thématique des unités</u>	IV* (1)	IB* (1)
SC10	végétation dense du centre de la mare et des marigots	157,1	89,4
SC9	végétation dense et eau	146,3	78,2
SC4	classe intermédiaire entre C9 et C10	146,8	89,9
SC6	végétation sur sable foncé des piémonts et dépressions	138,5	99,1
SC7	végétation sur sable clair de dunes et placages sableux	139,7	109,6
SC11	erg vif, sables très clairs	130,4	133,9
SC2	sables clairs avec peu de végétation	133,2	113,
SC8	glacis arénacés, sables sombres	131,	105,4
SC5	roches sombres, argiles de bas-fonds eau libre	127,3	80,9
SC3	glacis dénudés	129,9	95,7
SC1	glacis avec végétation	136,1	90,9

*) IV: indice de végétation , IB: indice de brillance
1) moyenne des unités

Tableau n°14

**INTERPRETATION DES U.S R
A PARTIR DES PARAMETRES STATISTIQUES**

Image du 4 septembre 1986

UNITES	Dendrogramme et signatures spectrales	Histogramme bidimensionnel, indices de végétation et de brillance (IVG) (IB)
SC11	- Le noeud 21 l'isole des autres unités. - Sa signature spectrale, comparée aux autres unités, est très élevée sur les trois canaux. - Unité réfléchissante et probablement dénudée.	- Par rapport aux autres unités: IB très élevé (133,9) et IVG bas (130,4). - L'histogramme confirme cette interprétation.
SC10	- Le noeud 20 isole trois classes: C10, C9, C4. Dans ce groupe l'unité C10 est rattachée aux deux autres par le noeud 16. - La signature spectrale indique une forte inflexion sur le canal XS2. - Unité de réflectance moyenne contenant de la végétation.	- IB de 89,4 proche de la moyenne de l'image. IVG de 157,1 ce qui représente la valeur la plus élevée de l'ensemble des unités. - L'histogramme confirme que cette unité est thématiquement dominée par le facteur végétation.
SC9	- Unité se rattachant à l'unité C4. - Inflexion sur le canal XS2. Valeurs plus basses que C10 en particulier la remontée sur le canal XS3 est moins forte. - Unité de réflectance moyenne avec végétation.	- IB bas: 78,2. IVG élevé: 146,3. - La position de C9 sur les axes montre que cette unité est représentée de végétation et d'un état de surface sombre sous-jacent probablement formé d'eau.
SC7	- Le noeud 19 isole un groupe de 4 unités: C7, C6, C8, C2. Une deuxième subdivision isole les unités C6 et C7 des deux autres au noeud 17. Le noeud 15 sépare C6 et C7. - La signature spectrale présente un fléchissement sur le canal XS2 et les valeurs sur les canaux sont élevées. - Etat de surface clair avec de la végétation.	- IB moyen: 109,6. IVG moyen: 139,7. - Sur l'histogramme C7 cette unité se situe parmi les thèmes les plus réfléchissants mais possédant de la végétation active. - L'interprétation faite précédemment est confirmée.
SC6	- Rattachée à l'unité C7. - Le fléchissement sur le canal XS2 est plus accentué que pour C7 et les valeurs plus basses. - Il s'agit probablement d'un état de surface dominant plus sombre que C7 avec de la végétation active.	- IB moyen: 99,1. IVG moyen: 138,5. - La position de C6 sur l'histogramme confirme l'interprétation précédente.
SC8	- Isolée avec C2. - La signature spectrale possède des valeurs moyennes. La forme affectée indique que les états de surface ne sont pas marqués par la végétation active. - Unité de réflectance moyenne sans végétation active.	- IB moyen: 105,4. IVG bas: 131,0. - Sur l'histogramme C8 cette unité se situe dans le groupe des thèmes n'ayant pas de végétation et une réflectance moyenne. Confirme l'interprétation précédente.

Tableau n° 14 (suite)

**INTERPRETATION DES U.S.R
A PARTIR DES PARAMETRES STATISTIQUES**

Image du 4 septembre 1986

UNITES	Dendrogramme et signatures spectrales	Histogramme bidimensionnel, indices de végétation et de brillance (IVG) (IB)
SC2	- Se rattache à C8. - Les valeurs des canaux bruts sont élevées pour cette unité et indiquent que la végétation active est absente ou masquée par un autre état de surface. - Unité dominée par des états de surface avec des réflectances élevées sans végétation.	- IB élevé: 113. IVG bas: 133,2. - Bien que très loin de C11 sur l'histogramme C2 semble s'apparenter à ce thème. - Interprétation idem que pour l'étude du dendrogramme et des signatures spectrales.
SC5	- Isolée par le noeud 18 et se rattache aux unités C1, C3. Le thème de cette unité doit être particulier. - La signature spectrale est basse sur les trois canaux et se présente comme une subsurface. - Unité sombre sans végétation. La légère pente sur le canal XS3 indique la présence probable d'eau.	- IB bas: 80,9. IVB bas: 127,3. - La position de C5 sur l'histogramme indique nettement que cette unité est dominée par des états de surface sombres sans végétation.
SC3	- Rattachée à C1 par le noeud 14. - La signature spectrale possède des valeurs moyennes avec un léger bombement entre XS2 et XS3. - Unité de moyenne clarté sans végétation.	- IB bas: 95,7. IVG bas: 129,9. - La position de C3 sur l'histogramme confirme l'interprétation précédente.
SC1	- Rattaché à l'unité C3. - Les valeurs des canaux bruts sont basses sur XS1 et XS2 et moyennes sur XS3. On note un léger fléchissement sur XS2. - Unité avec des états de surface de clarté moyenne avec probablement de la végétation.	- IB bas: 90,9. IVG moyen: 136,1 - Sur l'histogramme la proximité à la fois de C3 et de C5 montre que cette unité est dominée par des états de surface sombres certainement humides. La relative proximité des thèmes "végétation" montre aussi que cette unité y est assimilée.

2.3- Contrôles avec les documents de référence au sol

Nous pouvons distinguer deux grands ensembles de contrôles :

- ceux permettant de reconnaître le contexte topographique et géomorphologique des unités, qui constituent les paramètres invariants des unités.
- les "réalités terrain", faites durant la période de probabilité d'obtention des images.

2.3.1- Contrôle du contexte topographique et géomorphologique

Les documents permettant ce contrôle sont essentiellement composés des photographies aériennes en I.R.C. au 1 : 50 000 d'octobre 1981 et de la carte de géomorphologie dynamique du bassin d'Oursi réalisée à partir de levés de terrain effectués en 1975 et 1976 (Joly F. et Dewolf Y, 1980). Il importe d'être prudent dans l'emploi que l'on fera de ces documents. En effet, le modelé et le couvert végétal des unités peut fort bien avoir varié durant les dix années séparant la levée de la carte géomorphologique des prises de vues SPOT. Les photographies aériennes sont pour leur part, antérieures de cinq ans aux images SPOT.

Cependant les photographies aériennes et les cartes géomorphologiques utilisées conjointement, permettent un contrôle efficace. La plupart des cartes thématiques induisent une troisième dimension en faisant figurer le relief sous forme de courbes de niveaux. Une carte géomorphologique induit une quatrième dimension : la géodynamique. Celle-ci est suggérée à l'aide de symboles précisant la nature des processus, son action et parfois son intensité. Il faut avant de procéder à cette vérification regarder sur écran interactif où se localisent les différentes unités dans le bassin versant. On utilisera aussi la composition colorée correspondante à l'image classée.

Comme pour les modules statistiques les contrôles cartographiques sont synthétisés par le tableau n° 15 . La première colonne du tableau donne les indications que l'on peut tirer de la "visualisation écran" en ce qui concerne la localisation des unités en s'aidant de la composition colorée. La seconde colonne donne l'interprétation après vérification du contexte topographique et géomorphologique.

Tableau n°15

INTERPRETATION DES U.S.R
A PARTIR DE LA VISUALISATION ECRAN ET DES DOCUMENTS DE REFERENCE

Image du 4 septembre 1986

UNITES	VISUALISATION ECRAN *	DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES * DE REFERENCE
SC11	- Unité très localisée spatialement au nord de la mare d'Oursi. - 0,41% de l'image	- L'erg vif. Les sentes du bétail partant de la mare divergent en éventail dans les creux dunaires de l'erg.
SC10	- Unité très localisée spatialement au centre de la mare et dans certains tronçons des marigots. - 3,25 % de l'image	- Prairies aquatiques du centre de la mare. Sur la composition colorée du 4 septembre on distingue la différence entre cet ensemble situé au milieu de celui qui l'entoure et qui est plus saturé en eau. Dans les marigots l'unité est composée à la fois de végétation prairiale dense et de champs de sorgho ou de mil/sorgho.
SC9	- Unité présente sur le pourtour de la mare et à la confluence des cours d'eau se jetant dans la mare. Aspect compact à l'embouchure de la mare - 3,16 % de l'image	- Cette unité ne paraît pas très homogène. Elle regroupe les parties de la mare à prairie aquatique saturée en eau. Par contre dans les cours d'eau elle est composée de secteurs dense en ligneux et saturée en eau à la date de prise de vue.
SC4	- Unité se situant essentiellement dans les talwegs. Aspect ligniforme et ramifié. - 4,0 % de l'image	Même densité en ligneux que C10 avec un taux de saturation en eau moins élevé. La topographie et la variabilité spatiale des précipitations sont à prendre en compte pour expliquer la différence entre les deux unités.
SC7	- Unité se présentant en plages compactes entre les deux mares et disséminée en petites tâches dans l'axe de séparation des bassins versants. - 10,21 % de l'image	- Cultures de mil sur sable et les zones de friches qui les entourent. Il s'agit aussi bien des sables de dunes pour les grandes plages que des sables d'arènes granitiques en ce qui concerne les petites tâches sur les interfluvies.
SC6	- Unité complexe: en plages compactes au nord et au sud de Koel. En bandes le long des cours d'eau sur leur bord et entre la mare et Koel. Eparpillée et imbriquée dans les secteurs identifiés comme étant des champs cultivés et en friches (C7). - 10,27 % de l'image	- Des éléments disparates se retrouvent dans cette classe. La réponse spectrale de la végétation semble relier ceux-ci. Sur les piémonts les plages compactes sont constituées par des placages sableux portant une végétation herbacée et des champs de mils. Le long des marigots on identifie des plages herbacées reposant sur des formations sablo-argileuses et constituent des secteurs d'accumulation pour les colluvions.

Tableau n° 15 (suite)

INTERPRETATION DES U.S.R
A PARTIR DE LA VISUALISATION ECRAN ET DES DOCUMENTS DE REFERENCE

Image du 4 septembre 1986

UNITES	VISUALISATION ECRAN *	DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES * DE REFERENCE
SC8	- Plages compactes de grandes dimensions se situant entre les unités C2 et C1. - 18,90 % de l'image	- Secteurs d'arènes granitiques décrites comme des altérites granitiques autochtones et para-autochtones. Ces formations superficielles offrent des surfaces de transition aux processus de ruissellement.
SC2	- Se présente en grandes plages compactes recouvrant en grande partie le nord et l'est de l'image. - 20,40 % de l'image	• Sables des cordons dunaires • Sables d'arènes granitiques Dans tous les cas il s'agit de formations superficielles possédant une végétation herbacée rare et très dépendante de besoins réguliers en eau durant la période de croissance.
SC5	- Plages compactes de taille moyenne sur le pourtour du bassin et petites tâches sur les bords intérieurs de la mare. - 6,40 % de l'image	- C5 regroupe des éléments de natures différentes. Sur le pourtour du bassin les plages compactes sont des massifs de roches sombres et des buttes cuirassées, des néocuirasses. Dans les talwegs les petites tâches sont des secteurs argileux engorgés à cette date. Sur les bords intérieurs de la mare il s'agit d'eau libre non turbide qui constituent les points d'abreuvement du bétail.
SC3	- Formée de secteurs compactes situés entre les massifs formant la limite ouest et sud du bassin et la mare. Elle entoure aussi le massif de Tin Edjar. 18,50 % de l'image	- Glacis sur sols bruns dans les secteurs entre la mare et les massifs au sud. Ces glacis peuvent être subdivisés en deux sous-classes : ceux recouverts par des épandages de gravillons ferrugineux, et ceux pavés de roches diverses plus réfléchissantes.
SC1	- Unité compacte du bas piedmont de Warga sur son versant nord. Sur le versant sud relie ce massif aux cours d'eau. Unité présente aussi dans de moindres proportions au nord de Koel et sur certaines sections des cours d'eau. - 4,51 % de l'image	- Ces glacis se distinguent de ceux formant l'unité C3 par une surface plus sombre due à un revêtement plus argileux et une topographie subrectiligne. Ces secteurs sont probablement plus humides que les autres glacis grâce à une meilleure rétention en l'eau. L'examen à partir des photos aériennes des secteurs situés au nord de Warga et de Koel indique que ces secteurs ont un recouvrement ligneux important. On peut aussi supposer, mais sans que cela ait été vérifié, que le recouvrement herbacé y est dense.

L'interprétation issue de l'analyse des données statistiques a pu être révisée dans le sens d'une plus grande précision sur les classes grâce à ces documents. Les 11 unités stables sont regroupées en quatre ensembles bien distincts :

- les unités sableuses SC2, SC8, S11, SC6, SC7.
- les glacis : SC1, SC3.
- la végétation dense : SC4, SC9, SC10.
- les roches sombres, argiles humides de bas fonds et l'eau libre : SC5.

(tableau n° 16, figure n° 21)

Tableau n° 16

STATISTIQUES DES U.S.R
UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT
SUPERFICIES DES GROUPES ET UNITES

Image SPOT-HRV du 4 septembre 1986

GROUPES	UNITES	NOMBRE DE PIXELS	SUPERFICIE *	% de L'IMAGE TOTALE	
				UNITES	\$ GROUPE
VEGETATION DENSE	SC10	53.733	21,49	3,25	10,41
	SC9	52.236	20,89	3,16	
	SC4	66.088	26,44	4,00	
SABLES	SC6	169.593	67,84	10,27	60,19
	SC7	169.690	67,88	10,21	
	SC11	6.748	2,70	0,41	
	SC8	312.107	124,84	18,90	
	SC2	336.614	134,65	20,40	
ROCHES SOMBRES	SC5	105.720	42,29	6,40	6,40
GLACIS	SC3	305.411	122,16	18,50	23,01
	SC1	74.560	29,82	4,51	
IMAGE TOTALE		1651.500	660,40	100,00	100,00

* En km²

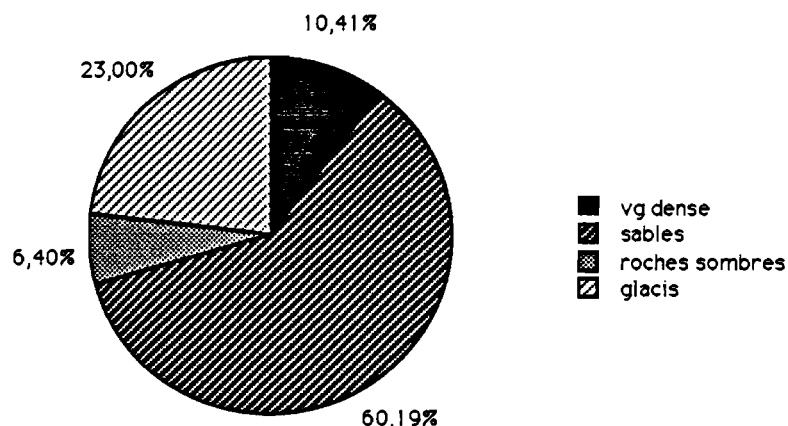


Figure n° 21

4 septembre 1986

**% DE LA SUPERFICIE DES GROUPES
PAR RAPPORT A LA SUPERFICIE TOTALE**

2.3.2- Contrôles à l'aide des réalités terrain

Le protocole de mesures effectuées sur les sites tests est évoqué au chapitre VI. L'analyse de ces mesures a permis de définir un certain nombre d'états de surface (Devineau et al, 1986 ; Badiara , 1986). Ces différents types d'états de surface vont servir à vérifier la validité de la classification obtenue par classification non-supervisée avec critères de stabilité.

- Unités radiométriques et couvert végétal

L'étude phytosociologique et les mesures de recouvrement et de phytovolume ont été menées au sol par Devineau et Fournier (Devineau et al , 1986). Le suivi des sites de biomasse était assuré par Badiara L (1986). La présente étude est fondée sur les résultats obtenus par ces chercheurs.

- Recouvrement végétal

Les variables du couvert végétal prises en compte sont les suivantes :

- phytovolume herbacé vert (PV)
- phytovolume herbacé total (PT)
- recouvrement herbacé total (RT)
- recouvrement des arbres et arbustes (RL)
- recouvrement total de la végétation ($RTT = RT + RL$)

Le recouvrement et le phytovolume de la strate herbacée sont estimés par la méthode des "points contacts", souvent utilisée pour l'évaluation de la production des pâturages (Devineau et al 1986). Elle consiste à dénombrer les contacts le long d'une ligne entre une aiguille que l'on laisse tomber à la verticale et les espèces herbacées. Recouvrement et phytovolume sont exprimés en pourcentage au niveau du sol. D'autre part on distingue la végétation verte de celle qui est sénéscente. L'ensemble donne le recouvrement herbacé total.

Les sites tests sont sélectionnés en fonction de leur totale appartenance à une unité radiométrique. 12 sites sur 36 remplissent cette condition (tableau n° 17). La matrice des corrélations (tableau n° 18) entre l'indice de végétation et variables du recouvrement végétal indique que l'indice est corrélé de façon hautement significative avec le recouvrement total (RT) et le recouvrement total de la végétation (RTT). Il en est de même avec l'indice de brillance (tableau n° 19) avec toutefois des valeurs sensiblement plus fortes. La relation entre indice de végétation verte et recouvrement total (RT) est linéaire et satisfait aux conditions suivantes :

$$IV = 0,0795 RT + 129,32$$

Pour le RTT, la relation est pratiquement la même (figure n° 22 a et b) :

$$IV = 0,0752 RTT + 129,32.$$

Tableau n° 17

PARAMETRES DU COUVERT VEGETAL SUR LES SITES TESTS DE CONTROLE

Image SPOT-HRV du 4 septembre 1986

SITES	IVSAT	PV	PT	% V	RV	RT	RL	RTT
1	131,00	13	22	59,09	35	4	0,40	4,40
2	129,90	18	32	56,25	5	5	0	4,50
3	129,90	96	101	95,05	25	28	2,27	30,70
4	129,90	26	38	68,42	9	12	0,50	12,50
5	128,20	11	16	68,75	5	6	0	6,00
6	133,20	68	150	45,33	22	52	2,20	54,20
7	134,50	75	128	58,59	21	36	0,50	36,50
8	131,00	182	198	91,92	31	34	3,00	37,00
9	133,20	180	194	92,78	25	30	5,00	35,00
10	133,20	84	159	52,83	27	49	2,00	51,00
11	133,20	120	236	50,85	28	56	3,00	59,00
12	133,20	62	119	52,10	24	47	2,00	49,00

VSAT: indice de végétation; PV,PT: phytovolume herbacé vert, total; %v: % de matière verte; RV,RT: recouvrement herbacé vert, total; RL: recouvrement ligneux; RTT: recouvrement total de la végétation.

(Les paramètres du couvert végétal ont été communiqués par Devineau)

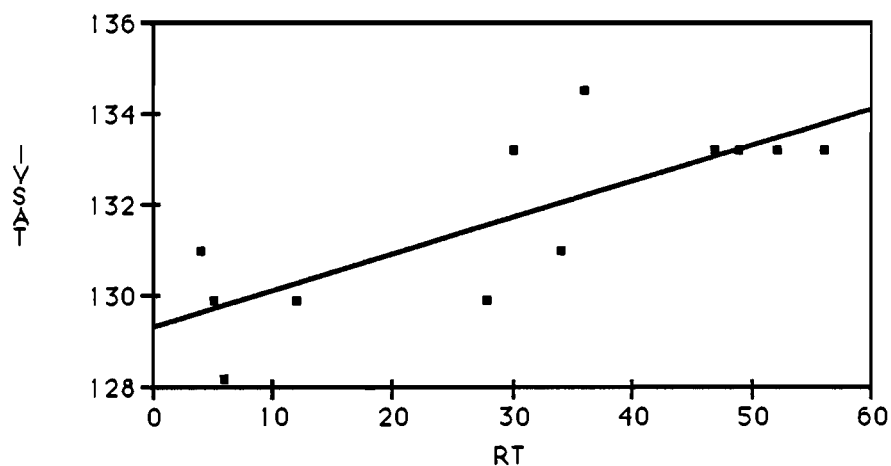


Figure n° 22 a **REGRESSION ENTRE INDICE DE VEGETATION
ET RECOUVREMENT HERBACE TOTAL**

A=0,079 B=129,323

4 septembre 1986

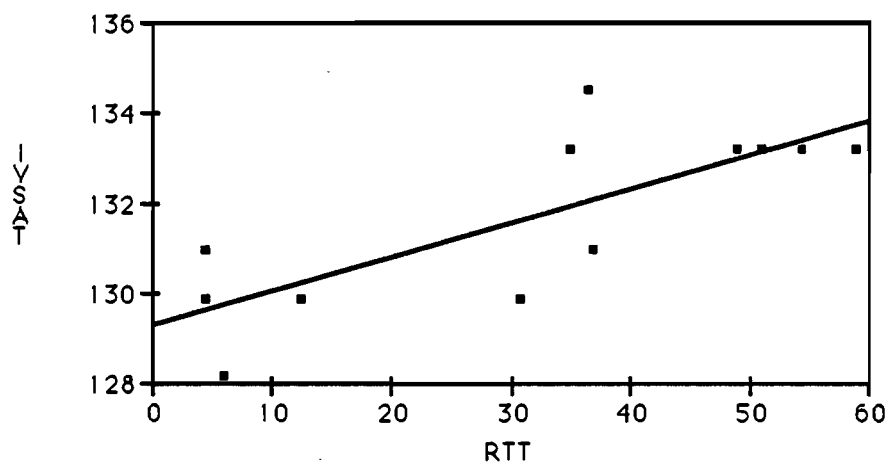


Figure n° 22 b **REGRESSION ENTRE INDICE DE VEGETATION
ET RECOUVREMENT TOTAL DE LA VEGETATION**

A= 0,075 B=129,318

4 septembre 1986

Tableau n° 18

**RELATION ENTRE INDICE DE VÉGÉTATION
ET VARIABLES DU COUVERT VÉGÉTAL**

MATRICE DES CORRELATIONS TOTALES

Image du 4 septembre 1986

	IVSAT	PV	PT	%V	RV	RT	RL
PV	0,434						
PT	0,695	0,873					
%V	-0,359	0,553	0,106				
RV	0,535	0,548	0,582	0,115			
RT	0,782	0,543	0,847	-0,272	0,496		
RL	0,441	0,900	0,823	0,466	0,554	0,586	
RTT	0,779	0,586	0,870	-0,222	0,517	0,998	0,635

Tableau n° 19

**RELATION ENTRE INDICE DE BRILLANCE
ET VARIABLES DU COUVERT VÉGÉTAL**

MATRICE DES CORRELATIONS TOTALES

Image du 4 septembre 1986

	IBSAT	PV	PT	%V	RV	RT	RL
PV	0,506						
PT	0,743	0,873					
%V	-0,316	0,553	0,106				
RV	0,683	0,548	0,582	0,115			
RT	0,787	0,543	0,847	-0,272	0,496		
RL	0,543	0,900	0,823	0,466	0,554	0,586	
RTT	0,791	0,586	0,870	-0,222	0,517	0,998	0,635

- La phytomasse

Sur les 10 sites de biomasse suivis du 27/08/86 au 09/09/86, 8 sont disponibles pour cette étude, étant entendu que deux des 10 sites (b5, b10) ne sont pas totalement inclus dans des unités radiométriques. Il ne faut pas oublier que sur chaque site, 30 mesures sont faites, le nombre total de mesures est donc de 240).

Les calculs ont porté sur la phytomasse verte (PHV) et la phytomasse totale (PHT) (tableau n° 20). La phytomasse totale inclue les herbacées vert et sec ainsi que les arbres. La matrice des corrélations indique une relation hautement significative entre IV et PHT à la date du 4 septembre 1986 (tableau n° 21). Il peut paraître surprenant qu'un indice de végétation verte soit davantage corrélé à la biomasse totale (végétation active et morte et les ligneux) plutôt qu'à la seule végétation verte. Devineau , (1988) obtient des résultats identiques à ceux obtenus ici. Il avance l'hypothèse selon laquelle les végétaux perçus secs par l'observateur au sol possédaient encore une activité au niveau des cellules parenchymateuses, activité décelée par les capteurs SPOT-HRV. Toutefois le fait que l'indice de brillance possède une corrélation supérieur à l'indice de végétation montre que cette explication n'est pas entièrement satisfaisante et que d'autres paramètres sont à prendre en compte pour expliquer ce phénomène. En particulier le faible taux de recouvrement de la végétation sur les secteurs dunaires doit influencer sur la réponse spectrale des états de surface en milieu dunaire. Par ailleurs dans le cas de recouvrements végétaux verts inférieurs à 25%, l'indice de brillance offrait une meilleure corrélation que l'indice de végétation verte (Diakité , 1987).

Tableau n° 20

**RELATION - SITES DE BIOMASSE
ET UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT**

Données terrain de septembre 1986 - Image SPOT du 4 septembre 1986

Sites	Classes	MV*	MT*	RL*	PV*	PT*	IV* 1	IB*.1
b1	C6	25,5	31,7	2,4	79	96,8	138,5	99,1
b2	C8	31,4	34,3	2,9	55	57,9	131	105,4
b3	C2	24,7	30,3	4,6	55	65,9	133,2	113,0
b4	C9	54,4	71,7	17,8	70	117,7	146,3	95,3
b5	C6,C3,C1	29,6	34,3	0,8	72	84,8		
b6	C2	26,6	49,3	2,2	28	58,7	133,2	113,0
b7	C2	28,4	56,3	3	39	81,5	133,2	113,0
b8	C2	31,9	71,7	10,8	35	77,9	133,2	113,0
b9	C2	23,5	46,7	2,1	18	40,9	133,2	113,0
b10	C2,C8	27,2	59,3	4,6	45	101,9		

* MV: recouvrement herbacé vert, MT: recouvrement total, RL: recouvrement ligneux, PV: phytomasse verte, PT: phytomasse totale, IV: indice de végétation., IB: indice de brillance
1: moyenne des unités

Tableau n° 21

**RELATION INDICE DE VÉGÉTATION ET PHYTOMASSE HERBACÉE
MATRICE DES CORRELATIONS TOTALES**

	IV	PHV
PHV	0,614	
PHT	0,850	0,749

2.4- Interprétation finale

Sur les 11 classes générées par classification automatique et critères d'arrêt des partitions, quatre ont pu être identifiées de façon exhaustive. L'ensemble de ces quatre classes représente 68,07% de la scène :

- unité SC2 : sable
- unité SC3 : glaciis
- unité SC8 : arènes glacées
- unité SC6 : sable de piémont sableux avec végétation.

Trois autres unités ont pu être identifiées de façon partielle à partir de l'extrapolation des réalités terrain, soit 16,63% de la scène :

- unité SC7 : champs et végétation dense sur sables (10,21%)
- unité SC9 : végétation de bas fonds saturée en eau (3,16%)
- unité SC10 : végétation herbacée dense du centre de la mare et des dépressions (3,25%).

Deux autres possèdent une signification générale relativement simple à établir :

- unité SC11 : erg vif (0,41%)
- unité SC5 : roches sombres, argiles de bas-fonds et eau libre (6,4%)

Il reste deux unités probablement très dépendantes des phénomènes climatiques et bioclimatiques fugaces et donc ayant une signification valable uniquement à la date étudiée. Ce sont les unités :

- unité SC1 : glaciis avec végétation (4,51%)
- unité SC4 : végétation intermédiaire entre les unités SC9 et SC10 (4%).

8,51% de la scène ne reçoit pas d'explication satisfaisante pour l'interprétation d'une ou deux classes, et l'on se bornera pour celles-ci à formuler des hypothèses.

- Conclusion

Ce chapitre a introduit dans le détail les étapes souhaitables pour hiérarchiser une image en classes radiométriques stables. La part a été faite entre l'arbitraire qu'introduit une classification automatique, telle les centres mobiles, la façon de l'éviter au maximum, et celle de l'opérateur ne devant intervenir qu'*a posteriori*, durant la phase d'interprétation des classes. D'autre part les unités radiométriques générées par cette méthode ont une signification thématique précise en ce qui concerne certains paramètres du milieu naturel. L'abondance des données au sol relatives à la végétation a permis d'observer de forts taux de corrélation entre l'indice de végétation et de biomasse des unités radiométriques stables avec la phytomasse et le recouvrement total de la végétation. La classification en 11 unités de l'image SPOT du 4 septembre 1986 *dans un cadre spatial de visualisation précis est donc le reflet des composants du paysage*. Elle constitue une "réalité" relative puisqu'elle est fonction des qualités propres aux capteurs de mesures (domaines de longueurs d'ondes, résolution).

Cette "réalité" se révèle efficace et peut facilement devenir opérationnelle. Les résultats enregistrés pour la relation "états de surface" et signatures spectrales des U.S.R. sont significatifs à cet égard. Cependant, cette précision thématique n'est valable que temporairement pour une date t_0 . Certains facteurs comme la végétation herbacée et l'humidification des bas-fonds sont directement liés à l'importance des pluies, à leur fréquence et à leur répartition dans l'espace.

CHAPITRE VIII

TRAITEMENT DE L'IMAGE SPOT-HRV DU 17 DÉCEMBRE 1986

1- STRATIFICATION DE L'IMAGE

- **Extraction de la population échantillon**

La population échantillon nécessaire est calculée à partir de la variance du canal X S3 (var = 147,22) (tableau n° 22). Pour deux écarts-types il faut un effectif supérieur à 566 individus pour être représentatif avec un taux de probabilité de 95%. Avec 2700 individus, la population retenue est largement supérieure à celle qui était nécessaire et permet d'atteindre une précision située à un écart type.

- **Calcul du nombre maximal de classes**

A cette date, le nombre de classes maximum est de 13,76 soit 14 classes. Il est sensiblement plus faible que celui de septembre .

Tableau n° 22

PARAMETRES DES CANAUX BRUTS
Image SPOT-HRV Bassin d'Oursi - 17 décembre 1986

Canal	Min	Max	Moy	Var
XS1	34	124	73,77	58,36
XS2	22	145	84,02	145,53
XS3	23	143	88,17	147,22

• Evaluation de l'intervalle de stabilité des classes

La méthode d'évaluation de l'intervalle de stabilité a porté sur un ensemble de 104 classes obtenues par les partitions successives entre 2 et 14. La figure n° 23 permet de situer cette fourchette au-dessus du noeud 202. Comme pour la scène du 4 septembre, la partition la plus stable aura un nombre de classes supérieur à sept.

• Filiation des classes

La filiation des classes est réalisée en appliquant une classification ascendante hiérarchique (C.A.H) pour tous les couples de partitions successives de 2 à 14. Elle se révèle fiable jusqu'à la treizième partition, au-dessus l'instabilité devient trop grande. Si l'on compare les histogrammes bi-dimensionnels de décembre (figure n° 24) et de septembre (figure n° 18), on note de profonds changements dans le comportement des thèmes. Alors qu'en septembre les thèmes étaient répartis sur une grande surface de l'espace bi-dimensionnel, en décembre ils s'organisent suivant deux axes sensiblement rectilignes.

• Critère de stabilité des signatures spectrales

L'application de ce critère montre que l'entre-partition la plus stable se situe entre 9/10 (tableau n° 23). La comparaison des résultats de décembre avec ceux de la date précédente offre un élément d'analyse intéressant (revoir le tableau n° 9). En septembre, seule l'entre-partition 10/11 possède un indice de stabilité supérieur à 0,20. On en dénombre six sur l'image de décembre et l'indice le plus fort retenu, est sensiblement plus élevé que celui de septembre. L'image de décembre est donc dans l'ensemble plus stable. La raison la plus probable que l'on puisse invoquer à ce fait est qu'en septembre, la présence de la végétation chlorophyllienne tend à déstabiliser l'image en dispersant les centres de gravité des unités stables, alors qu'en décembre, la génération d'un thème supplémentaire se fait sur l'axe factoriel 1 que l'on peut assimiler à un indice de brillance. La translation des autres centres consécutive à l'apparition de la nouvelle classe s'effectue uniquement suivant cet axe.

• Critère quantitatif de détermination

C'est finalement la partition en 10 classes que l'on retient comme étant la plus stable à la date du 17 décembre 1986 (tableau n° 24).

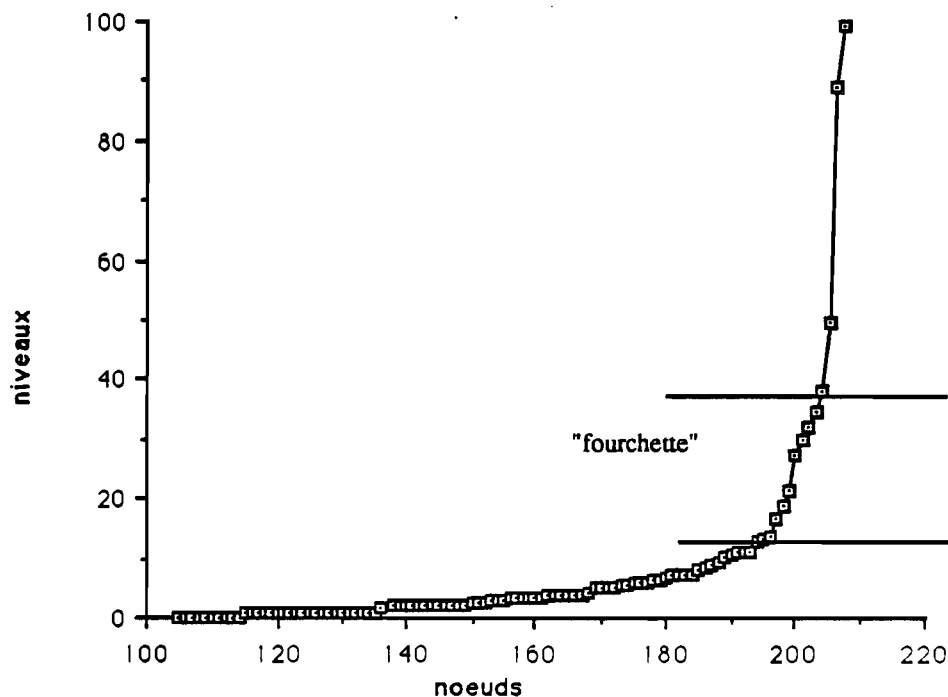
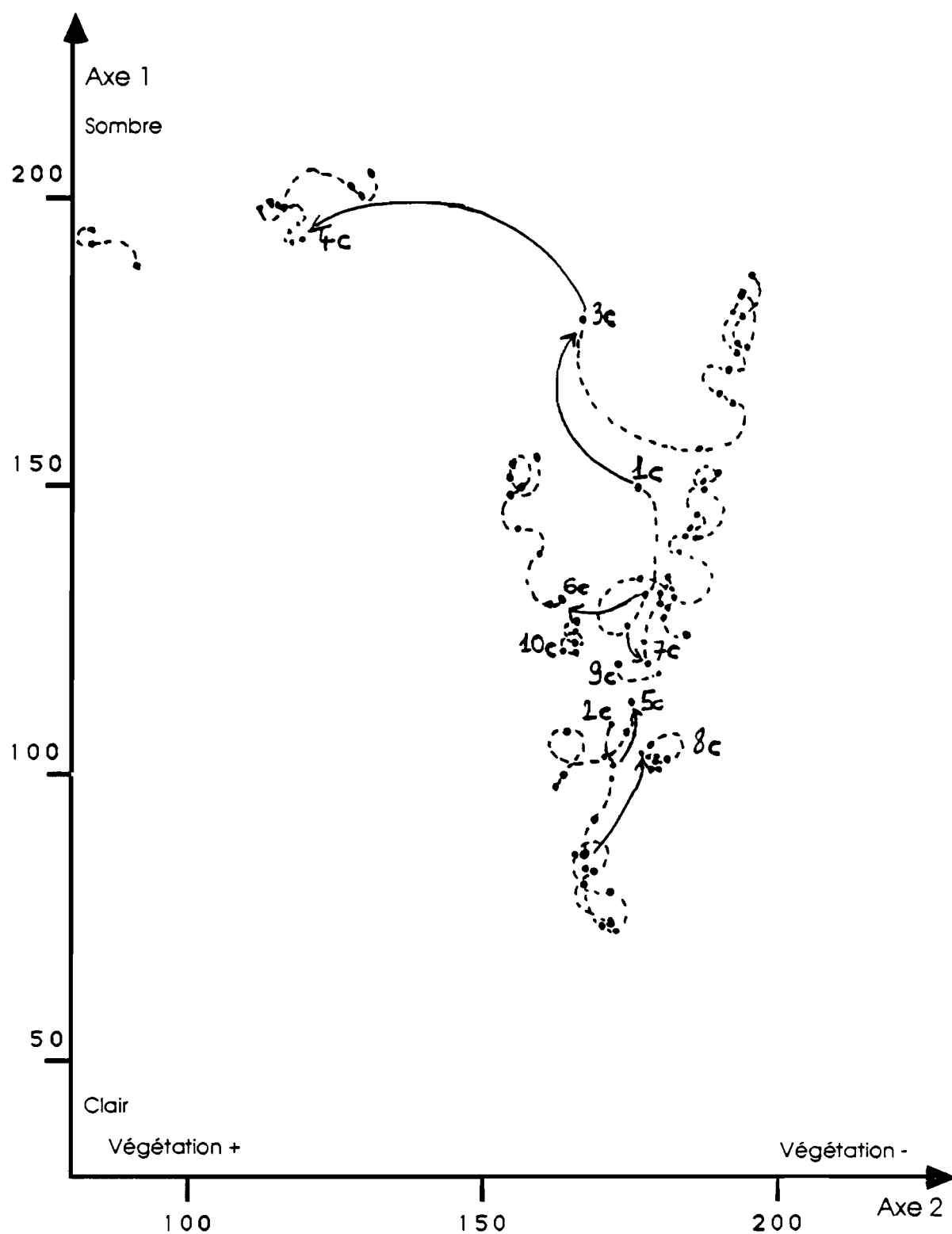


Figure n°23

DETERMINATION DE LA "FOURCHETTE" DE STABILITE

Image SPOT-Oursi 17 décembre 1986



EVOLUTION DES CENTRES DE CLASSES EN DECEMBRE
PARTITIONS 2 A 14 SUR LES AXES FACTORIELS 1 ET 2
ZONE D'OURS I

Image SPOT-HRV du 17 décembre 1986

Figure n° 24

Tableau n° 23

TEST DE STABILITE DES SIGNATURES SPECTRALES

sur les partitions issues de l'analyse en nuées dynamiques

Zone d'Oursi - Image SPOT-HRV DU 17 décembre 1986

ENTRE PARTITIONS	3/4	4/5	5/6	6/7	7/8	8/9	9/10	10/11	11/12	12/13	13/14
INDICE	0,05	0,12	0,23	0,21	0,17	0,13	0,25	0,23	0,20	0,22	0,17

Tableau n°24

TEST QUANTITATIF *

Zone d'Oursi - Image SPOT-HRV du 17 décembre 1986

Partitions	9	10
Classes		
1	63	90
2	59	90
3	51	89
4	93	100
5	90	88
6	75	71
7	72	88
8	93	98
		79

*en % relatif à la partition précédente

2- INTERPRÉTATION**2.1- Classification de l'image**

L'extrapolation des résultats obtenus sur la population échantillon à la scène toute entière est réalisée de la même manière que pour la date du 4 septembre 1986 en utilisant la méthode D.N.P. Comme pour la précédente date, les corrélations entre les axes factoriels de la population échantillon et ceux de l'image sont hautement significatives : $r^2 = 0,999$ pour l'axe 1 et $0,997$ pour l'axe 2 (annexe II). L'image obtenue (n° 4) est ensuite lissée en utilisant un filtre majoritaire 3x3 pour réduire l'effet de pointillé.

2.2- Etude statistique des classes

Comme pour l'étude des U.S.R du 4 septembre, l'étude des paramètres statistiques est faite à partir de quatre modules :

- dendogramme des unités (figure n° 25 et tableau n° 25)
- signatures spectrales sur les canaux bruts (figure 26 b, tableau n° 26).
- indices de brillance et de végétation (tableau n° 27).
- histogramme bidimensionnel de la position des unités par rapport aux axes factoriels 1 et 2 (figure n° 26 a).

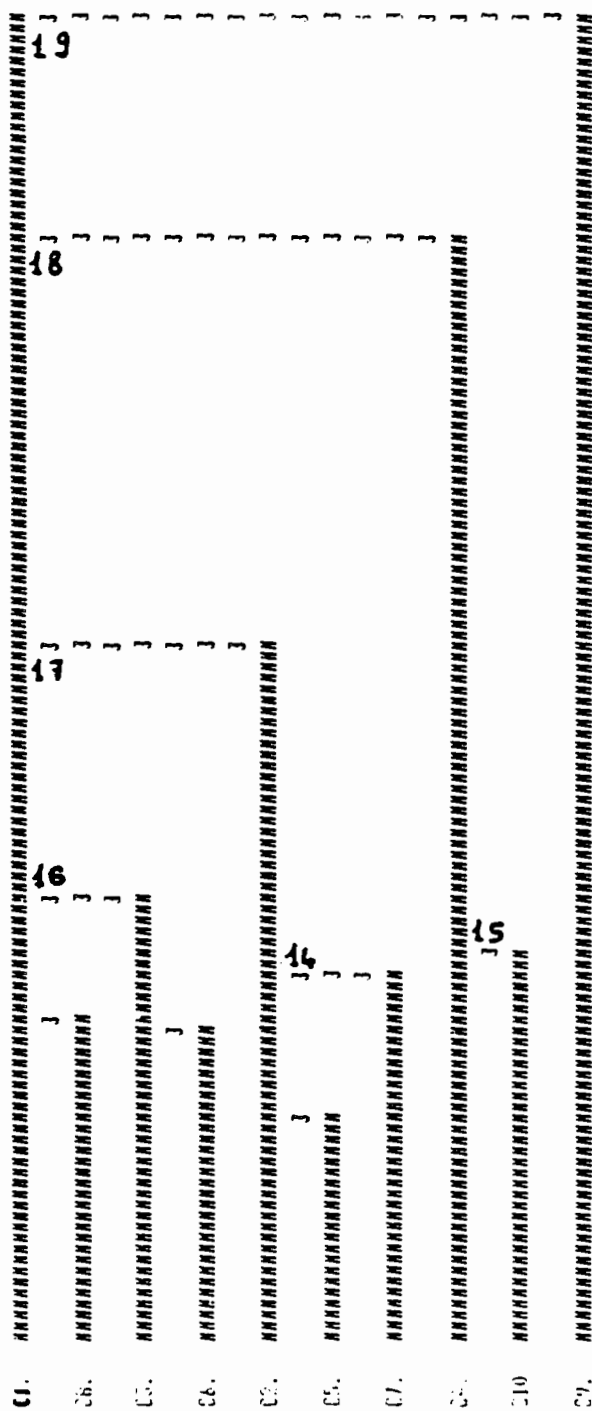
Les résultats sont synthétisés par le tableau n° 28 .

Tableau n° 25

DESCRIPTION DE LA HIERARCHIE POUR 10 CLASSES

Image SPOT-HRV du 17 décembre 1986

NOEUDS	AINES	BENJAMINS	POIDS	NIVEAUX
N&11	C2	C5	2	19,20
N&12	C3	C6	2	27,00
N&13	C1	C8	2	28,00
N&14	N&11	C7	3	31,50
N&15	C4	C10	2	34,00
N&16	N&13	N&12	4	38,25
N&17	N&16	N&14	7	60,58
N&18	N&17	N&15	9	95,50
N&19	N&18	C9	10	115,11



HIÉRARCHISATION DES CLASSES RADIOMÉTRIQUES STABLES
Dendrogramme

Figure n°25

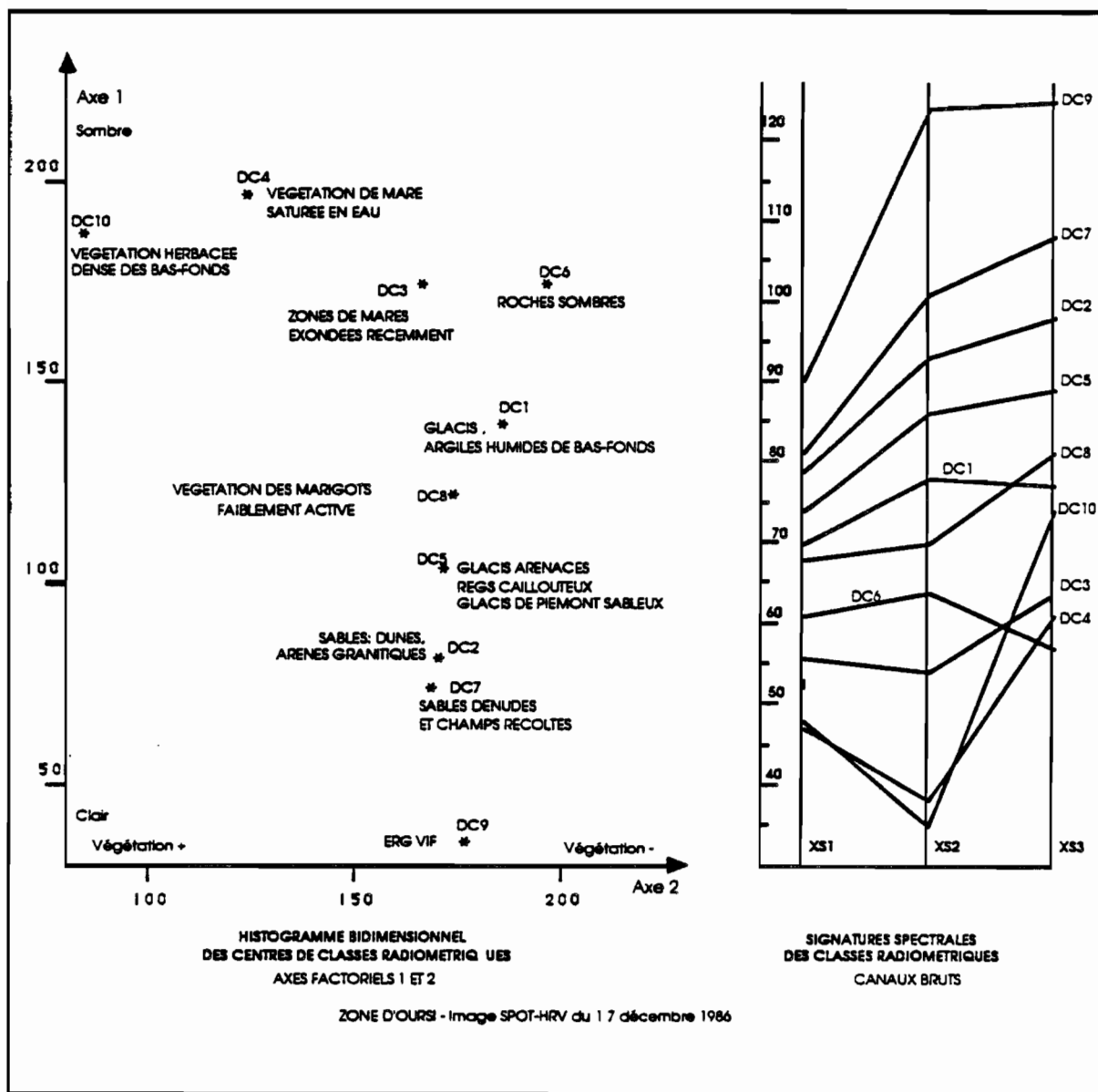
Image du 17 décembre 1986 *

Tableau n° 26

STATISTIQUES DES CLASSES OBTENUES
Paramètres des classes

UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT - Image SPOT-HRV du 17 décembre 1986

UNITES	CANAL XS1		CANAL XS2		CANAL XS3	
	moyenne	variance	moyenne	variance	moyenne	variance
DC3	56,32	25,94	54,41	57,32	63,70	68,79
DC4	46,59	20,75	38,74	48,65	61,00	66,64
DC8	67,05	16,98	70,79	27,53	81,29	27,20
DC10	47,40	27,39	36,13	63,40	74,10	63,28
DC9	90,13	40,17	124,04	47,78	126,97	25,43
DC7	81,50	18,59	100,93	14,36	107,73	10,32
DC2	79,39	12,01	92,73	10,52	97,66	11,23
DC5	74,51	11,43	84,67	11,90	88,78	9,93
DC6	61,15	20,06	63,92	43,01	60,55	50,90
DC1	69,43	11,67	77,87	15,60	78,38	17,64



Figures n° 26 a et b

Tableau n° 27

**INTERPRETATION DES UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT
à l'aide des indices de végétation et de brillance**

Classification: image du 17 décembre 1986

<u>unités</u>	<u>signification thématique des unités</u>	IV* (1)	IB* (1)
DC3	zone de mare exondée récemment avec végétation chlorophyllienne	138,1	58,7
DC4	végétation active dense de mare et eau	156,9	50,6
DC8	marigots-pourours des mares végétation active arborée principalement	136,9	75,6
DC10	prairie aquatique du centre des mares	172,7	57,8
DC9	erg vif, sables très clairs	129,6	124,9
DC7	sables dénudés et champs récoltés jonchés de paille	132,2	103,8
DC2	sables dunaires avec tapis graminéen sec et arènes granitiques grossières	131,3	94,7
DC5	arènes granitiques glacées	131,0	86,2
DC6	roches sombres, eau libre	124,4	61,7
DC1	glacis dénudés	128,4	77,6

**IV: indice de végétation , IB: indice de brillance
1: moyenne des unités*

Tableau n°28

**INTERPRETATION DES U.S.R
A PARTIR DES PARAMETRES STATISTIQUES**

Image du 17 décembre 1986

UNITES	Dendrogramme et signatures spectrales	Histogramme bidimensionnel, indices de végétation et de brillance (IVG) (IB)
DC9	- Le noeud 19 isole cette unité de toutes les autres. - Sa signature spectrale est relativement aux autres unités très élevée. La réflectance augmente de 35 points entre XS1 et XS2 puis se stabilise entre XS2 et XS3. - Unité très réfléchante sans végétation	- IB élevé : 124,9. IVG bas : 129,6. - L'histogramme indique que C9 est bien un thème isolé par des caractéristiques particulières. - Interprétation idem que précédemment
DC10	- Le noeud 18 sépare les unités C10 et C4 du reste. - La signature spectrale forme une inflexion très forte sur le canal XS2. La réflectance est basse sur le canal XS1. - Unité dominée par des états de surface avec végétation active.	- IB bas : 57,8. IVG élevé : 172,7. - L'histogramme situe C10 à l'opposé de C11 et confirme le fait que cette unité possède de la végétation active à cette date.
DC4	- Le noeud 15 isole C10 de C4. - La signature spectrale de C4 est à rapprocher de celle de C10. Mais sur les canaux XS2 et XS3 la réflectance est plus basse - Unité dominée à des états de surface liés à la fois à de la végétation active et à une forte humidité.	- IB bas : 50,6. IVG élevé : 156,9. - Sur l'histogramme C4 se distingue par une plus faible clarté et par un taux de végétation moins élevé que C10. l'interprétation est identique à la précédente.
DC7	- Le noeud 17 isole un groupe de trois unités : C7, C5, C2. C7 se sépare des deux autres au noeud 14. - Sa signature spectrale possède le même profil que C9 en moins accentué et avec une réflectance plus basse. - Unité regroupant des états de surface réfléchissantes sans végétation active.	- IB élevé : 103,8. IVG bas : 132,2. - C'est l'unité la plus proche de C9 sur l'histogramme. Même interprétation que ci-contre.
DC5	- Le noeud 11 sépare C5 de C2. - La signature de C5 présente le même profil que C9, C7, C2, mais en moins réfléchissant. - unité de réflectance moyenne.	- IB moyen : 86,2. IVG bas : 131,0. - L'étude de l'histogramme n'apporte rien de plus que se qui a été émi auparavant.
DC2	- Idem C5 - Se distingue de C5 par une signature spectrale plus élevée. - unité réfléchissante.	- IB moyen à élevé : 94,7. IVG bas : 131,3. - L'histogramme signal que de C7 à C6 tous les thèmes sont alignés et que la différenciation entre ces unités se produit surtout d'après l'axe factoriel 1 qui enregistre leurs différences en terme de brillance.

Tableau n° 28 (suite)

**INTERPRETATION DES U.S.R
A PARTIR DES PARAMETRES STATISTIQUES**

Image du 17 décembre 1986

UNITES	Dendrogramme et signatures spectrales	Histogramme bidimensionnel, indices de végétation et de brillance (IVG) (IB)
DC6	- Le noeud 16 sépare C6, C3 de C8, C1. Le noeud 12 sépare C6 et C3. - Si l'on excepte des thèmes végétation C9, C10 C6 est le thème possédant la signature spectrale la plus basse et qui forme un léger dôme sur le canal XS2 et redescend fortement sur XS3. - Etats de surface sombres comprenant éventuellement des surfaces d'eau libre.	- IB bas : 61,7. IVG bas : 124,4. - l'étude de l'histogramme confirme l'interprétation précédente.
DC3	- Même interprétation que C6. - La signature spectrale présente une légère inflexion sur le canal XS2. Les valeurs des canaux sont assez basses, proches de C6. - Etats de surface sombres avec végétation active.	- IB bas : 58,7. IVG moyen : 138,1. - Sur l'histogramme la position de cette unité est proche de C6 et de C4. Il semble qu'il s'agisse de plages de végétation reposant sur des formations superficielles sombres. La basse réflectance que l'on enregistre est probablement dû à leur humidité.
DC8	- C8 se sépare de C1 au noeud 13. - Même profil que C3 mais avec des valeurs plus élevées. - Unité de moyenne réflectance avec végétation active.	- IB moyen : 75,6. IVG moyen : 136,9. - C8 se situe entre C5 et C1 sur l'histogramme. Cependant on note qu'il est légèrement décalé vers la gauche en direction de la végétation active si l'on considère l'axe des unités sans végétation entre C7 et C6.
DC1	- Même interprétation que C8 - Même profil que C6 mais avec une réflectance plus forte et un dôme moins accentué. - Unité de moyenne réflectance sans végétation active.	- IB moyen : 77,6. IVG bas : 128,4. - Même interprétation que ci-contre.

2.3- Contrôle avec les documents de référence au sol

Nous avons précisé chapitre VI que les dates des contrôles effectués au sol ne coïncident pas avec la prise de vue du satellite. Néanmoins, pour les régions sableuses et les glacis peu d'éléments du paysage sont susceptibles d'avoir changé entre fin octobre, période de nos observations au sol, et le 17 décembre 1986, date de la prise de vue.

On peut donc considérer que les seules modifications importantes que l'on puisse relever entre ces deux dates sur ces unités concernent la couleur des sols et le recouvrement de biomasse. Ces modifications sont consécutives au pâturage des dunes et glacis herbacés. Comme ce facteur n'est peut-être pas négligeable, il convient de rester prudent pour l'estimation des taux de recouvrement de biomasse sèche sur ces unités à la date de la prise de vue. Il en sera tout autrement pour les zones de bas-fonds où se concentrent les eaux soumises à une évaporation intense. Les seuls constituants du paysage observés pour ces unités concernent la densité ligneuse, la position exacte de l'unité par rapport à la topographie et éventuellement la nature de son substratum.

2.3.1- Contrôle du contexte topographique et géomorphologique

La classification de décembre vérifiée à l'aide de la carte géomorphologique et géodynamique du bassin d'Oursi et des photographies aériennes d'octobre 1981 révèle est très précise. La disparition de la végétation des zones sableuses et de glacis permet de pousser plus loin l'analyse des caractères du sol de certaines unités qui étaient auparavant masquées par la végétation (tableau n°29).

Tableau n° 29

INTERPRETATION DES U.S.R
A PARTIR DE LA VISUALISATION ECRAN ET DES DOCUMENTS DE REFERENCE

Image du 17 décembre 1986

UNITES	VISUALISATION ECRAN *	DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES * DE REFERENCE
DC9	- Unité localisée au nord de l'erg vif en une plage circonscrite et identifiée sur l'image de septembre comme étant un erg vif. - 0,31 % de l'image	- Idem ci-contre.
DC10	- Unité occupant le centre de la mare. - 0,59 % de l'image	- Il s'agit des prairies aquatiques du centre de la mare et dont le recouvrement en eau est faible par rapport à la végétation.
DC4	- Unité se localisant dans la mare et entourant l'unité C10 - 1,55 % de l'image	- Ce sont des prairies aquatiques avec l'eau dominante à cette période.
DC7	- Unité se présentant: •soit sous forme de grandes plages continues sur les cordons dunaires au nord de la mare •soit sous forme de petites tâches dans le secteur des glaciés arénacés sur le bassin du Gountouré - 5,19 % de l'image	- Cette unité regroupe au moins trois thèmes différents quant aux processus dynamiques : •sols de cultures après récolte •sables génétiquement très clairs et ressortant par rapport aux sables voisins •sables dénudés par surpâturage et implantation de campements nomades itinérants situés principalement aux sommets des dunes.
DC5	- Unité localisée entre la mare et les massifs bordant le bassin vers le sud et vers l'ouest. Dans le bassin de Yomboli on retrouve cette unité à proximité de la mare. Dans tous les cas elle se présente sous forme de plages compactes. Sur le cordon dunaire entre Yomboli et Oursi on note aussi sa présence dans les creux interdunaires. - 32,81 % de l'image	- Deux thèmes au moins s'apparentent à cette unité: •le premier est constitué des glaciés arénacés •le deuxième est formé des piémonts sableux de Koel qui sont des placages de sables éoliens rubéfiés. - La présence de cette unité dans les creux interdunaires ne reçoit pas d'explication dans l'immédiat
DC2	- Cette unité massive recouvre quasiment le bassin du Gountouré et le cordon dunaire au nord de la mare à l'exception des secteurs occupés par C9 et C7. - 31,00 % de l'image	- C2 de décembre est similaire à C2 de septembre. Elle recouvre deux types de surfaces sableuses différentes par leur rugosité : •les cordons dunaires et placages éoliens •les arènes granitiques fraîches ou légèrement glacées

Tableau n° 29 (suite)

**INTERPRETATION DES U.S.R
A PARTIR DE LA VISUALISATION ECRAN ET DES DOCUMENTS DE REFERENCE**

Image du 17 décembre 1986

UNITES	VISUALISATION ECRAN *	DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES * DE REFERENCE
DC6	- Unité circonscrite uniquement aux massifs rocheux sombres, aux buttes cuirassées, et aux néocuirasses. - 5,61 % de l'image	- A la différence de septembre l'unité C6 n'inclue pratiquement pas le thème "eau libre" et "argiles humides" de bas-fonds. Il est donc plus pur que l'unité correspondante en septembre.
DC3	- Elle occupe une petite surface de la mare entre C4 et C8. - 0,56 % de l'image	- L'examen à partir des photographies aériennes et des cartes thématiques n'explique pas beaucoup ce phénomène. D'après la carte pédologique ce secteur possède des sols de type de vertisols et parvertisols. Il semble qu'il s'agisse d'une zone plane de la mare récemment exondée et dont le substrat est encore humide. La végétation aquatique y est encore active.
DC8	- Cette unité est présente uniquement dans les talwegs sous forme de rubans continus et en certains secteurs des glacis. - 3,64 % de l'image	- Les secteurs de bas-fonds possèdent un couvert ligneux dense, en particulier dans la zone de convergence des marigots et sur le pourtour de celle-ci. La végétation ligneuse repose sur des sols de type vertisols et parvertisols. Le fait que cette végétation soit active à cette date indique que les bas-fonds révèlent l'existence de réserves en eau dans ces secteurs.
DC1	- Il y a trois localisations pour C1 : • autour des massifs de gabbros et des cuirasses • sur les versants, entre les limites ouest et sud du bassin et la mare. • Dans l'axe de la dépression centrale où circule un réseau de chenaux anastomosés de cours d'eau. - 18,77 % de l'image	- Ces trois localisations désignent des secteurs de glacis reposant sur des sols bruns argileux..

Suite aux analyses des modules statistiques et du contexte topographique et géomorphologique est proposé quatre groupes d'unités:

- groupe 1 : unités des bas-fonds avec végétation C10, C4, C3, C8.
- groupe 2 : unités des sables - C9, C7, C2, C5.
- groupe 3 : unités des glacis - C1.
- groupe 4 : unités des roches sombres et eau libre - C6.

Le tableau n° 30 et la figure n° 27 a résumé les statistiques pour chacune des unités et pour chaque groupe d'unités. A cet égard, il est intéressant de comparer ce tableau avec le tableau similaire obtenu en septembre.

• En septembre, quatre groupes ont été constitués. Trois groupes sont qualifiés de façon identique aux deux dates (groupes 2, 3, 4). Le groupe 1 est qualifié "végétation dense" en septembre à cause des forts taux de biomasse relevés dans ces unités à cette date. La dominance de la végétation chlorophyllienne est tellement évidente pour les trois unités que contient le groupe qu'elle frappe tout de suite l'observateur au sol lorsqu'il se trouve à proximité. Elles tranchent nettement avec le peu de végétation des glacis avoisinants.

• En décembre, l'élément discriminant que l'on retient est surtout d'ordre topographique. Cette variable du paysage est une caractéristique dominante au sein du groupe 1. Elle indique clairement l'importance du facteur topographique dans la concentration de la végétation encore active au mois de décembre.

Si l'on considère les pourcentages relatifs de chaque groupe par rapport à l'image entière, on note : une diminution nette du groupe n° 1 (10,41 à 6,34 %), une augmentation du groupe sable (de 60,19 à 69,31 %), une diminution des groupes roches sombres (6,4 à 5,61 %) et glacis (23,01 à 18,77%). La fraction sableuse du bassin occupait déjà une surface importante sur l'image de septembre. Elle s'accroît en décembre au détriment du thème glacis. Ce phénomène sera analysé précisément dans le prochain chapitre. Une autre constatation importante à relever : même si la partition en 10 classes de décembre fait apparaître dans le groupe 1 (groupe de la végétation dense) une subdivision plus grande (on passe de 3 à 4 unités entre les deux dates) des unités à végétation dominante - donc une interprétation différente de ces unités - le nombre global d'unités possédant un caractère végétal régresse. Ceci est dû principalement au changement thématique que l'on enregistre dans certaines unités du groupe n° 2 "sable" lié bien évidemment aux changements climatiques intervenus entre ces deux dates.

Tableau n° 30

STATISTIQUES DES U.S.R
UNITES RADIOMETRIQUES STABLES
SUPERFICIES DES GROUPES ET UNITES

- Image SPOT-HRV du 17 décembre 1986

GROUPES	UNITES	NOMBRE DE PIXELS	SUPERFICIE *	% de L'IMAGE TOTALE	
				UNITES	GROUPES
BAS-FONDS	DC3	9.317	3,73	0,56	6,34
	DC4	25.512	10,20	1,55	
	DC8	60.177	24,07	3,64	
	DC10	9.737	3,89	0,59	
SABLES	DC9	5.088	2,04	0,31	69,31
	DC7	85.712	34,28	5,19	
	DC2	511.817	204,73	31,00	
	DC5	541.731	216,69	32,81	
ROCHES SOMBRES	DC6	92.569	37,03	5,61	5,61
GLACIS	DC1	309.833	123,93	18,77	18,77
IMAGE TOTALE		1.651.000	660,40	100	100

*En km2

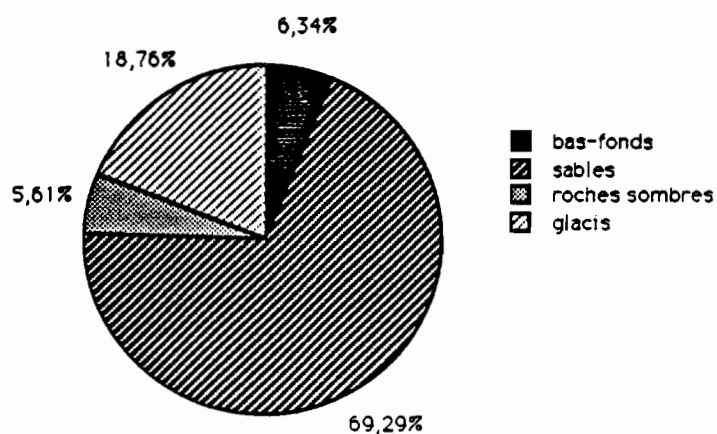


Figure n° 27

17 décembre 1986

SUPERFICIE DES GROUPES EN %
PAR RAPPORT A LA SUPERFICIE TOTALE

2.3.2- Interprétation en fonction des états de surface

A la date du 17 décembre 1986, les données de terrain relatives aux états de surface sont les seules exploitables en fonction de la non synchronisation entre opérations de contrôle au sol et la prise de vue. Chaque transect étudié au sol est soigneusement replacé sur l'image, les deux images étant recalées parfaitement, le fichier "transect" s'adapte parfaitement sans problème de décalage.

On calcule ensuite pour chaque transect la part de recouvrement des unités de composant. Quatre unités sont concernées par les transects témoins : DC5, DC2, DC7, DC1.

- Pour l'unité DC5, on constate une certaine hétérogénéité dans les états de surface représentés par cette classe en décembre. Une grande partie de l'unité est formée de glacis arénacés. (si l'on considère que les glacis d2 et d3 à gravillons ferrugineux (Figure n° 12) sont des glacis arénacés).

Un transect b1 est entièrement inclus dans l'unité DC5 bien qu'il soit désigné en tant que "glacis de piémont sur sol brun". Ce même transect faisait partie à 80% de l'unité DC6 de septembre dont la signification thématique est "piémont sableux avec végétation". L'explication la plus probable que l'on puisse apporter à la présence de ce transect au sein de l'unité DC5 de décembre semble être liée à la densité végétale plus grande que l'on rencontre sur ces placages sableux et corrélativement un plus grand taux de matière organique dans l'horizon de surface. Ce fait expliquerait aussi la présence du transect b10 (à 50%) au sein de l'unité DC5. b10, dont l'état de surface indique "sable très épais, erg récent" se situe à l'est de Gountouré. La partie de b10 concernée par DC5 est représentée sur l'image par les dépressions des cordons dunaires où se concentre une végétation ligneuse et herbacée dans des proportions beaucoup plus grandes que sur les sommets. La figure 27 b montre les signatures spectrales de différents états de surface obtenues sur glacis arénacés à partir de mesures de terrain au moyen d'un radiomètre portable CIMEL.

- L'unité DC2 regroupe trois types d'états de surface :

- le premier englobe les sables des cordons dunaires.
- le second indique les sables se présentant sous forme de jupes sableuses à granulométrie fine. Il s'agit pour la plupart de dépôts éoliens localisés près de petits reliefs permettant l'accumulation dans le lit du vent.
- le troisième type regroupe les glacis arénacés peu glacés en surface et les arènes fraîches.

- A part le transfert de b9 entièrement inclus à l'intérieur, l'unité DC7 possède des pourcentages modestes des transects étudiés. Aucun des transects considérés ne se situe en zone de champs où l'on peut trouver au sol de nombreux débris de fanes de cultures de mil. On peut donc penser que les parties "sables fins très épais, erg récent" inclus dans l'unité DC7 désignent soit des sables dénudés marqués par l'absence (ou la disparition récente) de l'horizon humifère, soit des sables particulièrement clairs naturellement, notamment au nord de Tin Edjar. Ceci semble être confirmé par le fait que DC7 se rencontre surtout sur les sommets des dunes émoissées. Ces sommets sont fragiles, marquant souvent les sites d'anciens campements. Soumis au surpiétinement ils deviennent sensibles à l'érosion éolienne.

- L'unité DC1 est relativement homogène. La caractéristique principale qui se dégage est que cette unité est dominée nettement par des glacis sur sols bruns.

- Groupe 1: Bas-fonds

• DC3 : secteur de mare exondée récemment ou en voie de l'être à cette date, comportant une végétation herbacée moyennement active. Le faible indice de brillance indique des sols encore humides de type vertisol et para-vertisol (classe des sols intra-zonaux localisés en zones climatiques à climat très contrasté avec une longue période sèche). Zone probable de décantation des eaux en provenance des marigots.

• DC4 : unité de mare à végétation herbacée active et dense avec eau dominante à cette date. Tout comme C3 les sols sont des vertisols et paravertisols, les argiles en suspension apportées par les marigots se déposant sur les fonds plus profonds que pour l'unité C10.

• DC8 : localisée le long des marigots, dans la zone de convergence de ceux-ci à l'abord des mares et sur leurs pourtours, caractérisée par une végétation ligneuse dense et faiblement active à cette date. Cette végétation repose sur des sols de type vertisol et paravertisol bordant le cours des marigots.

• DC10 : végétation active dense de mare avec l'élément eau moins dominant qu'en C4. Ceci indique un comblement partiel de cette unité par des sables éoliens liés à l'importante déflation que l'on observe durant la saison sèche mais aussi en saison humide.

Groupe 2: Sables

• DC9 : erg vif, sables réfléchissants, pulvérulents. Végétation rare, concentrée uniquement dans quelques dépressions. Action intense du vent en toutes saisons et déplacement des particules sableuses. Modélisation renouvelée de façon perpétuelle, ces particules sableuses n'ayant aucune cohérence.

• DC7 : sables dénudés pour la plupart. Regroupe au moins trois thèmes:

- _ sols de culture après récolte
- _ sables éoliens possédant une légère couverture herbacée
- _ sables dénudés avec disparition de l'horizon humifère localisé principalement sur les sommets émoussés des dunes.

• DC2 : regroupe deux thèmes :

- _ les sables éoliens de l'erg récent possédant une légère couverture herbacée fixant le sol
- _ les arènes granitiques fraîches non encore glacées en surface.

• DC5 : regroupe deux thèmes liés par des signatures spectrales voisines. Le premier est constitué par les glacis arénacés glacés permettant le transit des gravillons ferrugineux déplacés lors des orages par écoulement diffus ou concentré en réseaux anastomosés. Le second est formé de sables fins de dunes ou de placages éoliens de couleur sombre liés à la présence d'un horizon humifère bien développé. Ce qui indique une concentration et une infiltration plus grande des eaux de pluie dans ces zones permettant un développement végétal préférentiel sur ces sols.

Groupe 3: Roches sombres, eau libre

• DC6 : regroupe tous les lithosols non évolués de couleur sombre, les cuirasses ferrugineuses et l'eau libre. Une végétation négligeable pousse sur les versants des buttes et massifs dans des poches de sol brun interstitiel qui se développent entre les blocs de gabbros.

Groupe 4 : Glacis

• DC1 : remarquablement homogène, ce groupe représente les glacis développés sur sols bruns sub-arides vertiques associés à des sols bruns sub-arides modaux. La surface de ces glacis peut, dans certains cas, être pavée de blocailles de roches diverses. La rare végétation ligneuse et herbacée de ces glacis est sèche à la date de prise de vue du 17 décembre 1986.

- Conclusion

En ce qui concerne la reconnaissance des formations superficielles, la précision atteinte dans l'interprétation doit être attribuée principalement au fait que les unités de l'image du 17 décembre possèdent peu de végétation se concentrant sur des localisations très restreintes (mares, certains bas-fonds). Par contre sur l'image de septembre les taux de corrélation entre les indices de végétation et de brillance sont corrélés de façon hautement significative avec les paramètres végétaux indiquant par là une dominance du facteur végétal à cette date. Ce qui est logique si l'on considère que la végétation joue un rôle de masque pour la surface minérale du sol et perturbe le signal radiométrique réfléchi.

La précision de l'interprétation est étonnante eu égard au mode de classification basé sur une démarche non-dirigée de l'espace radiométrique. On constate cependant que des sous-strates existent au sein des unités. Ces sous-strates peuvent être facilement extraites grâce à la méthode d'analyse pyramidale des classes. Mais il est un autre point plus intéressant encore. Certaines unités thématiques sont présentes à l'une et l'autre date. Ce qui semble indiquer que les constituants majeurs restitués par la réflectance de surface captée n'ont pas varié de façon significative pour les classes considérées lorsque l'on passe d'une date à l'autre. Il est donc pratiquement possible d'appliquer la méthode d'analyse de la dynamique des paysages, telle qu'elle est expliquée au chapitre III, pour tenter d'apprécier l'évolution du paysage entre les deux dates.

CHAPITRE IX

ETUDE DE LA DYNAMIQUE DES UNITES DU PAYSAGE

Les deux chapîtres précédents montrent comment analyser des images en réunissant un maximum de conditions d'objectivité. Les unités radiométriques stables ont une signification thématique assez précise surtout celle du 17 décembre 1986. La relation unité radiométrique - unité du paysage se révèle dans l'ensemble satisfaisante. Certaines unités ont été très bien identifiées tandis que d'autres semblent plus floues, plus incertaines, leurs caractéristiques principales évoluant rapidement.

Il serait cependant abusif de dire que les unités radiométriques stables apparues aux deux dates constituent les unités réelles du paysage. Tout d'abord parce que la vision restituée que l'on a de ces unités dépend étroitement des caractéristiques techniques des capteurs utilisés qui se limitent à la prospection de certains domaines du spectre électro-magnétique. Ensuite, parce qu'un paysage est une entité en perpétuelle évolution faisant alterner des phases de flux d'énergie et de matière d'ampleur inégale durant le cycle annuel et pluri-annuel. Quelques éléments de réponse peuvent être dégagés avec l'analyse multodate d'images satellite proposée et mise en application dans ce chapitre.

1- COMPARAISON DES DEUX IMAGES

Pour analyser la dynamique d'un paysage il paraît indispensable, dans un premier temps, de trouver quels sont les éléments du paysage qui sont restés stables dans un intervalle de temps défini comme étant compatible avec l'étude. Les éléments du paysage sont identifiés ici à des unités radiométriques stables. Cela revient donc à chercher si des unités stables ou des parties de l'image de référence (4 septembre) sont encore présentes sur l'image de comparaison (17 décembre) avec la même signification.

Dans les interprétations établies pour septembre et décembre, il est aisé de constater que certaines unités possèdent la même signification thématique ou diffèrent seulement de façon peu sensible. Par exemple, l'interprétation "Roches sombres, argiles de bas-fonds et eau" donnée à l'unité SC5 de septembre (les unités de septembre seront désormais précédées d'un "S", celles de décembre d'un "D") correspond à peu de choses près à l'unité DC6 de décembre (réf. les tableaux n° 13 et 27). Seules les argiles humides de bas-fonds ont disparu puisqu'elles possèdent un caractère saisonnier, l'humidité ayant cessé le 17 décembre.

Il paraît évident que ce sont les roches sombres, majoritaires dans cette unité, qui demeurent stables d'une date à l'autre, étant peu affectées par des transformations dues à la présence dense d'une végétation herbacée à évolution rapide, ou à des processus intenses de météorisation de surface. Les roches sombres sont par excellence les éléments stables du paysage, leur dégradation étant très progressive, se produisant en des cycles géologiques de longue durée. Mais la constatation que l'on a pu faire pour les roches sombres est aussi valable pour d'autres couples d'unités. Par exemple : SC2-DC2, SC11-DC9, etc, ...

Il est logique de penser que l'erg vif (SC11-DC9) n'a pas varié notablement en composition entre les deux dates, si ce n'est peut-être en superficie par gain sur les marges. Par contre cela est moins évident pour les régions sableuses, SC2-DC2, ces unités supportant de la végétation. On peut alors supposer qu'une partie seulement de la superficie (mais qui peut être importante !) est identique aux deux dates marquées par un élément dominant qui imprime son caractère sur le paysage. Bien sûr il est toujours possible de dire qu'étant donné l'intervention subjective d'un observateur lors de la phase d'interprétation des unités, il est arbitraire d'effectuer de telles comparaisons.

Il est donc indispensable de rechercher d'autres critères qui permettent d'établir de manière plus fiable les correspondances existant entre mêmes unités aux deux dates. De plus, cela permettra de réaliser "une échelle de stabilité" des unités sur des bases quantitatives lorsque ces unités sont observées aux deux dates (voir chapitre III). Cette échelle de stabilité aura pour but l'évaluation de l'évolution produite au cours du temps écoulé. Les tableaux cités, n° 13 et 27, montrent déjà une particularité intéressante à propos des unités semblant presque identiques aux deux dates.

L'indice de végétation est sensiblement le même aux deux dates, seul diffère l'indice de brillance. La raison en est simple: les histogrammes des canaux aux deux dates n'ont pas les mêmes valeurs, étant influencés par les conditions climatiques et bioclimatiques présentes au moment des prises de vue. Or, l'indice de végétation employé est une mesure relative. Il peut donc servir de comparateur pour un phénomène se produisant entre deux dates, ce qui n'est pas le cas pour l'indice de brillance.

2- GÉNÉRATION DES UNITÉS MULTIDATES

Le principe de génération des unités multirates a déjà été expliqué chapitre III. Il consiste à croiser les surfaces des unités stables aux deux dates et de faire figurer les résultats dans un tableau où l'on trouve en abscisse les unités stables d'une image et en ordonnée la seconde image. La fusion informatique des deux classifications résulte d'une simple addition des fichiers images. Il faut bien préciser que ce procédé se base uniquement sur le croisement des contours des unités des deux images donc sur la topologie et ne fait intervenir aucun autre critère. Dans notre cas, l'opération fait apparaître 95 classes dont les superficies varient de 1 à 251388 pixels.

Un seuil relatif minimum a été fixé pour éliminer les valeurs trop faibles. Elles sont difficiles à interpréter et proviennent certainement d'erreurs conçues au cours des étapes ultérieures (n'oublions pas qu'il y a environ 5 % de probabilité d'erreurs). On supprime toutes les classes inférieures à 0,1% de la scène totale (0,1% = 0,66 km²). L'ensemble de ces classes représente 1,93% de la scène totale. Le tableau n° 31 indique les pourcentages relatifs des 39 classes multirates issues du croisement 4 septembre-17 décembre 1986.

SUPERFICIE DES UNITÉS MULTIDATES *
4 septembre-17 décembre 1986

Tableau n°31

Images SPOT-Oursi -Bassin d'Oursi

Erg vif C11							0,11		●119 0,30	
VG dense C10		0,25		0,59	1,22		0,66			0,44
VG + eau C9	0,48		0,24	0,81	0,53		0,93			0,10
Arènes glacéesC8	0,99	6,28			11,33	0,20				
Mil sur sables C7		7,62			1,34		1,15			
Piémont sabl. C6	0,45		1,37		●65 7,94				0,46	
Roches sombres + eau C5	1,17					●56 4,83				
VG dense C4	0,32				2,58			0,81		
Glacis C3	●31 12,46	0,18			5,51	0,38				
Sables C2		●22 15,22			1,25		3,84			
Glacis + VG C1	2,81				1,08			0,41		
4 septembre ↑ 17 décembre	C1 Mare →	C2 Sables	C3 Mares zones xondées	C4 VG dense + eau	C5 Arènes glacées -glacis piémont arborée	C6 Roches somb. + eau	C7 Sables dénudés	C8 Argiles talwegs partie	C9 erg vif	C10 VG centre mares

* en pourcentage de l'image totale

● signale les U.M.R.

Ce tableau sert à repérer les unités multirates. En partant d'une unité quelconque, il faut lire tout d'abord le code de l'unité stable radiométriquement de septembre puis celle de décembre. La conjonction des deux code donne le nom de l'unité multirate.

3- RECHERCHE DES UNITÉS MAJEURES RELATIVES

Le principe de recherche des unités majeures relatives (UMR) consiste à vérifier si certaines unités multidates possèdent la même signification thématique aux deux dates.

3.1- Signification des UMR

Avant d'aborder l'étude des unités multidates il est indispensable de préciser la signification du terme UMR. Précédemment, il a été expliqué qu'un paysage pouvait être conçu (ou perçu) comme une entité dynamique formant un tout dont les parties évoluent de manière différente sous l'influence de dynamiques qui s'exercent sur elle.

En se basant sur cette conception, étudier l'évolution d'un paysage dans un laps de temps déterminé, consiste à établir une échelle mesurant l'évolution subie par chacune des parties du paysage. On peut distinguer schématiquement deux grands types de variables qui caractérisent le paysage et sont susceptibles d'être enregistrés par les capteurs satellitaires :

- les variables d'état liées aux caractéristiques physiques des états de surface, formations superficielles et couverture végétale.
- les variables de flux d'énergie et de matières.

Ces deux types de variables interagissent et sont difficilement dissociables dans la réponse spectrale restituée par le signal radiométrique sur une surface donnée, en tenant compte aussi des phénomènes atmosphériques. Sur une image multidate, la prépondérance du premier groupe de variables fait ressortir de façon préférentielle les phénomènes de rugosité et de couleur des surfaces. Il caractérise les unités qui ne subissent pas de différenciation marquée aux deux dates. Pour cette raison, ces unités particulières sont qualifiées d'unités majeures relatives (UMR). Elles sont relatives parce que tributaires de l'intervalle de temps d'observation ($t_0 - T_1$). Le second groupe de variables est lié aux phénomènes photosynthétiques et relatifs au cycle de l'eau. Sur une image multidate, ces variables se manifestent par des surfaces radiométriques très changeantes, témoignant de la vigueur plus ou moins grande des dynamiques ayant agi sur ces unités du paysage. De telles unités sont qualifiées d'unités variantes.

Outre qu'elles renferment la somme des paramètres les plus stables, les UMR ont pour fonction essentielle d'orienter l'interprétation dynamique du paysage. Elles jouent en quelque sorte le rôle de "pivots stables relationnels" avec les unités variantes. Elles sont le point de départ pour observer l'organisation du paysage et son évolution.

3.2- Obtention des UMR 4 septembre-17 décembre 1986

Chacune des 95 unités multidates possède deux ensembles distincts de cinq paramètres formés par les trois valeurs radiométriques des canaux bruts et les indices de brillance et de végétation. Pour vérifier si certaines classes sont des UMR, on procède aux "branchements" successifs des unités stables à la première date avec les unités multidates. Dans le cas présent, la première classification comporte 11 unités stables et la seconde 10. Chaque unité de septembre compte 10 "branchements" possibles et chaque unité de décembre 11. Dans la pratique, on emploie conjointement une matrice des distances et une classification ascendante hiérarchique.

La signification d'une connexion existante entre une unité stable et les unités multidates passe par la notion de distance. La classe multidate satisfaisant aux conditions du "branchement" avec l'unité stable considérée, sera celle possédant la distance la plus réduite aux deux dates

considérées. Chaque unité stable des deux images possède donc une connexion. Le tableau n° 32 indique les connexions établies pour les deux dates. On remarque que cinq unités multidates se retrouvent aux deux dates :

- C22, C31, C56, C65, C119.

Elles satisfont aux conditions d'un double "branchement" tel qu'il a été défini et représentent les UMR de l'image multirate.

Tableau n° 32

CONNEXIONS ENTRE UNITES STABLES ET MULTIDATES

4 SEPTEMBRE		17 DECEMBRE	
UNITES		UNITES	
STABLE	MULTIDATES	STABLE	MULTIDATES
SC1	C11	DC1	C31
SC2	C22	DC2	C22
SC3	C31	DC3	C53
SC4	C45	DC4	C94
SC5	C56	DC6	C65
SC6	C65	DC6	C56
SC7	C72	DC7	C27
SC8	C85	DC8	C48
SC9	C119	DC9	C119
SC10	C108	DC10	C1010
SC11	C119		

3.3- Interprétation des UMR

3.3.1- Documents de contrôle

Le tableau n° 33 regroupe les cinq UMR 4 septembre-17 décembre 1986 que l'on associe à la lecture de l'image n° 5. Il fait apparaître que la superficie totale des UMR n'excède pas 40,75% de la superficie de la scène entière. La partie variante complémentaire forme le reste (image n° 6). Les superficies par UMR sont très variables passant de 0,30% pour l'erg vif (C119) à 15,22% pour l'UMR sableuse C22.

Tableau n° 33

UNITES MAJEURES RELATIVES
entre le 4 septembre et le 17 décembre 1986
Superficies des UMR générées

LEGENDE de l'image 5	UNITES	4 SEPTEMBRE		17 DECEMBRE		UMR	
		UNITE	S*	UNITE	S*	UNITE	S*
C5	Erg vif	SC11	0,41	DC9	0,31	C119	0,30
C1	Sables	SC2	20,38	DC2	30,99	C22	15,22
C4	Glacis de piémont sableux	SC6	10,27	DC5	32,80	C65	7,94
C2	Glacis	SC3	18,49	DC1	18,76	C31	12,46
C3	Roches sombres	SC5	6,4	DC6	5,61	C56	4,83
	TOTAUX		55,95		88,47		40,75

* Superficie en pourcentage de la scène totale

D'autre part, lorsque l'on compare ces superficies aux unités stables de septembre et de décembre, on constate que le recouvrement est soit très partiel, ce qui est le cas des glacis sur piémont sableux, soit à l'inverse, très couvrant comme par exemple l'erg vif et les roches sombres.

Quatre des UMR ont pour principales caractéristiques celles résultant de l'interprétation des unités stables correspondantes en décembre. :

- C119 : erg vif, sables clairs très réfléchissants
- C22 : sables de dunes et d'arènes granitiques grossières
- C56 : roches sombres
- C31 : glacis sur sol brun

Pour l'UMR 65, il convient d'être plus nuancé. Il est indéniable que cette unité est caractérisée principalement comme étant un glacis de piémont sur sols bruns sub-arides vertiques associés aux sols bruns sub-arides modaux (Leprun JC., 1978). Mais cette UMR ne concerne pas seulement les piémonts, on la retrouve aussi à l'est des marigots des glacis centraux sur les versants. L'UMR 65 résulte de la conjugaison de plusieurs facteurs qui font l'originalité de cette unité. Le tableau n° 34 montre que l'indice de végétation de C65 passe de 138,5 à 128,3. En décembre, C65 a un indice de brillance équivalent à celui des glacis C31. Mais C31 lui, a un indice pratiquement constant d'une date à l'autre.

Tableau n° 34

IMAGE MULTIDATE
PARAMETRES DES UMR 4 SEPTEMBRE-17 DECEMBRE
COMPARAISON DES INDICES DE VEGETATION ET DE BRILLANCE*

UMR	INTERPRETATION	INDICE DE VEGETATION		INDICE DE BRILLANCE	
		4 SEPTEMBRE	17 DECEMBRE	4 SEPTEMBRE	17 DECEMBRE
C119	Erg vif	129,6	129,6	136,3	125,1
C22	Sables	133,2	131,	112,1	94,4
C65	Glacis de piemont sableux	138,5	128,3	98,9	86,
C31	Glacis	129,2	128,1	94,8	78,1
C56	Roches sombres	126,6	124,	80,5	61,1

* Moyenne des unités

Ces divers éléments nous amènent à conclure que C65 repose sur des sols bruns sub-arides vertiques et sub-arides modaux de couleur rouge. Avec un taux de couverture sableuse oscillant entre 30 et 40%, il se développe sur cette unité une phytomasse herbacée qui a pu atteindre début septembre 1986 0,96 tonne/Ms/ha. Ceci rejoint les conclusions de Devineau dans son étude phytoécologique. Cet auteur note aussi que C65 est composée d'un ensemble floristique particulier des sols à substrats argileux ou argilo-limoneux à recouvrement sableux plus ou moins important (Devineau, 1988). Celui d'un groupement à *Sida ovata*, groupe des espèces psammophiles bien représentées (*Limeum viscosum*, *Eragrostis pilosa*, etc...).

En comparaison, les sols bruns de l'unité C31 ont une phytomasse estimée entre 0,1 et 0,25 tonne/Ms/ha (Devineau, 1988). Deux effets conjugués expliquent cette situation: d'une part, la présence d'un recouvrement sableux d'origine éolienne comme nous l'avons déjà souligné, et d'autre part, la position topographique de l'unité. Elle se situe en aval de points de concentration des eaux pluviales et bénéficie du transit des eaux des massifs vers les cours d'eau (quand l'écoulement est diffus). Mais on peut aussi penser que l'unité C 65 est alimentée par drainage latéral en eaux infiltrées dans la zone en amont.

Des études réalisées sur ces massifs (Pion, 1979) montrent que les gabbros ne sont sains qu'en apparence. Les massifs sont constitués d'un manteau d'altérites très épaisses (plus de 9 m) qui peuvent jouer le rôle de château d'eau et redistribuer l'eau en différé. Pour les abords des cours d'eau ceci peut correspondre à la stagnation des eaux lors des orages très violents. L'évacuation des eaux est alors retardée sur des pentes faibles par saturation du chenal d'écoulement, ce qui permettrait l'infiltration sur ces zones.

3.3.2- Evolution des U.M.R

L'histogramme bi-dimensionnel de la figure n° 28 donne la position des UMR sur l'indice de végétation et de brillance lorsque l'on passe d'une date à l'autre. Comme cela a déjà été signalé, il ne faut pas accorder trop d'importance à l'indice de brillance qui n'est pas relatif. Par contre, l'évolution de la position des UMR sur l'indice de végétation est révélateur. En septembre, les UMR se placent sensiblement sur une seule ligne à l'exception de C65 et dans une moindre mesure de C22. Les unités sont classées par décroissance des plus claires C119 aux plus sombres C56. En décembre, le phénomène s'accroît et tous les points s'alignent. Figurent aussi sur cet histogramme les centres de gravité des scènes étudiées.

Pour formuler une idée quelconque sur l'évolution dynamique des UMR, il est nécessaire de bien situer le contexte temporel et les conditions climatiques et bioclimatiques présentes aux deux dates. Fin septembre 1986, il a très peu plu sur les régions dunaires au nord de la mare (chapitre VI). La réponse radiométrique de cette zone est le reflet de ce phénomène. La pluviométrie aurait été régulière, il est pratiquement sûr que la réponse spectrale aurait été différente aux deux dates et aurait induit une autre partition de l'image. Donc, si l'on dit que l'évolution dynamique est réduite sur cette UMR, cette affirmation concerne uniquement telle zone entre telles dates. La constatation générale que l'on peut formuler est que l'évolution dynamique des UMR est faible dans la période considérée à l'exception de C65.

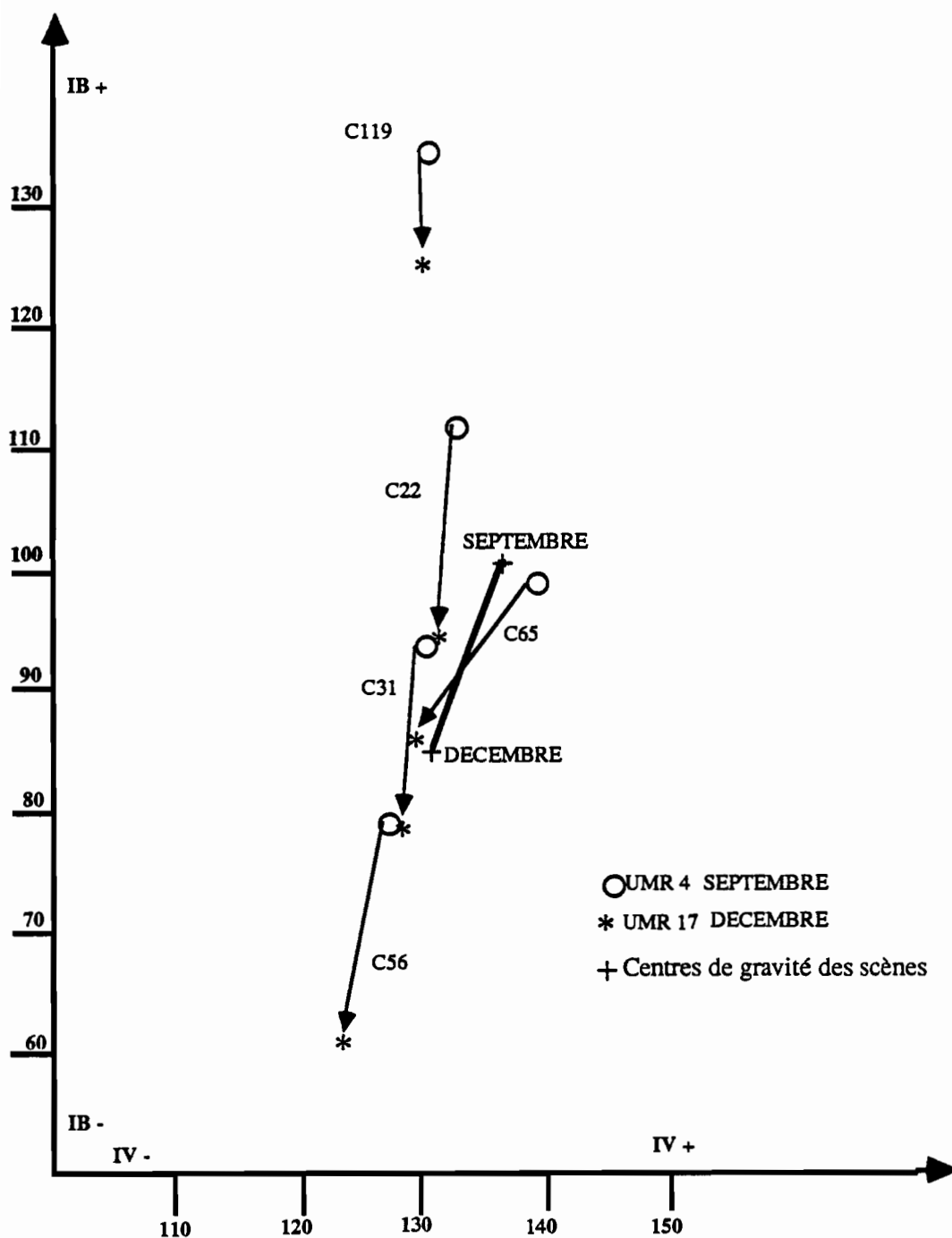
4- DYNAMIQUE DES UNITÉS VARIANTES

4.1- Elaboration des documents interprétatifs

L'étude de l'image n°6 confrontée aux deux compositions colorées (images n° 1 et 2) montre que les UV peuvent être regroupées en trois sections :

- UV se concentrant dans les talwegs et ayant souvent des formes compactes, linéaires lorsqu'elles soulignent les marigots, aréolaires dans les dépressions, la zone de confluence des marigots, et les mares elles-mêmes.
- UV se localisant dans les régions sableuses dunaires, les placages éoliens des glaciis et les arènes granitiques fraîches. Beaucoup de ces UV ont des superficies importantes et sont compactes.
- UV des glaciis sur sol brun ou des glaciis arénacés. Ici, les unités ont tendance à la fragmentation et à la dispersion. Quand elles s'organisent c'est souvent sous forme de lambeaux déchiquetés et orientés dans le sens de la plus grande pente.

Il existe 34 unités variantes. Pour déterminer l'évolution dynamique et la signification des 34 unités variantes inventoriées il est nécessaire de se baser sur les U.M.R. Une simple réorganisation du tableau n° 31 permet d'établir le tableau n° 35 où les unités radiométriques stables de septembre et de décembre sont classées selon les valeurs croissantes de leur indice de végétation.



**CENTRES DE GRAVITE DES UMR
ZONE DU BASSIN D'OURSI**

IMAGE MULTIDATES 4 SEPTEMBRE-17 DECEMBRE 1986

IB indice de brillance
IV indice de végétation

Figure n°28

Tableau n° 35

UNITES MULTIDATES: 4 SEPTEMBRE-17 DECEMBRE 1986
CLASSEMENT D'APRES L'INDICE DE VEGETATION

Images HRV-SPOT

UNITE C10 INDICE 157,1			105	102 1,22	0,25	108		104	1010 0,59	0,44
C4 146,8		41 0,32		45 2,58			48 0,81			
C9 146,3		91 0,48		95 0,53			98 0,93	93 0,24	94 0,81	910 0,10
C7 139,7				75 1,34	72 7,62	77 1,15				
C6 138,5		61 0,45		●65 7,94	62 1,37		68 0,46			
C1 136,1		11 2,81		15 1,08			18 0,41			
C2 133,2				25 1,25	●22 15,22	27 3,84				
C8 131	86 0,20	81 0,99		85 11,33	82 6,28					
C11 130,4			●119 0,90			117 0,11				
C3 129,9	36 0,38	●31 12,46		35 5,51	32 0,18					
C5 127,3	●56 4,83	51 1,17								
4 septembre 17 décembre	C6 124,4	C1 128,4	C9 129,6	C5 131,0	C2 131,3	C7 132,2	C8 136,9	C3 138,1	C4 156,9	C10 172,7

* en pourcentage de l'image total ; Les U.M.R sont signalés en gras.

● signale les U.M.R

Les quatre unités UMR C56, 31, 119, 22 s'ajustent sur la bissectrice du tableau. Les trois premières n'ont pas de végétation ou très peu et C22 possède une biomasse sèche importante le 4 septembre. C65 se trouve excentrée vers le haut et à gauche du tableau. Cette position exprime le fait que C65 n'a de la végétation active qu'en septembre seulement. Ce qui n'est pas le cas du groupe d'UV situées en haut à droite. Elles témoignent de la persistance d'une végétation active aux deux dates. Par déduction logique, on peut supposer qu'il s'agit d'UV se localisant dans les dépressions encore humides dont les mares.

Sur ce tableau, aucune UMR n'en recoupe une autre, que ce soit horizontalement ou verticalement. Par contre, un certain nombre d'UV recoupe une ou deux UMR en lignes et colonnes. L'interprétation des UV passera par l'étude des liens existant entre une UMR et l'ensemble d'UV s'y rattachant. On utilise une fois encore les matrices de distances en notant la force du lien entre UMR et UV. Les tableaux n° 36 a à e, indiquent les liens établis pour chaque UMR.

LIAISONS AVEC L'UMR 65

Tableau n° 36 a

Images SPOT-HRV

Unités	liaisons	SUPERFICIE*	
		%	km2
C15	5	1,08	7,13
C25	5	1,25	8,26
C35	4	5,51	36,40
C45	2	2,58	17,04
C75	4	1,34	8,85
C85	3	11,33	74,85
C95	4	0,53	3,50
C105	4	1,22	8,05
C61	21	0,45	2,97
C62	6	1,37	9,05
C68	4	0,46	3,04

* Par rapport à la superficie totale

LIAISONS AVEC L'UMR 22

Tableau n° 36 b

Images SPOT-HRV

Unités	liaisons	SUPERFICIE*	
		%	km2
C32	8	0,18	1,19
C62	5	1,37	9,05
C72	3	7,62	50,34
C82	4	6,28	41,49
C102	6	0,25	1,65
C25	6	1,25	8,26
C27	10	3,84	25,37

* Par rapport à la superficie totale

LIAISONS AVEC L'UMR 31

Tableau n° 36 c

Images SPOT-HRV

Unités	liaisons	SUPERFICIE*	
		%	km2
C11	3	2,81	18,56
C41	4	0,32	2,11
C51	10	1,17	7,73
C61	3	0,45	2,97
C81	3	0,99	6,54
C91	5	0,48	3,17
C32	10	0,18	1,19
C35	7	5,51	36,40
C36	8	0,38	2,51

* Par rapport à la superficie totale

LIAISONS AVEC L'UMR 56

Tableau n° 36 d

Images SPOT-HRV

Unités	liaisons	SUPERFICIE*	
		%	km2
C36	11	0,38	2,51
C86	7	0,20	1,32
C51	10	1,17	7,73

** Par rapport à la superficie totale***LIAISONS AVEC L'UMR 119**

Tableau n° 36 e

Images SPOT-HRV

Unités	liaisons	SUPERFICIE*	
		%	km2
C117	12	0,11	7,73

** Par rapport à la superficie totale*

24 UV ont au moins un lien avec une UMR. Il reste donc 10 UV qui n'en possèdent pas. Il s'agit du groupe d'UV qui a une végétation active aux deux périodes (tableau n° 35). Aucune connexion n'est donc possible dans l'intervalle de temps considéré et ces UV demeurent indépendantes tant que les conditions bioclimatiques de ces unités ne changent pas. L'image n° 9 est l'image des Unités Relatives du Paysage obtenue par regroupement des unités multitudes. Les regroupement se font en fonction des distances entre unités et après avoir effectué un contrôle sur l'écran de visualisation. Sur cette image seules 17 U.R.P sont légendées pour des raisons techniques de réalisation. Les unités du centre de la mare ne sont pas indiquées ainsi que les U.M.R , C 56 "roches sombres", C119 "erg vif", parfaitement identifiables sur l'image. Des U.V de petite taille ne figurent pas dans la légende mais pourront elles aussi être identifiées sans problème.

Deux autres types de documents vont se révéler utiles à l'interprétation des UV :

- les signatures spectrales des UV qui sont établies par groupes de liaisons UMR. Les figures n° 28 a à c, indiquent quelles sont les signatures spectrales pour les quatre principaux groupes (UMR 22, 31, 65, 56).

-Les histogrammes bi-dimensionnels des groupes de liaisons vont aussi contribuer à l'interprétation des UV. Ils sont réalisés à partir des indices de végétation et de brillance et présentent la particularité d'indiquer simultanément les positions des UV aux deux dates (figures n° 29 a à d).

Ces graphes cumulent le double avantage de préciser à la fois l'évolution dynamique d'une unité observée mais aussi de noter l'intensité de sa dynamique. Remarquons que sur ces graphes, les UV ont tendance à se résorber quand on passe de la saison humide à la saison sèche. Les UV possédant le plus de végétation en septembre ont des axes de transfert moins inclinés que ceux des UV sans végétation active aux deux dates, qui eux, sont proches de la verticale.

4.2- Interprétation des unités variantes

On procède à l'interprétation en s'aidant des documents élaborés à l'étape précédente les unités apparaissant une par une sur un moniteur vidéo.

Chaque UMR va servir à expliquer les caractéristiques des U.V. s'y rattachant. Les éléments du diagnostic sont synthétisés par trois tableaux donnant l'interprétation de l'U.V chaque fois que cela est possible.

Trois UMR sont associées à cette interprétation (tableaux n° 37 a, b, c) :

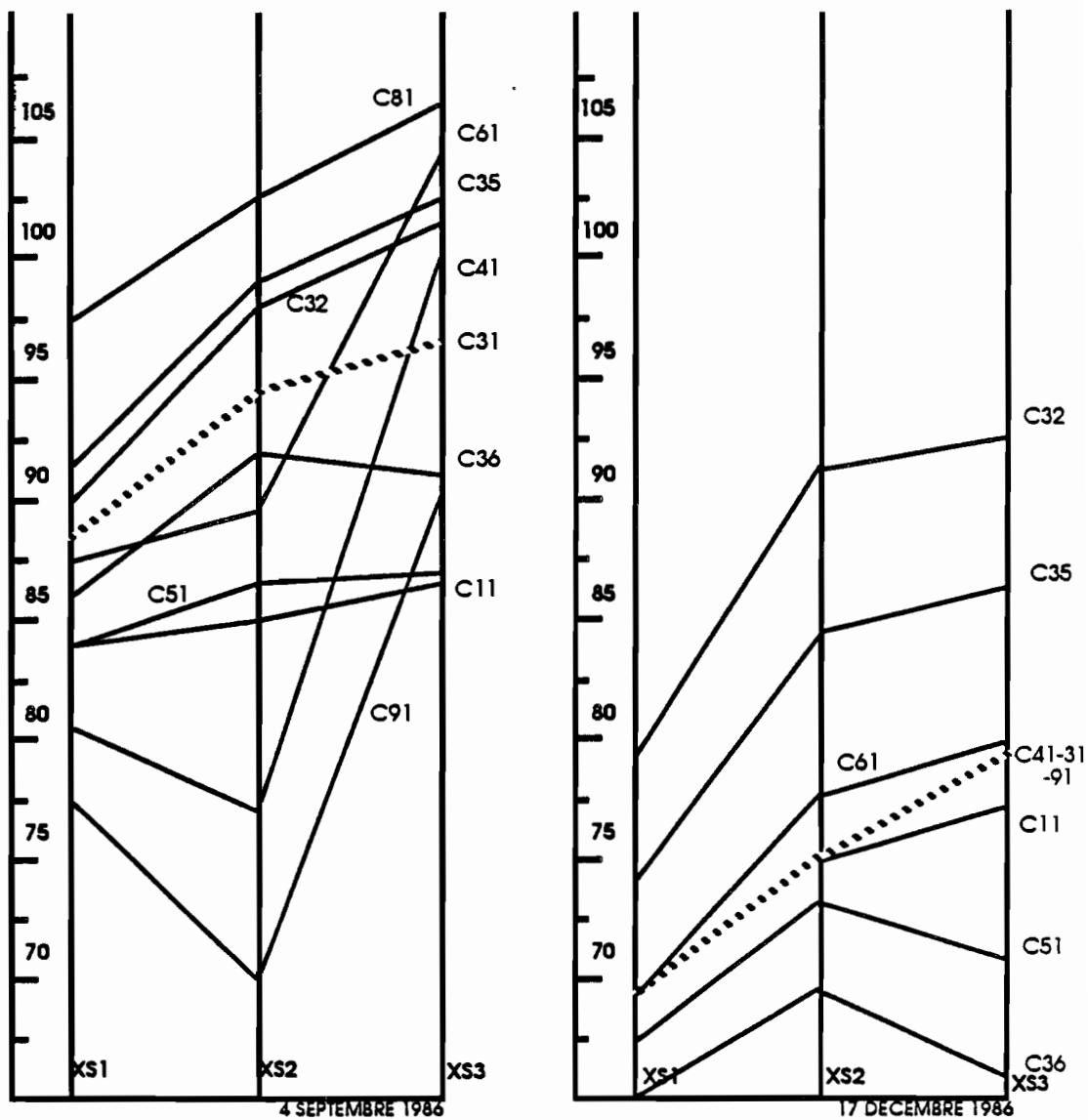
- UMR 31 (9 UV)
- UMR 22 (6 UV)
- UMR 65 (9 UV)

Les UMR C56 "roches sombres" et C119 "erg vif" ne sont pas prises en compte, les U.V associées étant bien identifiables à partir des trois UMR précédentes.

Tableau n° 37 a U.V rattachées à l'UMR 31 : glacis sur sol brun

* code IM	code U.V	* % de l'image	localisation	interprétation
H	C 51	1,17%	petites plages compactes sur les hauts glacis au sud et à l'ouest de la mare	Substrat sombre. Glacis à gravillons ferrugineux, altérites des roches métamorphiques sombres. Le transfert "classe des roches sombres" en septembre à "classe des glacis" en décembre, montre que les pixels composant cette unité se situent à la "frontière" entre les deux thèmes.
G	C 81	0,99%	souligne les marigots . développés sur l'unité C82	Interprétation délicate : on peut supposer qu'il s'agit d'une unité argileuse frangeant les marigots des arènes granitiques. Unité très dispersée.
A	C 11	2,81%	glacis entourant les massifs de gabbros.et le fond des marigots.	Forme des plages entre ces massifs et les têtes de marigots. Au sommet de ces massifs reposent des blocs de gabbros sur d'épais manteaux d'altération verticale des roches basiques. Il semble que ces plages soient des surfaces de transit des particules argileuses. Elles possèdent de la végétation active en septembre.
I	C 61	0,48%	glacis sur piémont sableux et aux abords de l'UMR 65.	La végétation est plus abondante et le recouvrement sableux en surface est probable. Unité transitoire entre l'UMR 31 et l'UMR 65.
O	C 91	0,48%	vertisols et parvertisols des talwegs et des pourtours . de mare	Cette unité est à regrouper avec C 92, 93, 94. Les différenciations entre ces unités résident uniquement dans la teneur en eau de ces sols en décembre.
F	C 41	0,32%	située dans des zones de talwegs plus basses donc plus humides	Similaire à la classe précédente
E	C 32	0,18%	Bien présent sur le versant sud de Tin Edjar.	Sables ferrugineux sombres en contrebas des cangas ferrugineuses.
E	C 36	0,38%	En petites plages compactes sur les glacis	néocuirasses sur glacis.

* IM: code légende de l'image n°9 ; % de l'image: superficie en pourcentage de l'image totale qui représente 660 km² . ;

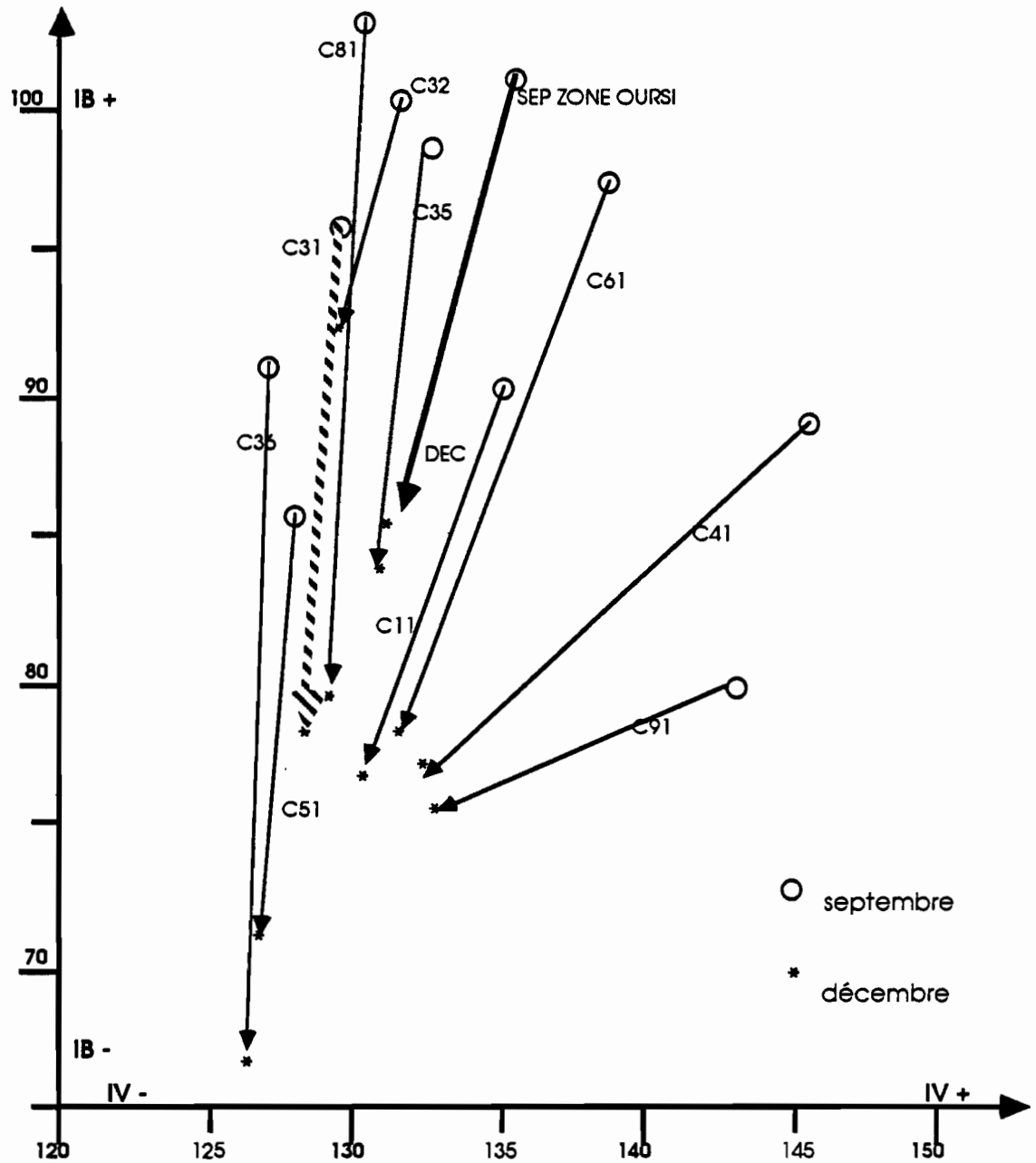


SIGNATURES SPECTRALES DES UNITES M ULTIDATES
 CLASSES LIEES A L'UMR 31 "GLACIS SUR SOLS BRUNS"

ZONE D'OURS

Image multitime 4 septembre-17 décembre

Figure n°28 a



DYNAMIQUE DES UV LIEES A L'UMR 31 "GLACIS"
ZONE DU BASSIN D'OURS

IMAGE MULTIDATE 4 SEPTEMBRE-17 DEC EMBRE 1986

IB indice de brillance
IV indice de végétation

Figure n° 29 a

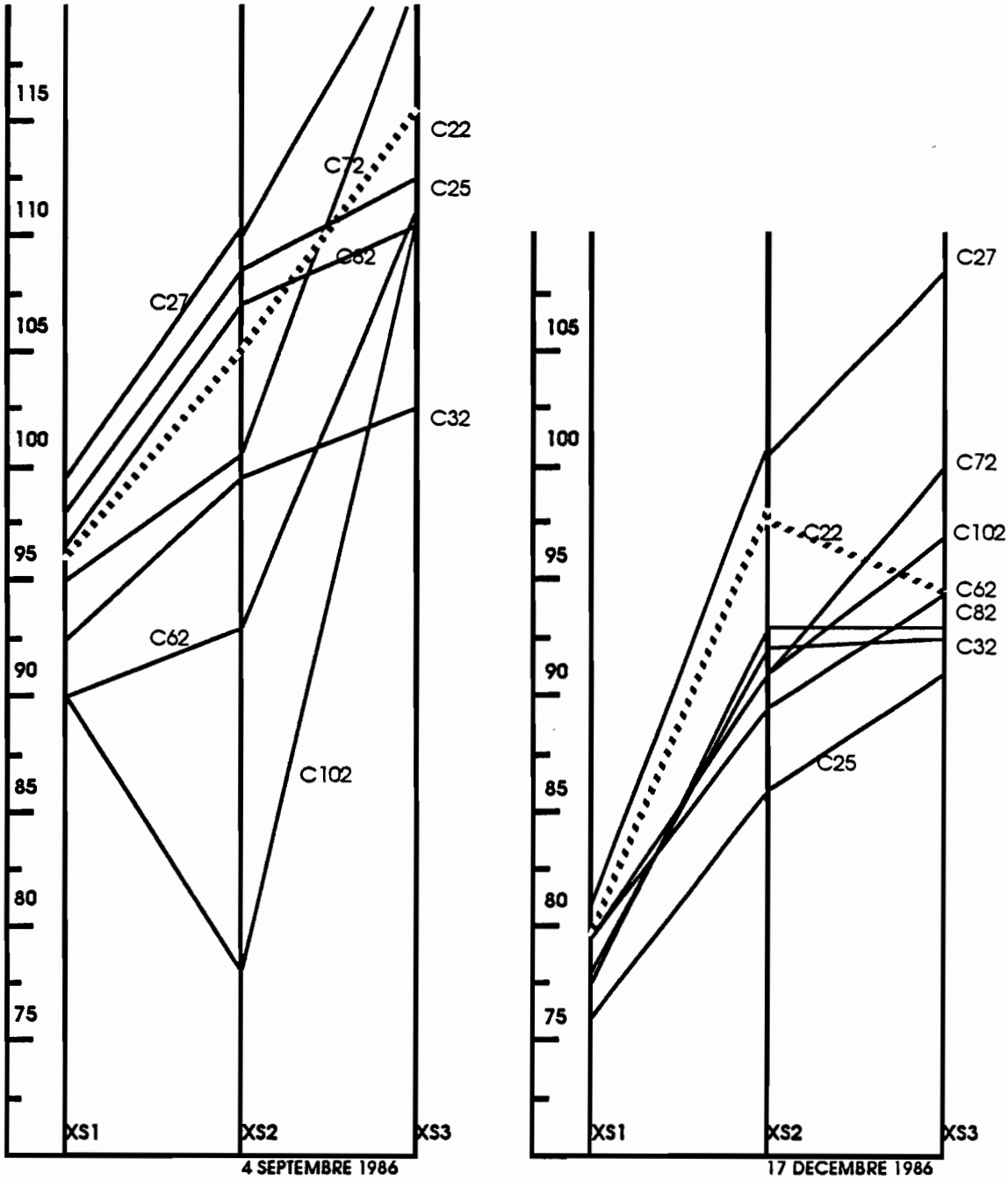
Tableau n° 37 b

U.V rattachées à l'UMR 22 : sables

* code IM	code U.V	* % de l'image	localisation	interprétation
P	C 82	6,28%	Glacis arénacés sans . végétation	Se développent indistinctement sur tous les types d'arènes. Possède une position particulière entre les arènes granitiques fraîches à l'amont (UMR 22) et l'UV 85 à l'aval.
K	C 72	7,62%	Est constituée à la fois de champs et de zones les . entourant	Les champs de mil font très souvent l'objet de plusieurs semis à des dates différentes, ce qui explique la présence des champs dans au moins deux unités. On peut aussi évoquer le fait que certaines parties seulement de champs sont sarclées au moment de la prise de vue. Cette unité indique plus sûrement des zones sableuses à granulométrie fine ayant des conditions édaphiques satisfaisantes. Elle préfigure quel aurait été le devenir de certaines parties du cordon dunaire à l'ouest de la mare si les précipitations avaient été régulières sur cette zone (revoir le chapitre VI). Le taux de biomasse est légèrement plus élevé que C62 en septembre et les sables qui composent l'unité plus clairs.
&	C 102	0,25%	Près de la mare dans certaines sections des marigots	Ce sont des zones d'accumulation sablo-argileuse à hydromorphie temporaire permettant le développement d'une végétation herbacée dense. Cette UV est asséchée en décembre. Il s'agit de champs de sorgho.
C	C 27	3,84%	Se localise sur les bords de l'erg vif, les sommets dunaires et sur le placage sableux près du petit Tin Edjar. Elle occupe aussi une vaste portion de l'erg récent au nord de Tin Edjar.	Est constituée de sables clairs très réfléchissants. Ne possède pas de végétation.
I	C 62	1,37%	Est présente dans les marigots et autour des champs .	Dans les secteurs de champs elle indique les friches
M	C 77	1,15%	Localisée à l'intérieur de l'UV 72 qui indique des secteurs potentiels de champs de mil	Il s'agit de champs de mil très bien identifiés qui sont cultivés sur des sables de l'erg ancien et sur les placages éoliens entre Petoy et Koel.

* IM: code légende de l'image n°9 ; % de l'image: superficie en pourcentage de l'image totale qui représente 660 km².

&: visible sur l'image n°9 mais ne figure pas dans la légende.

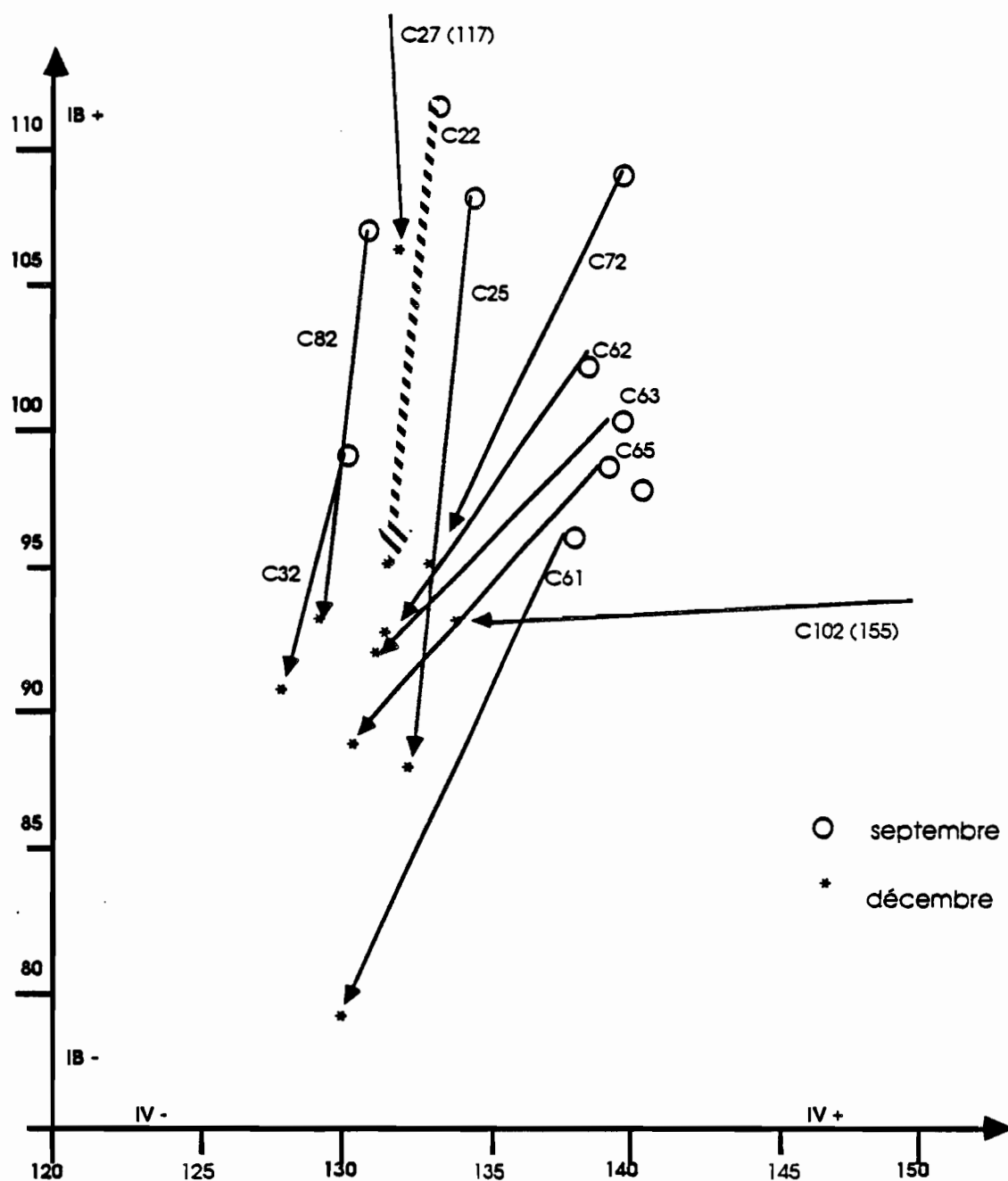


SIGNATURES SPECTRALES DES UNITES M ULTIDATES
CLASSES LIEES A L'UMR 22 "SABLES"

ZONE D'OURS

Image multitime 4 septembre-17 décembre

Figure n° 28 b



DYNAMIQUE DES UV LIEES A L'UMR 22 "SABLES"

ZONE DU BASSIN D'OURS

IMAGE MULTIDATE 4 SEPTEMBRE-17 DEC EMBRE 1986

IB indice de brillance

IV indice de végétation

Figure n° 29 b

Tableau n° 37 c

**U.V rattachées à l'UMR C 65 : Glacis sur sol brun
et sables éoliens avec végétation.**

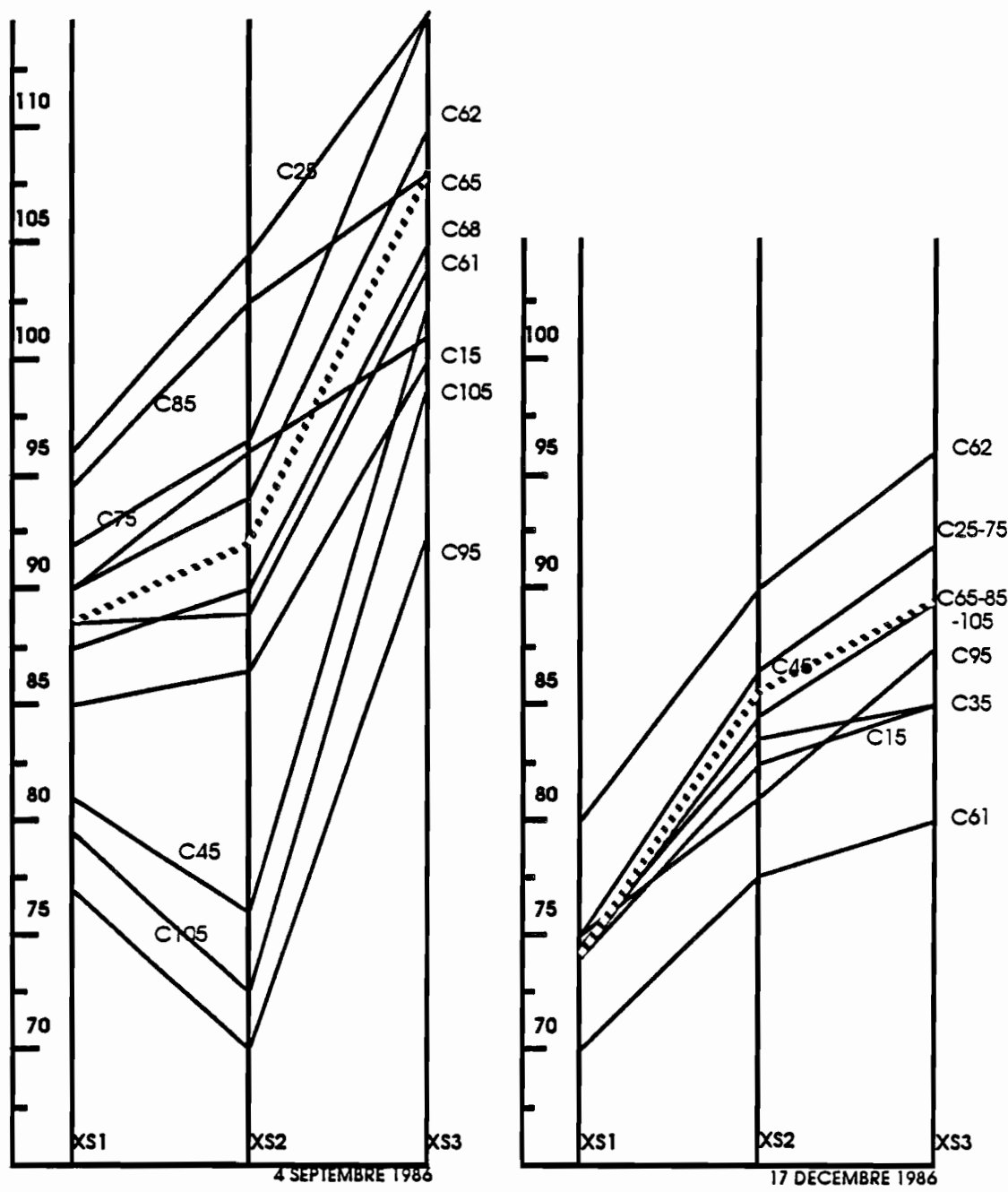
* code IM	code U.V	* % de l'image	localisation	interprétation
D	C 35	5,51%	Occupe une position intermédiaire entre les glacis sur sol brun (UMR 31) et les glacis arénacés (C 85,82).	Ce sont des zones dénudées que l'on rencontre fréquemment dans le cours supérieur des marigots à l'incision des glacis.
N	C 85	11,33%	Présente sur les glacis sous forme de grandes plages compactes.	Il s'agit de glacis arénacés qui s'intercalent entre les glacis UMR 31 à l'aval et l'UV 82 à l'amont. L'ordre s'inverse sur le versant sud du Tin Edjar et sur les glacis autonomes des Outardes, de Polaka et de Taïma.
\$ (22)	C 25	1,25%	Transitoire entre l'UMR 22 et l'UV 27 sur les secteurs dunaires.	Unité sableuse dunaire avec peu de végétation et à substrat clair. Pas de signification précise.
L	C 75	1,34%	Secteur de friches dunaires.	Indice de végétation élevé en septembre. Réfléchi comme des sables sombres en décembre probablement du fait de la présence d'une couverture graminéenne épaisse à cette époque.
O	C 95	0,53%	Unité située dans la zone de convergence des marigots.	Végétation active en septembre. Même sol que C 91.
F	C 45	2,58%	Cette unité borde les marigots au contact de l'UMR 65. Elle apparaît aussi entre les chenaux dans la zone de confluence des marigots en provenance du massif de Koel.	Unité très liée aux autres unités générées par l'unité stable C4 de septembre. Activité chlorophyllienne forte le 4 septembre avec une densité élevée de ligneux. Elle s'assèche en décembre et a une signature spectrale similaire à l'UMR 65. Substrat composé de sols bruns sub-arides vertiques qui se distinguent des vertisols du fond des marigots et de la zone principale de confluence des marigots provenant de l'Ouest du bassin (UV 91 à 910).
&	C 105	1,22%	Située dans les bas-fonds de marigots sur les replats des versants.	Biomasse élevée début septembre. Il s'agit de champs de sorgho.
??	C 68	0,46%	Borde la mare, se situe aussi dans les marigots	Interprétation difficile. Elle possède des caractéristiques proches de l'UMR 65 mais. On peut supposer qu'elle indique des zones de végétation sur sables de bas-fonds humides le 4 septembre et en voie d'assèchement le 17 décembre.

* IM: code légende de l'image n°9 ; % de l'image: superficie en pourcentage de l'image totale qui représente 660 km².

&: visible sur l'image n°9 mais ne figure pas dans la légende.

\$: regroupement avec l'U.M.R indiquée.

?: pas d'interprétation possible.

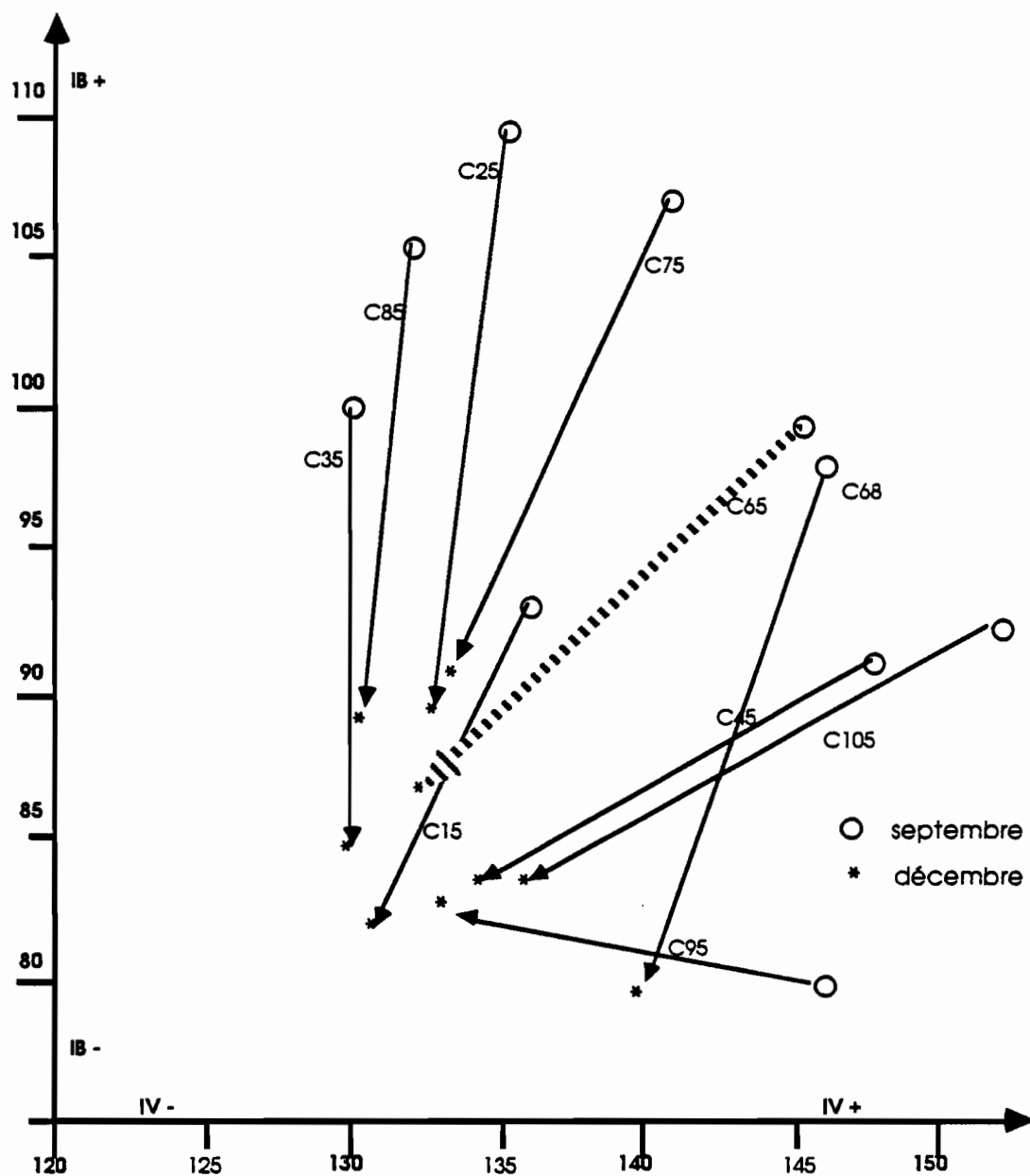


SIGNATURES SPECTRALES DES UNITES M ULTIDATES
CLASSES LIEES A L'UMR 65 "GLACIS ET VEGETATION"

ZONE D'OURS

Image multitemporelle 4 septembre-17 décembre 1986

Figure n° 28 c



DYNAMIQUE DES UV LIEES A L'UMR 22 "SABLES"
ZONE DU BASSIN D'OURS

IMAGE MULTIDATE 4 SEPTEMBRE-17 DEC EMBRE 1986

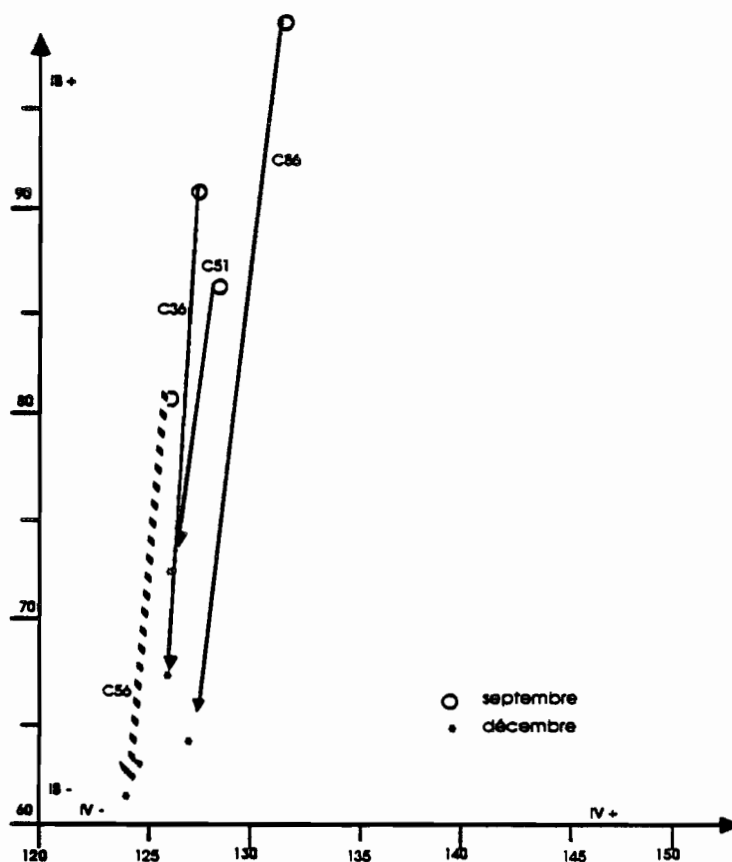
IB indice de brillance
IV indice de végétation

Figure n° 29 c

4.3- Les autres unités variantes

Toutes les autres unités variantes se situent dans les bas-fonds, marigots et mares. On peut déduire indirectement la signification de ces UV en fonction des liens qu'elles ont avec les UV déjà déterminées. Toutefois, l'interprétation demeure grossière, l'enquête au sol n'ayant pas porté sur ces zones. Beaucoup sont regroupées parce qu'elles sont indicatrices d'un même phénomène avec des degrés d'évolution différents. Il s'agit principalement du phénomène d'évaporation avec ses conséquences prévisibles : assèchement des sols, végétation - sénescence.

- Groupe des UV 52 à 55 et 57 à 510 (0,40%) : argiles de rebords de mares en eau en septembre et en voie d'assèchement le 17 décembre. Correspond bien aux zones d'abreuvement du bétail.
- C 98 (0,93%) : vertisols et paravertisols de la zone de confluence des marigots. Végétation ligneuse dense. Se regroupe avec les UV 91 à 910 à l'exclusion de C 94.
- C 94 (0,81%) : végétation herbacée dense de mare et eau dominante.
- C 110 (0,44%) : végétation dense de mare.
- C 104 (0,59%) : unité de transition entre C 94 et C 110.



DYNAMIQUE DES UV LIÉES A L'UMR 56 "ROCHES SOMBRES"
ZONE DU BASSIN D'OURS

IMAGE MULTIDATE 4 SEPTEMBRE-17 DECEMBRE 1986

IB indice de brillance
IV indice de végétation

Figure n° 28 d

5- DYNAMIQUE DES UNITES VARIANTES

5.1- Comment fonctionne l'analyse dynamique ?

Les UV ayant reçu une interprétation suffisamment précise représentent 48,58% de la scène étudiée avec les UMR, 89,33% de la scène est interprétée. Mais l'interprétation dynamique ne se résume pas à la simple énumération des propriétés des unités multitudes. Les documents élaborés aux étapes précédentes permettent la compréhension de certains processus dynamiques façonnant le paysage en joignant à ceux-ci une carte topographique au 1/50.000. Cette dernière indique le sens des processus hydrodynamiques et dans une certaine mesure l'intensité de ceux-ci. Il faut considérer l'image multitude comme une carte des potentialités dynamiques. L'analyse d'une unité est faite en rapport avec les unités localement proches spatialement. Les éléments pratiques pour établir un diagnostic du paysage à partir de cette analyse sont variables car c'est à ce niveau qu'interviennent les connaissances propres du thémacien.

Il est bon de rappeler que l'analyse multitude a porté sur des images prises en saisons contrastées. Les caractéristiques radiométriques sont le reflet des conditions climatiques et bioclimatiques agissant de manière différentielle sur les unités de paysage. D'autre part on note que l'hétérogénéité des pluies sur le bassin, dans leur répartition à la fois spatiale et quantitative, était grande au cours d'un même épisode pluvieux et d'une même période d'hivernage. Mais on remarque qu'à la suite de fortes précipitations, les conditions hydrodynamiques propres à chaque type d'état de surface sont sensiblement égales d'une année à l'autre, la lame d'eau non infiltrée empruntera toujours les mêmes parcours pour parvenir aux marigots. Dans ces conditions, on peut penser que la formation ou la destruction de certaines surfaces (processus intervenant sur des périodes pluri-annuelles) marquent l'unité de paysage concernée par des différenciations d'état de surface liées à l'intensité de leur action.

La détection de ces états de surface est obtenue par effet multitude du contraste saisonnier faisant ressortir les propriétés édaphiques ou hydriques des états de surfaces. Même si l'analyse dynamique sur une année montre les phases d'évolution du paysage en fonction des conditions climatiques et bio-climatiques propres à l'année en cours, elle met aussi en évidence des dynamiques multi-saisonnières.

5.2- Dynamique de la morphogénèse du bassin d'Oursi et de sa région dunaire.

On peut considérer comme distincts deux types de milieux :

- le bassin d'Oursi proprement dit, formé de collines et de glaciis.
- le milieu dunaire.

5.2.1- Evolution des glaciis.

L'évolution du bassin résulte au moins de trois types de dynamiques agissant sur des échelles de temps très différentes :

- Dynamique liée à la constitution des sols et des glaciis

Les glaciis sur sols bruns sont groupés au sein de l'UMR 31 sur l'image multitude. La comparaison de cette dernière avec la carte géologique au 1/200 000 de l'Oudalan montre à

l'évidence l'adéquation nette entre les matériaux parentaux et la formation des sols bruns. Ceux-ci reposent sur deux formations du Précambrien inférieur :

- granites calco-alcalins

La notice de la carte géologique (Delfour, 1970) indique qu'il s'agit de granites altérant facilement. Les secteurs d'arènes granitiques ne se repèrent, par photographies aériennes, que par la nature de l'état de surface composé de sable d'arènes. Le faciès représentatif à Oursi est formé de granite à biotite et hornblende $\gamma_{c,ba}$ à grains moyens ou gros, localisé dans toute la zone dépressionnaire occupée par le réseau hydrographique et s'étendant sur environ 70% de la superficie totale du bassin.

- Formation de Sikiday

Deux faciès issus de cette formation constituent le substrat des glacis sur sols bruns.

- Orthogneiss et migmatites à amphibole et biotite: $\zeta \vee (ab; M)$. Les roches sont formées soit sur migmatisation des roches volcaniques et sub-volcaniques de la formation de Sikiday, soit par la recristallisation en cours d'orogénèse d'anciens granites, granodiorites et diorites. La texture de ces roches est granoblastique et hétérogranulaire. Le type de substrat est présent sur les glacis de Djallafanka et sur une partie du versant sud du Tin-Edjar.

- Ortho-amphibolite. Ce faciès est issu des épanchements ophiolitiques de géosynclinaux élaborés durant la période anté-birrimienne. Les ortho-amphibolites apparaissent granitisées. Sur le bassin d'Oursi, il s'agit surtout de tufs métamorphiques intercalés dans des métagabbros et dolérites. Ce substrat arme les limites sud du bassin d'Oursi en une bande continue reliant Tounti à l'est à Gouba au sud-ouest. La formation des glacis sur ces sols bruns, ou tout au moins leur présence actuelle est en rapport avec le type de substrat et les sols qui se sont développés à partir de celui-ci.

Il est possible de faire la comparaison avec le bassin du Gountouré voisin. Les sols reposent sur des granites alcalins ou calco-alcalins du faciès ac à grain moyen à biotite. L'évolution de surface aboutit uniquement à des glacis arénacés. Il en est de même pour les arènes granitiques de la région de Déou à l'Ouest d'Oursi. Issues de granites alcalins à faciès granophyres, elles sont composées de sables grossiers de feldspath potassique. On remarque pour ces deux types de granites que la texture des sables arénitiques est grossière et qu'ils contiennent peu d'éléments calcitiques. Finalement la mise en place des sols bruns semble directement liée à la présence soit de granites calco-alcalins à texture fine à biotite et hornblende soit de faciès migmatisés à amphibole et biotite.

En synthétisant l'esquisse pédologique de Leprun et la carte géologique, on obtient le tableau n° 38. Celui-ci est révélateur d'un fait important : les granites calco-alcalins permettent uniquement le développement de sols isohumiques tandis que les faciès issus de la formation de Sikiday peuvent donner naissance à des sols fersiallitiques. Les sols isohumiques dans le contexte climatique des zones semi-arides tropicales ne représentent qu'un stade dans l'évolution vers des sols fersiallitiques.

Tableau n° 38

ZONE D'OURS		
SUBSTRATS ET SOLS CORRESPONDANT A		L'UMR 31 "GLACIS"
Image multitudes 4 septembre - 17 décembre 1986		
SUBSTRATS * GEOLOGIQUE	SOLS **	
	TYPES	FACIES
Granites calco-alcalin	Isohumiques à complexe saturé	Sols bruns subarides vertiques sur matériau argileux issu de granites
		Sols bruns subarides vertiques sur matériau argileux issu de roches basiques & de granites Association à sols bruns subarides modaux, hydromorphes et à sols gravillonnaires
Orthogneiss et migmatites à amphiboles et biotites	Fersiallitiques	Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à drainage interne limité en profondeur Association à sols gravillonnaires
Ortho-amphibolites	Isohumiques à complexe saturé	Sols bruns subarides vertiques sur matériau argileux issu de roches basiques & de granites Association à sols bruns subarides modaux, hydromorphes et à sols gravillonnaires

* d'après Delfour J et Jeambrun M1970

** d'après Leprun JC 1977

Un autre fait est à remarquer : Leprun distingue deux variantes des sols isohumiques :

- les sols bruns sub-arides vertiques qui se développent sur matériaux argileux d'altération de granites.
- les sols bruns sub-arides modaux, hydromorphes et localement à sols gravillonnaires développés sur roches basiques et granites associés.

Or, si l'on observe sur les cartes géologique et pédologique où se situe la deuxième variante des sols isohumiques, on constate qu'elle n'est présente qu'en contre-bas des roches à faciès migmatisés à amphibole et biotite. Ceci constitue un fait important pour la suite de notre analyse dans le point c.

La majorité des hydrologues de l'Orstom ayant travaillé à Oursi ainsi que deux géomorphologues de Paris VII s'accordent à penser que les sols des glacis de ces régions n'évoluent plus et sont de ce fait hérités (Joly, et al, 1980 ; Chevallier et al 1985). L'argument principal avancé est que ces glacis sont imperméables, l'eau ne pénétrant pas plus de 10 à 20 cm. Une controverse les oppose à G. Riou (1985) qui soutient que l'évolution de ces sols est actuelle pour peu que les conditions hydriques de recharge des sols en eau soient réalisées certaines années.

Cet auteur note que l'évolution peut être très rapide du fait de la température très élevée de ces sols. Certains éléments qu'il apporte pour étayer sa thèse sont troublants comme, par exemple, l'existence de profils de sols non tronqués sur les versants avec les horizons parallèles à la pente. Ou bien encore la recharge des sols qui peut être sans rapport avec la pluviométrie en début de saison des pluies ce qui induit l'existence d'un drainage latéral, mis en évidence par M. Sicot (1978) au moyen d'une sonde à neutrons.

Il n'est pas question de prendre ici un quelconque parti n'ayant pas pu nous rendre sur le terrain avec la classification des U.R.P. Elle aurait permis de vérifier certains secteurs des glacis qui semblent présenter des caractères d'états de surface induisant une pédogénèse. On demeurera prudent sur l'évolution pédologique de l'UMR 31. Il serait nécessaire qu'un pédologue étudie parfaitement ces types de glacis et aille plus loin qu'une simple esquisse. Remarquons tout de même que certaines unités de glacis peuvent très bien présenter des pédogénèses actuelles. Il s'agit de l'UMR 65 et de l'UV 11. Elles remplissent deux conditions qui peuvent les rendre aptes à l'évolution pédologique. Du point de vue géologique d'abord

puisqu'elles ont comme substrat des roches basiques ou des granites calco-alcalins mélangés à des produits d'altération vertique. Ensuite, par leur position topographique de bas de piémont des massifs de gabbros qui leur permet de recevoir par drainage interne l'eau nécessaire à leur évolution. Il ne faut pas oublier que ces massifs de gabbros sont constitués d'altérations vertiques de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur qui peuvent jouer le rôle d'impluvium.

- La dynamique du réseau hydrographique

Elle se manifeste surtout par le recul des têtes de cours d'eau sur les glacis. Le processus aboutit lorsque la portion d'un glacis ceinturée par deux marigots convergeant, finit par s'isoler et former un sous-bassin versant. G. Riou (Joly et al, 1980) parle de glacis autonomes par opposition aux glacis de piémonts et ceux d'interfluves. Il les définit de la manière suivante :

" ... (Les glacis autonomes sont des) Géosystèmes glacis isolés dans les mailles du réseau hydrographique. Le glacis se trouve enserré entre deux axes principaux - en V plus ou moins ouverts - et des "affluents" prenant naissance dans une zone de drainage incertaine. La forme est généralement obovale avec un centre de dispersion des eaux excentriques".

Sur la scène étudiée, trois sous-bassins répondent à ces critères. Il s'agit du bassin des Outardes, du bassin de Taïma et d'un petit bassin à l'est de celui de Djallafanka. D'autres présentent les signes d'une individualisation proche. Il est indéniable qu'avant la dissection des glacis reliant les massifs aux cours d'eau centraux, ceux-ci formaient une seule et même unité. Les mêmes conditions hydrodynamiques y prévalaient et la formation de ces glacis semble résulter d'un phénomène continu. Lorsque les glacis deviennent autonomes, les conditions hydrodynamiques sont modifiées. Si l'on observe les trois sous-bassins cités, on note qu'ils se situent tous sur des substrats granitiques calco-alcalins. Etant isolés, ils ne reçoivent plus les argiles en transit provenant des roches basiques de l'amont. De plus, l'évolution hydrique contribue à la destruction de l'ancien glacis, des sols sous-jacents et mettent à nu les arènes granitiques. Ce processus résulte uniquement de la dynamique générale de ce type de paysage et l'action anthropique même si elle existe est minime.

La séquence des unités multitudes sur le sous-bassin des Outardes est éloquentes quand à l'évolution des glacis autonomes:

- on note déjà la présence au sommet de la zone faîtière d'un glacis relique (UMR 31) surmonté d'une néocuirasse naissante stoppée dans son évolution (UV 36).
- puis, une zone aréolaire dissymétrique entoure le glacis. Il s'agit d'arènes glacées (UV 85) et probablement d'anciens sols. Les pentes douces, vers l'Ouest surtout, les préserve de leur disparition complète.
- en contrebas de cette zone se trouve un mélange d'arènes plus ou moins exhumées. Enfin, vers le nord près des marigots se trouvent quelques sols argileux très compacts avec de nombreux arbres morts. Il pourrait s'agir des colluvions issues de la destruction des anciens sols bruns qui forment ici un dépôt.

La rapidité de la progression des têtes de marigots sur les glacis n'est pas connue précisément. Mais il est difficile de nier l'importance de ce phénomène dans l'évolution générale des glacis.

- Les dynamiques conjuguées : pluviométrie déficitaire - surpâturage

Le surpâturage intense lié à la péjoration d'années pluviométriques déficitaires a abouti sur certains glacis de piémonts à l'ablation des formations superficielles composant ceux-ci. Mais ces destructions sont sélectives ou tout au moins différées dans le temps selon la nature des sols et des substrats sous-jacents. Ce phénomène est particulièrement visible sur le versant sud de Tin-Edjar. Il faut à nouveau examiner l'image multitude et la confronter aux cartes géologiques, pédologiques et à celle des contraintes naturelles. Sur l'image multitude n° 9 le versant sud peut être grossièrement divisé en quatre parties :

- la partie située la plus à l'ouest est formée d'un glacis reposant sur des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à drainage interne limité en profondeur, associés à des sols gravillonnaires. Le substrat est composé par des faciès de la formation de Sikiday (roches basiques). Cette unité est limitée au sud par un réseau de failles emprunté par le marigot central.

- la partie qui vient ensuite est formée par des arènes granitiques issues de granites calco-alcalins. Les sols sont des sols isohumiques (tableau n° 38). Le développement supérieur de ces arènes granitiques est limité très précisément par une faille correspondant à un changement de faciès de roches. Le substrat de cette partie est constitué de roches basiques et un glacis sur sols ferrugineux le recouvre..

- la troisième partie peut être scindée en deux sous-parties. La sous-partie supérieure porte un glacis surmonté de néocuirasses par endroits. Ici, encore, le substrat est formé de roches basiques et la limite inférieure de cette sous-partie correspond encore une fois à un changement de substrat. La sous-partie inférieure apparaît dominée par des glacis arénacés mélangés localement à des lambeaux de glacis sur sols isohumiques mais aussi d'arènes granitiques fraîches.

- la quatrième partie est formée à l'amont d'un mélange de sables éoliens et d'arènes granitiques. Les sables éoliens sont des sables ruisselés provenant d'un placage sableux situé près du petit Tin-Edjar. A l'aval, les arènes granitiques de granites calco-alcalin sont dominantes.

L'ablation des formations superficielles sur les glacis de piémonts semble affecter principalement les zones à substrat calco-alcalin possédant des sols isohumiques plus fragiles que ceux ferrugineux soumis pourtant aux mêmes conditions. Les observations de terrain faites en 1986 confirment cette hypothèse. Dans les parties deux, trois et quatre, les processus de destruction des sols sont très visibles et parfaitement identifiables. Il s'agit le plus souvent d'une érosion régressive due au ruissellement diffus qui commence à se concentrer dans la partie moyenne du versant en chenaux anastomosés. De ce fait, l'eau acquiert une certaine puissance érosive qui creuse les chenaux et en sape les berges. Sur les parois de ces berges, on distingue très bien les lambeaux d'un ancien glacis sur lequel transitent des sables grossiers mélangés parfois à des sables éoliens. Sous ces lambeaux apparaît un sol brun bien constitué (environ 30 cm) reposant sur des arènes grossières.

L'imputation au surpâturage du rôle "d'amorce" dans les phénomènes d'érosion par ruissellement semble confirmée par la présence de nombreux arbres morts. Les formations végétales reconnues par Devineau et Fournier, (1988) sont classées dans l'ensemble floristique à *Boerhavia repens*, *Schoenefeldia gracilis*, *Indigofera senegalensis* à groupement à *Pterocarpus lucens*, *Cienfuegosia digetata*, *Acacia laeta*, *Panicum laetum* etc...D'après Boudet, (1972) la destruction de ces formations serait due au phénomène du "sealing" mélange des effets conjugués du piétinement, de l'érosion éolienne et du ruissellement en nappe. Ceci ayant pour résultat à partir "d'un certain seuil de déboisement l'élimination spontanée de l'ensemble de la formation" (Barral, 1977). Sur les versants complètement "nettoyés" de glacis, il ne subsiste plus d'arbres vivants issus de l'ancien groupe floristique témoin des anciennes conditions du milieu. On note au contraire, l'apparition de quelques jeunes *Balanites aegyptiaca* qui sont peut être les signes d'une recolonisation de ces versants.

5.2.2- Evolution des dunes et des placages sableux

L'évolution des dunes est plus aisée à comprendre que celle des glacis. La mise en place de l'erg récent durant la dernière période sèche du Quaternaire se surimpose à l'erg ancien issu lui de l'avant-dernière phase désertique. Le retour à un climat tropical chaud et humide entre les deux épisodes secs a permis une pédogénèse des sables de l'ancien cordon dunaire lui donnant son aspect rubéfié caractéristique et une teneur en argiles et limons supérieure aux sables de l'erg récent. Ce dernier s'est constitué à partir du stock sableux des anciens cordons mais aussi de sables provenant des régions septentrionales plus arides.

En parcourant l'erg récent suivant un transect est-ouest, il n'est pas rare de noter dans certaines dépressions mais aussi sur des sommets de dunes émoussés, la présence de sables rubéfiés issus de l'ancien cordon. Les stocks sableux de l'erg récent sont donc hétérogènes. Ce fait est attesté par la composition de l'erg vif entraînant la succession de dunes rouges et de dunes claires. L'erg ancien possède des potentialités agronomiques supérieures à celles des sables de l'erg récent. Ceci est évidemment bien connu des populations locales, l'installation des champs de mil se faisant sur ce type de sable.

Sur l'image multidate, les champs de mil sur sables de l'ancien cordon sont représentés par l'UV 72 et l'UV 77 entre les mares d'Oursi et de Yomboli. Ces deux unités sont aussi localisées sur les placages sableux à l'amont du bassin du Gountouré. Les champs en friche sont identifiés par l'UMR 65 qui indique pour ces zones la présence d'une végétation dense durant l'hivernage. Si l'on compare la carte de la pluviométrie (figure n° 20) avec l'image multidate n° 9 on voit que les champs de mil bien identifiés donc présentant des conditions de développement satisfaisantes début septembre, se situent dans les zones sableuses non déficitaires.

En considérant maintenant le cordon dunaire à l'ouest de la mare on constate au nord de Tin-Edjar la présence de l'UV 27 identifiée comme étant composée de sables réfléchissants avec peu de végétation active. Entre cette UV et l'erg vif se trouve l'UMR 22. Il serait donc tentant de croire que les zones affectées par l'UV 27 possèdent des propriétés fortes de réflectance "normale" et passagère en fonction de la pluviométrie déficitaire de 1986. Un examen attentif de cette unité montre qu'elle se localise aussi sur les sommets des barkhanes dans la zone située entre Tin-Edjar et la zone d'Oursi. Elle frange aussi, en auréole, l'erg vif. D'autre part, l'examen des photographies aériennes d'Octobre 1981, de la simulation SPOT prise à la même date comparée aux scènes SPOT de 1986 (compositions colorées) montre qu'en fait les sables au nord de Tin-Edjar sont effectivement très réfléchissants, étant donné la nature claire de ces sables quelles que soient les conditions climatiques. Enfin, l'examen floristique réalisé sur ces zones par Devineau (1988) conclue à un faciès dégradé à *Eragrostis tremula* sur sables épais. Ces zones dégradées décrites et cartographiées par cet auteur correspondent à peu de choses près à l'UV 27 de l'image multidate. Il faut souligner que les méthodes d'approche du milieu employées par Devineau sont très différentes des nôtres.

Les raisons de cette dégradation sont, là aussi, à rechercher dans la conjugaison de plusieurs années pluviométriques déficitaires liées au surpâturage et au piétinement intense de cette partie du cordon dunaire. Il n'est pas inutile en effet de remarquer que l'UV 27 correspond à une zone où convergent les pistes de bétail en direction de la mare de Tin-Edjar. Il est probable que cette unité connaît actuellement les mêmes processus ayant abouti à la naissance de l'erg vig au nord d'Oursi. Celui-ci résulte principalement du piétinement du bétail au cours de ses déplacements pendulaires quotidiens entre les pâturages au nord de la mare et les points d'abreuvement de la mare.

- Conclusion

L'interprétation faite sur l'image multidate montre que cette dernière reflète bien les différentes unités du paysage que l'on trouve dans le bassin d'Oursi. Le fait que cette image ait été obtenue à partir d'images classées automatiquement est un élément nouveau important pour la cartographie des potentialités des terres sur de vastes territoires. Certains faits dynamiques du milieu comme la destruction ou l'élaboration des glaciis est bien mis en évidence ainsi que la détection des secteurs dunaires dégradés. Néanmoins on peut regretter de n'avoir pu effectuer un contrôle sur le terrain des unités multidates mal identifiées.

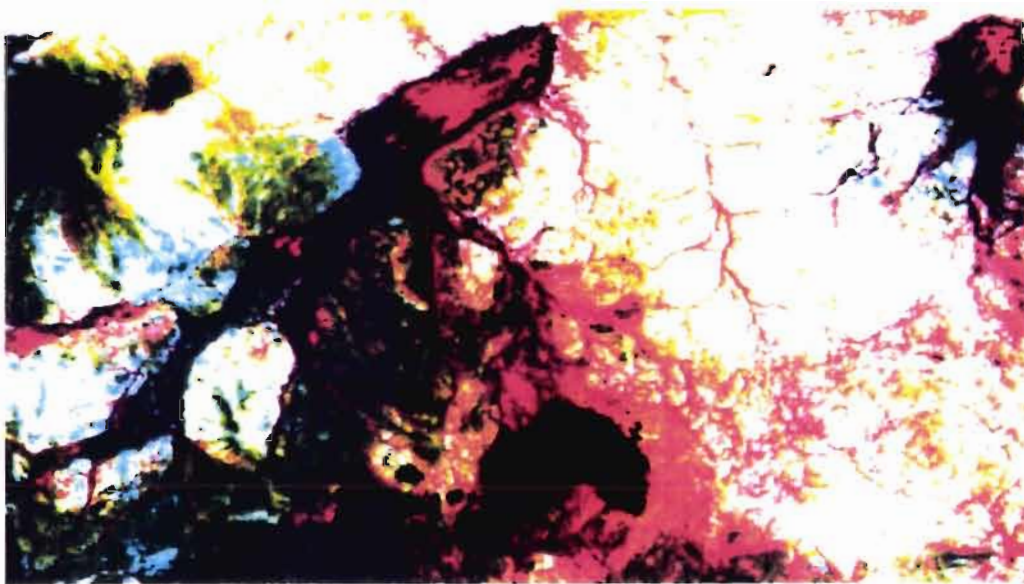


Image 1 : Composition colorée "4 septembre 1986"

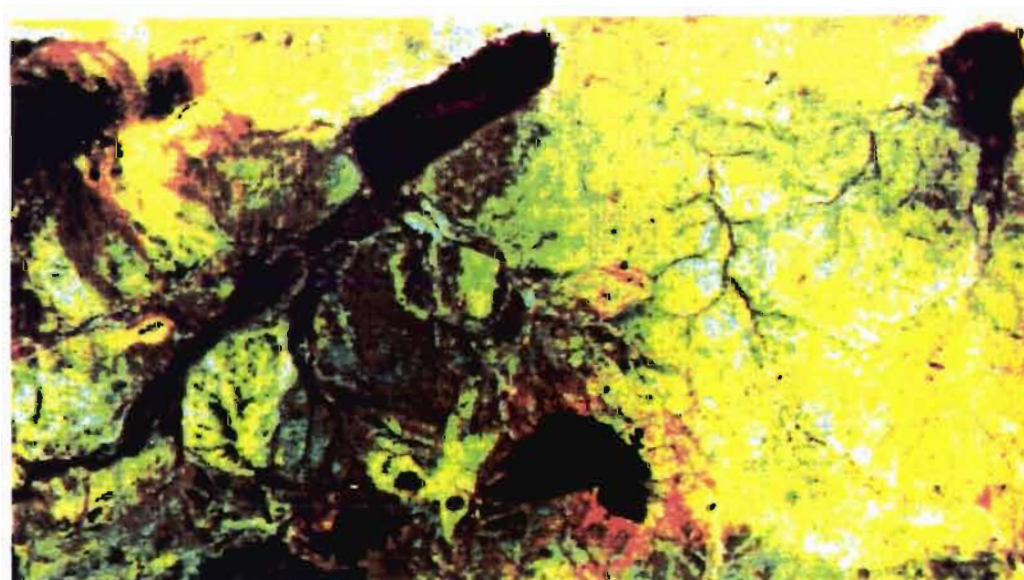


Image 2 : Composition Colorée "17 décembre 1986"

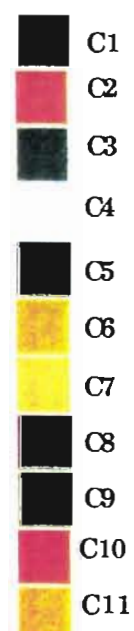
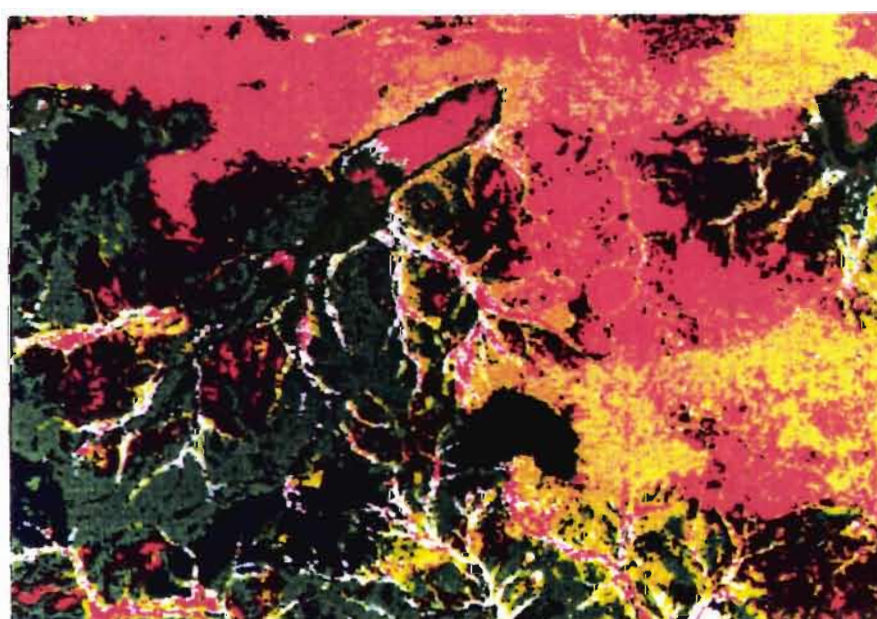
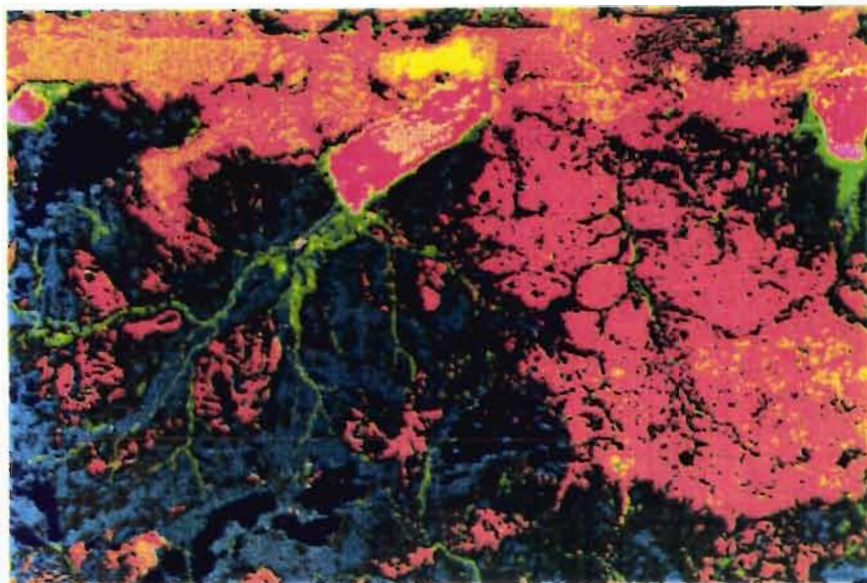


Image 3 : Classes stables radiométriquement "septembre 1986"



Légende



Image 4 - Classe stable radiométriquement "décembre 1986"



Légende



Image 5 - Unités Majeures Relatives (U.M.R.-septembre-décembre 1986-)

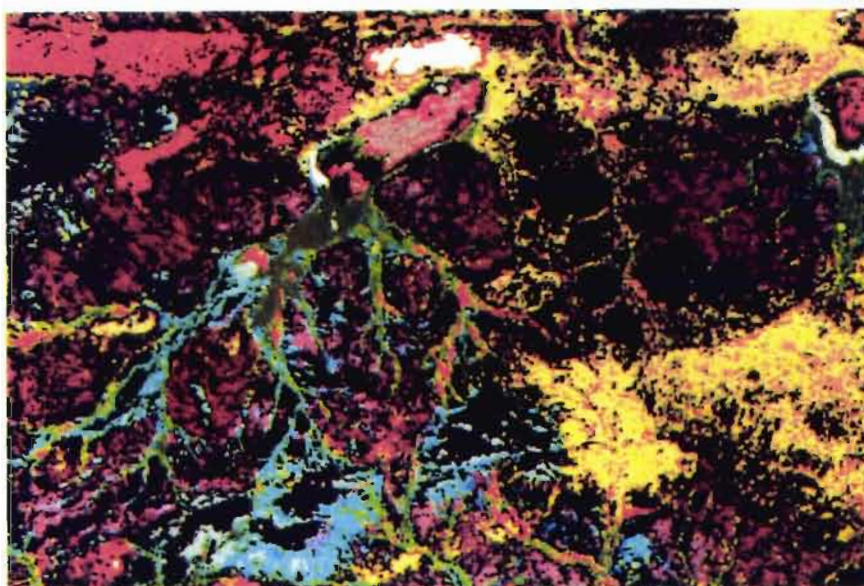
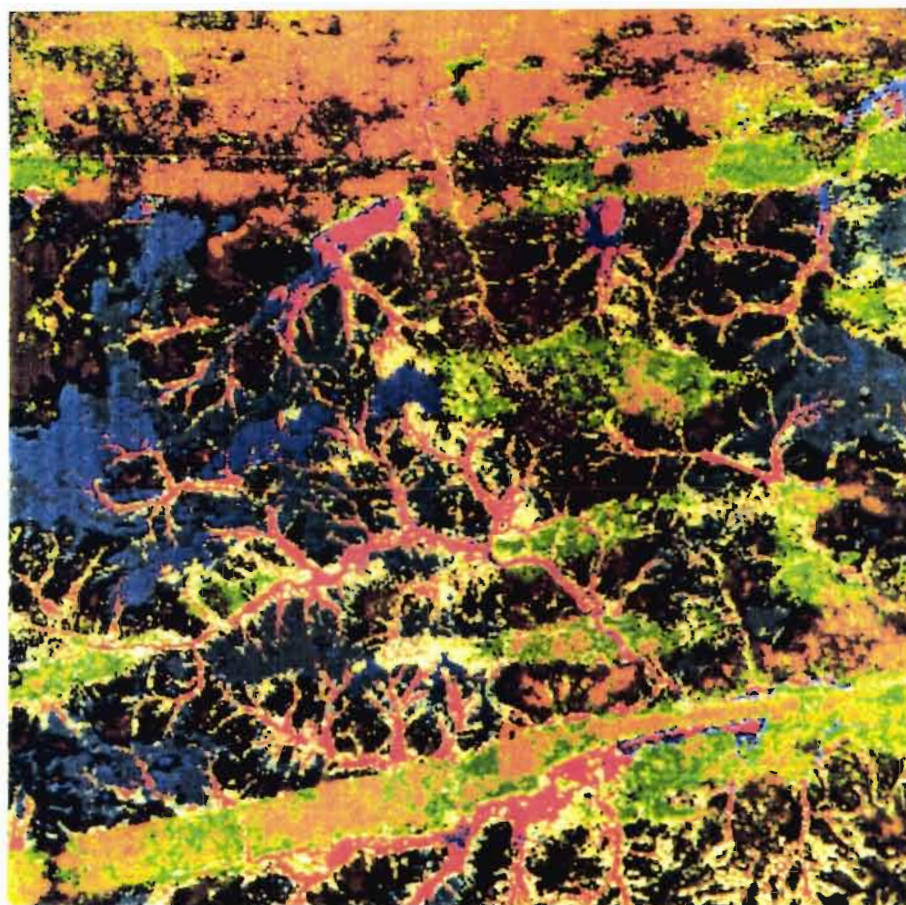


Image 6 - Unités Variantes (U.V. -septembre-décembre 1986-)



Légende

C1	
C2	
C3	
C4	
C5	
C6	
C7	
C8	

Image 10 - Classes Stables Radiométriquement
"U.S.R. septembre 1986" Scène entière



Légende

C1	
C2	
C3	
C4	
C5	
C6	
C7	
C8	
C9	
C10	
C11	
C12	

Image 11 - Classes Stables Radiométriquement
"U.S.R. décembre 1986" Scène entière

LEGENDES

Image n° 3

UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT CLASSIFICATION DE L'IMAGE DU 4 SEPTEMBRE 1986 BASSIN DE LA MARE D'OURSI

- SC1 : glaciis sur sols bruns à tendance vertique et végétation
- SC2 : sables clairs avec peu de végétation
- SC3 : glaciis dénudés sur sols bruns
- SC4 : végétation des marigots, transition entre SC9 et SC10
- SC5 : roches sombres, argiles de bas-fonds humides, eau libre
- SC6 : végétation sur sables foncés des piémonts et des dépressions
- SC7 : végétation sur sables clairs avec peu de végétation
- SC8 : sables foncés-glaciis arénacés
- SC9 : végétation dense de bas-fond, eau dominante
- SC10 : végétation dense du centre de la mare et des marigots
- SC11 : erg vif, sables très clairs

Image n° 4

UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT CLASSIFICATION DE L'IMAGE DU 17 DECEMBRE 1986 BASSIN DE LA MARE D'OURSI

- DC1 : glaciis dénudés sur sols bruns
- DC2 : sables dunaires avec tapis graminéen sec
et arènes granitiques grossières
- DC3 : zone de mare exondée récemment,
avec végétation chlorophyllienne
- DC4 : végétation aquatique active dense de mare, eau dominante
- DC5 : glaciis arénacés
- DC6 : roches sombres, eau libre
- DC7 : sables dénudés et champs récoltés
- DC8 : marigots, pourtour des mares et végétation arborée active
- DC9 : erg vif, sables très clairs
- DC10 : végétation herbacée active du centre des mares

Image n° 5 (page suivante)

UNITES MAJEURES RELATIVES ISSUES DU CROISEMENT DES DEUX IMAGES PRECEDENTES BASSIN DE LA MARE D'OURSI

- C1 : sables éolien, arènes granitiques
- C2 : glaciis sur sols bruns
- C3 : roches sombres
- C4 : glaciis de piémont sableux
- C5 : erg vif

LEGENDE

Image n° 9

**UNITES RELATIVES DU PAYSAGE ,
CLASSIFICATION MULTIDATE : 4 SEPTEMBRE-17 DECEMBRE 1986
BASSIN DE LA MARE D'OURS**

- **A** : surfaces de transit des particules argileuses. Possèdent de la végétation active en septembre.
- **B** : mélange argilo-limoneux en transit sur les hauts glacis et dans le fond des marigots.
- **C** : sables clairs réfléchissants. Peu de végétation herbacée. Faciès de dégradation
- **D** : glacis dénudés sur sols bruns.
- **E** : regroupe C32, sables ferrugineux sombres en contrebas des cangas et C36, néocuirasses sur glacis.
- **F** : formations arborées des talwegs reposant sur des sols argileux, vertisols et paravertisols.
- **G** : secteurs d'accumulation des particules argileuses en bordure des cours d'eau. Activité chlorophyllienne élevée en saison humide.
- **H** : glacis sur sols bruns. Secteurs de transit des gravillons ferrugineux et des débris de roches métamorphiques sombres.
- **I** : petites plages localisées sur les glacis de piémont sableux. Secteurs de champs de mil. Végétation dense en septembre.
- **J** : U.M.R 65. Piémonts sableux et plages sablo-limoneuses en bordure des cours d'eau. Végétation herbacée dense. Secteurs de friches au nord de la mare.
- **K** : secteurs potentiels de cultures du mil. Champs cultivés en 1986 et parcelles en friches.
- **L** : secteurs de friches dunaires.
- **M** : champs de mil bien identifiés.
- **N** : glacis arénacés.
- **O** : secteurs de convergence des marigots et des pourtours de mare. Vertisols et paravertisols. Végétation arborée dense.
- **P** : glacis arénacés dénudés en position intermédiaire entre C22 et C85. Secteurs d'accumulation des particules sablo-limoneuses.
- **Q** : erg vif.

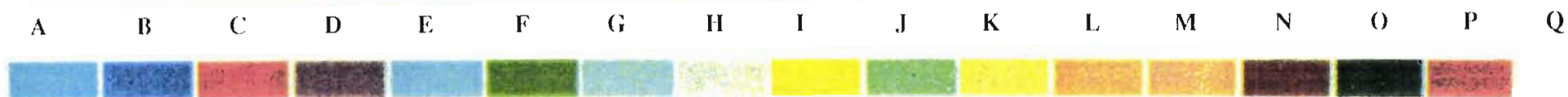
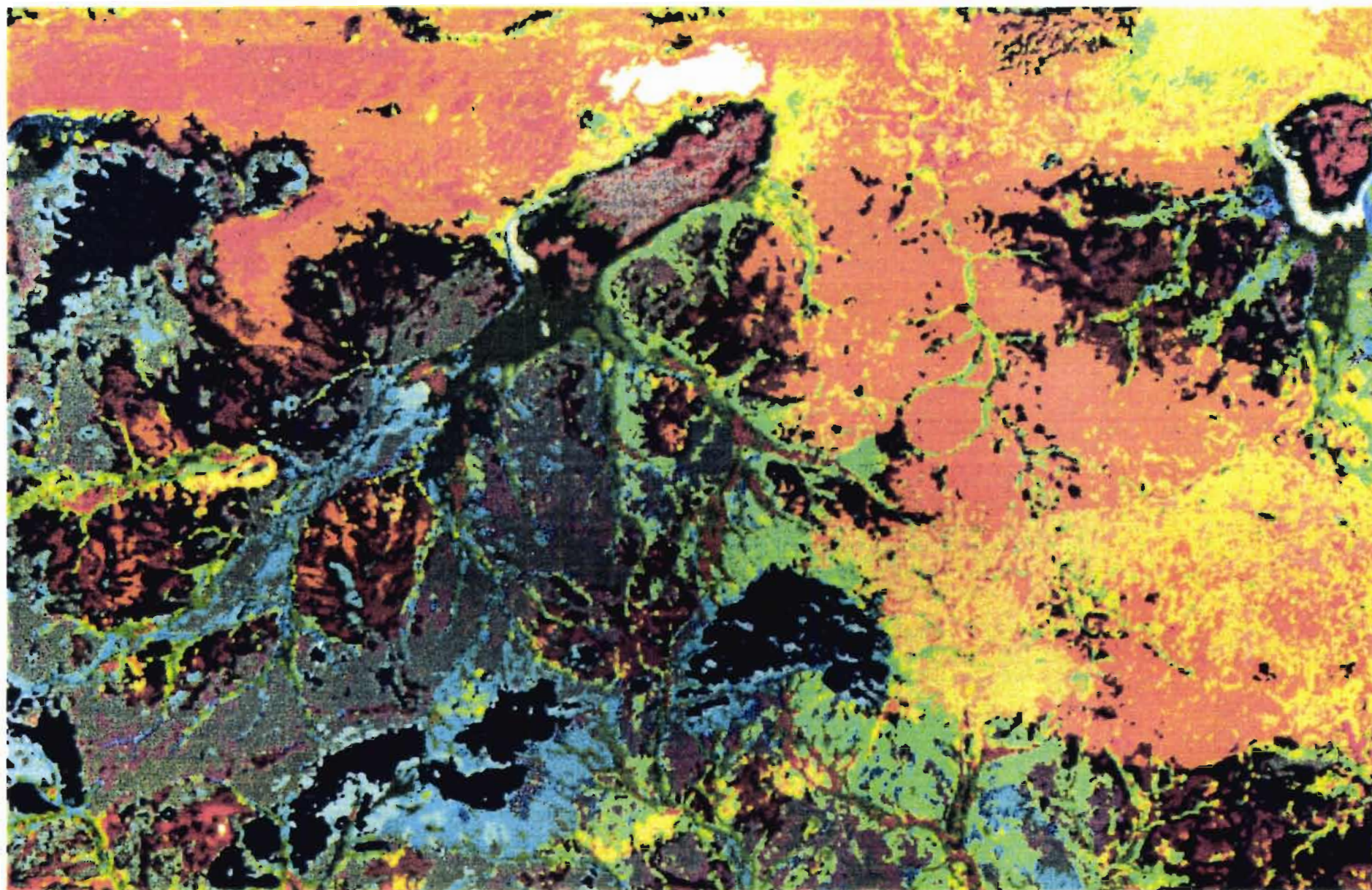


Image 9 - Unités Relatives du Paysage "U.R.P. septembre-décembre" Bassins Oursi-Gountouré

Troisième Partie

LES EMBOITEMENTS D'ÉCHELLES
Échelle spatiale et échelle spectrale

CHAPITRE X

EXTENSION A LA SCENE SPOT TOUTE ENTIERE

1- ECHELLE SPATIALE - ÉCHELLE SPECTRALE

L'emboîtement des échelles de perception des phénomènes naturels est un problème très complexe n'entrant pas dans les préoccupations de cette thèse, ce sujet pouvant facilement faire l'objet d'un mémoire à lui tout seul. A ce propos diverses équipes de chercheurs, notamment des météorologistes, tentent à l'aide de modèles mathématiques faisant appel aux propriétés fractales des phénomènes naturels d'établir les équations de transfert d'échelles entre observations météorologiques au sol et informations obtenues à d'autres échelles avec des moyens techniques différents en particulier à partir de données satellitaires de type NOAA et Météosat. On ne creusera donc pas le sujet. Cependant, il paraît nécessaire d'appréhender les mécanismes de transfert qui opèrent lorsque l'on travaille sur des fenêtres différentes d'une même scène. Ce chapitre montre comment a été réalisée par une méthode simple et "classique" l'extrapolation des informations obtenues sur le géosystème du bassin versant de la mare d'Oursi à un ensemble régional plus vaste.

L'extrapolation est faite en appliquant la démarche utilisée sur la zone test d'Oursi. La démarche étant non-supervisée ceci implique que l'on pose comme hypothèse de départ qu'il existe une étroite relation thématique entre les classes issues des deux cadres de travail. Relation qui devra évidemment être vérifiée dans la pratique. Dans le cas contraire une non-concordance thématique des classes sur des cadres images différents indiquera que l'utilisation des critères de stabilité tels qu'ils ont été définis dans la première partie doit être améliorée.

Joly (1976) définit l'échelle comme étant " Le rapport constant qui existe entre les distances linéaires mesurées sur la carte et les distances linéaires mesurées sur le terrain ". En cartographie opérer un changement d'échelle par réduction conduit à deux résultats :

- réduire les contours d'objets ou de groupes d'objets
- condenser les informations sous forme synthétique et intégrante.

Les contours d'objets constituent en eux-mêmes une information, mais d'un type très particulier. En effet, ils limitent et précisent un phénomène ou un groupe de phénomènes présents dans cette zone. Ceci est directement lié aux notions de structure et de texture. Les limites d'objets structurent spatialement une image, lui donnent le plus souvent un sens. Les informations hiérarchisées contenues sur cette image sont perçues par un ensemble de variables visuelles qui s'expriment à travers la texture. Un élément structurant à une échelle donnée peut très bien se décomposer en plusieurs éléments à une échelle plus grande. Les notions de structure et de texture sont liées à l'échelle d'approche d'un phénomène ou d'un groupe de phénomènes.

1.1- Structure de l'image - échelle spatiale

En cartographie classique c'est le thématique qui choisit à la fois l'échelle de restitution, la nature et la quantité d'informations devant figurer sur la carte définitive. Ces informations hiérarchisées sont fonction du thème abordé (végétation, géomorphologie, hydromorphie, etc...). Pour toute discipline les critères du choix des variables à représenter à une échelle de restitution donnée sont déterminés le plus souvent à partir d'un référentiel normatif. Celui-ci est établi autour d'un consensus raisonné ayant fait l'objet de recherches thématiques souvent poussées, et de débats au sein de chaque discipline.

Pour les informations d'origine satellitaire il en est autrement: le rapport maximum d'échelle de restitution est fixé en fonction du pouvoir de résolution spatiale des capteurs. L'information de base, le pixel, résulte déjà d'une intégration dépendante d'un grand nombre de paramètres (voir chapitre II). Il est admis que le degré de résolution de SPOT ou Thematic Mapper permet une restitution cartographique entre le 1 : 50.000 et le 1 : 25.000 alors que pour M.S.S. Landsat la limite se situe au 1 : 100.000. Savoir s'il existe une relation entre pouvoir de résolution et échelle de restitution correspondante reste un problème théorique si l'on considère le nombre d'informations contenues sur une image. On sait en effet qu'une image satellite recèle potentiellement un nombre important de strates d'informations.

Il faut alors admettre que la limite imposée pour la restitution d'une image est uniquement déterminée par l'information structurante d'une image dont le sens doit s'imposer d'emblée visuellement. Ceci dépend à la fois du degré de résolution, de la complexité de l'image restituée et aussi de la superficie de la scène analysée. Il est possible de se livrer à l'expérience suivante: soumettre une composition colorée, issue d'une image SPOT à des agrandissements différents. L'acquisition d'une image SPOT-HRV peut se faire sous forme de film au 1 : 400.000. A cette échelle tous les pixels sont présents sur l'image. Le tableau n° 1 donne la taille du document et du pixel en fonction de l'échelle.

Tableau n°1

**RAPPORT ECHELLE-DISTANCE DE LECTURE
D'UNE IMAGE SATELLITAIRE DE RESOLUTION SPOT**

ECHELLES	TAILLE* DU PIXEL	TAILLE** DU DOCUMENT	DISTANCE*** D'OBSERVATION
1: 400.000	5	15 x 15	0,40
1: 200.000	10	30 x 30	0,80
1: 100.000	20	60 x 60	1,60
1: 50.000	40	120 x 120	3,20
1: 25.000	80	240 x 240	6,40

* en microns; ** en cm; *** en m

Il est aisé de constater que la lecture des images demande un recul de plus en plus grand au fur et à mesure que l'échelle augmente. Ceci est nécessaire si l'on veut conserver l'ensemble du document dans notre champ visuel. Par exemple, au 1 : 50.000 le recul est d'environ 2 m. Au 1 : 25.000 il faut s'éloigner d'au moins 6 m. Il y a donc bien une échelle moyenne de lecture à respecter en fonction de la superficie de l'image et du degré de résolution. Cette simple opération prouve que la détermination de l'échelle spatiale de restitution d'une image satellitaire est liée en priorité à la notion de structure de l'image. L'échelle variera entre deux limites fixées à la fois par des facteurs techniques et par des limites de lisibilité du document.

1.2- Texture de l'image-échelle spectrale

Mais il ne suffit pas de reconnaître les limites entre unités du paysage. Encore faut-il savoir apprécier la nature de l'information restituée dans chaque unité. Le nombre de strates d'informations contenu dans une image satellitaire étant très élevé il est nécessaire de hiérarchiser l'information globale, ce qui constitue le second terme de la cartographie thématique: faire apparaître les informations nécessaires en fonction de la thématique et de l'échelle de restitution souhaitée puisque ces deux paramètres sont intimement liés.

Dans notre étude la méthode de recherche des unités radiométriques stables employée de façon pyramidale s'inscrit dans cet axe (Chapitre III). La recherche de sous-classes à l'intérieur d'une unité radiométrique s'accompagne obligatoirement d'un changement d'échelle spatiale si l'on veut pouvoir intégrer l'information fournie. Toutefois la limite de restitution dépend encore une fois de l'effet structurant de l'image telle que la perçoit un observateur. Une application de ce type sera présentée au chapitre suivant.

2- RÉGION D'ÉTUDE

L'extrapolation du modèle d'analyse du paysage porte sur une scène centrée sur l'Oudalan d'une superficie de 3350,6 km², soit un tiers de la superficie de cette province. Vers le nord-est, le bord de l'image atteint la mare de Bangao et la mare de Komé. Au nord-ouest elle englobe la mare de Dibissi et le village de Gargassa. Au sud-ouest, se situe In Tagaten non loin de Sikiré. Dans la partie sud-est, on trouve Gorom-Gorom préfecture de l'Oudalan (Images n° 8 et 9)

L'étude des compositions colorées à 1 : 200.000 montre que toute cette région présente une physionomie identique au bassin d'Oursi à l'exception des massifs rocheux plus abondants dans la région d'Oursi. Les éléments les plus remarquables de cette scène sont les cordons dunaires parallèles entre eux qui s'étirent selon une direction ouest-sud-ouest est-nord-est. Le plus imposant est celui de Sikiré au sud de Gorom-Gorom. Les mares permanentes ou semi-permanentes se situent pour la plupart sur le flanc sud de l'erg d'Oursi. Le long de celui de Sikiré un marigot draine les eaux vers l'est et sur certaines sections de celui-ci quelques petites mares se forment notamment à Tassamakat..

A part les bassins versants alimentant les mares de l'erg d'Oursi tous les autres ont une pente naturelle inclinée vers le sud sud-est et sont drainés par un réseau hydrographique très ramifié. Il converge à l'est de Gorom-Gorom et se dirige ensuite vers le nord-est pour rejoindre le cours du Béli à la hauteur de Yatakala. Il faut signaler aussi la présence de nuages sur la partie sud-ouest de l'image du 17 décembre 1986, ceci constitue une gêne pour les traitements ultérieurs.

2.1- Image du 4 septembre 1986 : scène entière

Les traitements effectués sur l'image entière sont rigoureusement les mêmes que sur la zone test d'Oursi. Un artefact barrant l'image au nord du cordon d'Oursi, on a exclu cette zone de l'échantillonnage.

C'est avec 8 classes que l'image est la plus stable soit trois de moins que pour Oursi à la même date (image n° 10). Le tableau n°2 et la figure n° 1 donnent la signification des classes interprétées à l'aide des indices de végétation et de brillance. La comparaison de ce tableau avec celui établi pour la zone d'Oursi montre que 7 classes sont identiques pour les deux cadres d'étude et la lecture des images correspondantes confirme ceci. Les unités issues de la classification de l'image entière en septembre sont désignées par l'abréviation TSC et celles de la zone d'Oursi par SC.

SC10	TSC2	végétation dense des mares et bas-fonds.
SC6	TSC5	sables de dunes des piémonts et le long des marigots.
SC7	TSC6	végétation sur sables éoliens.
SC2	TSC3	sables d'arènes granitiques et cordons anciens.
SC5	TSC1	roches sombres, argiles de bas-fonds humides et eau libre.
SC3	TSC8	glacis sur sols bruns.

La classe TSC7 est la seule classe n'ayant pas de correspondance directe. Elle regroupe en effet l'erg vif, les zones dégradées et des surfaces d'argiles glacées de brousses dégradées vers Zamarkoy au nord ouest de Ganadaouri. Certaines zones de champs de mil très localisées, par exemple entre les mares d'Oursi et Ganadaouri apparaissent aussi dans cette classe. Il s'agit de cultures n'ayant pas atteint un développement phénologique suffisant pour "marquer" les pixels à l'époque de la prise de vue. Le fait peut être imputé au déficit pluviométrique enregistré dans cette zone en juillet et août 1986 et surtout à la répartition irrégulière des pluies durant cette période. Les éléments de cette classe se répartissent en trois unités sur le cadre d'Oursi:

- SC11, erg vif pour les zones de sables totalement dénudés.
- SC2 pour les sables éoliens de l'erg récent dégradés.
- SC7 pour les champs de mil à végétation peu dense.

L'ambiguïté peut être facilement levée en segmentant cette unité à nouveau par procédure de classification pyramidale. Une telle application fera l'objet du chapitre suivant.

La lecture de l'image n° 10 se révèle intéressante à bien des égards. On note au nord du cordon d'Oursi l'importante extension de la classe TSC7 avec cependant des plages discontinues de la classe TSC3 signalant les arènes granitiques, les dunes des anciens cordons dunaires et la brousse tigrée. TSC7 indique donc des zones fortement dégradées dans cette région. Il convient toutefois de rester prudent dans l'interprétation de ce phénomène vu l'extrême variabilité des pluies interannuelles. Dans toute la région du centre-ouest et centre-est, comprise entre l'erg d'Oursi et celui de Sikiré, des glacis sur sols bruns apparaissent. Au centre un étroit couloir relie le bassin du Gountouré au nord à Tasamakat au sud. Il est constitué de sables d'arènes et de glacis arénacés barrés par trois placages de sables amorphes d'orientation est-ouest. La vérification de cette image avec la carte géologique de l'Oudalan au 1 : 200.000 laisse apparaître une grande concordance entre les substrats en place et la classification obtenue. Cela tend à confirmer l'hypothèse émise lors de l'analyse multitemporelle sur le bassin d'Oursi.

- Les glacis sur sols bruns se localisent sur ou en aval des roches du Précambrien inférieur de la formation de Sikiday, des granites calco-alcalins à biotite et amphibole et aussi près des massifs de gabbros.

- Les glacis arénacés se situent de préférence sur les roches granitiques d'âge indéterminé alcalins ou calco-alcalins. C'est le cas pour la région de Déou à l'ouest et du Gountouré au centre.
- Les sols bruns vertiques constituent un intergrade entre sols bruns modaux et vertisols. C'est le facteur topographique et le matériau d'altération qui induit cette différenciation. Lorsqu'une station possède un mauvais drainage, les sols bruns vertiques évoluent vers les vertisols. C'est le cas, par exemple, des parties aval de glacis se raccordant aux talwegs sur le bassin d'Oursi.
- Les cultures de mil ayant un développement satisfaisant fin août sont regroupées dans les classes TSC6 et TSC5. La délimitation des zones de champs est précise. On les localise en particulier sur les placages amorphes, les cordons dunaires anciens, certaines parties des ergs récents, sur les piémonts d'arènes granitiques et les dunes éoliennes de piémonts.
- Les champs de sorgho sont contenus dans la classe TSC2 "végétation dense de mare et bas-fond. L'agriculture n'est donc propice que dans quatre classes si l'on compte la classe TSC7 qui contient une sous classe "champs".

Le tableau n° 3 donne la superficie de chaque unité. Ce tableau permet d'évaluer l'extension des différentes unités thématiques au 4 septembre 1986: la région est dominée par les sables d'arènes granitiques (40,3%), les sables éoliens (23%) et les glacis sur sols bruns (15,5%) (figure n° 2). La comparaison est impossible avec le tableau correspondant sur la zone d'Oursi. En effet si l'on retrouve sur le bassin d'Oursi tous les types d'unités du paysage, les proportions ne sont pas les mêmes.

INTERPRETATION DES UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT
à l'aide des indices de végétation et de brillance

Tableau n° 2

scène entière - Classification: image 4 septembre 1986

<u>unités</u>	<u>signification thématique des unités</u>	IV* (1)	IB* (1)
TSC2	Végétation de mare et bas-fonds	152,3	88,6
TSC7	Sables dénudés ou très peu couverts, très réfléchissants	133,6	121
TSC6	végétation sur sables: erg récent et placages zones de champs de mils	142,0	111,0
TSC5	Dunes de piémont sableux avec végétation, végétation du bord des marigots	142,5	99,0
TSC3	Arènes granitiques et vieilles dunes	132,0	111,9
TSC4	Glacis arénacés	132,1	103,7
TSC1	Roches sombres, argiles des bas-fonds	130,9	80,8
TSC8	Glacis sur sols bruns	131,3	94,8

* IV: indice de végétation , IB: indice de brillance , 1; moyenne des unités

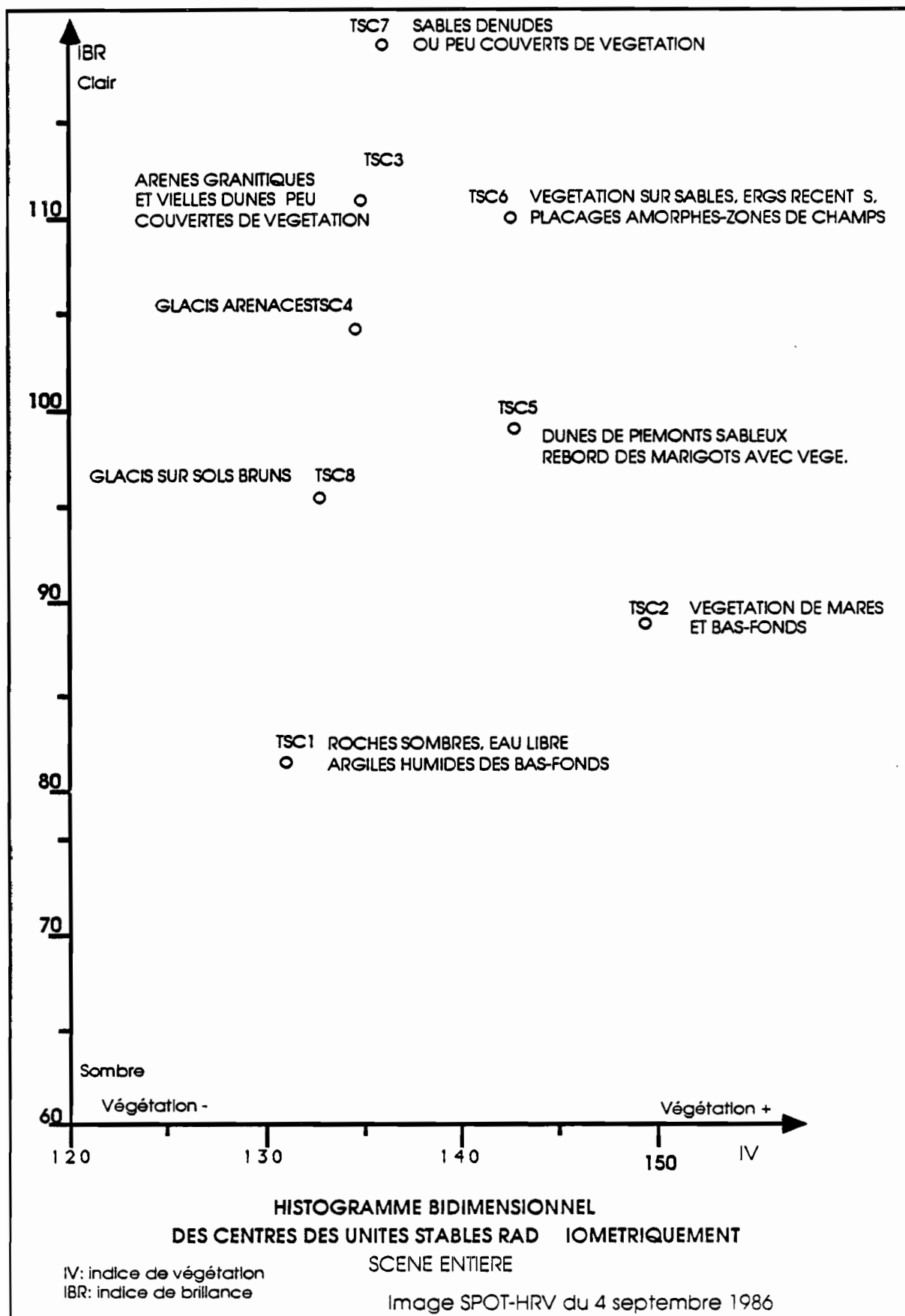


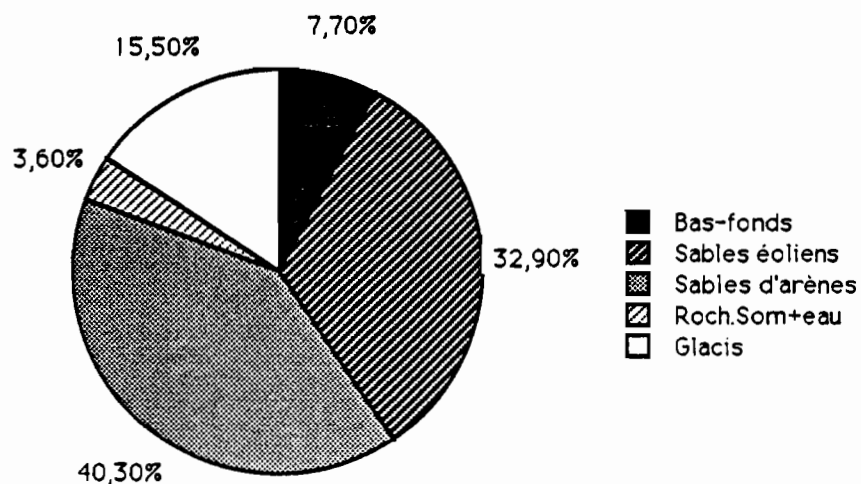
Figure n° 1

**STATISTIQUES DES UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT
SUPERFICIES DES GROUPES ET UNITES**

Tableau n° 3

scène entière - Classification: image 4 septembre 1986

GROUPES	UNITES	NOMBRE DE PIXELS	SUPERFICIE	% DE DE L'IMAGE TOTALE	
				UNITES	GROUPES
BAS-FONDS	TSC2	645.044	258,0	7,7	7,7
SABLES d'(a)rènes granitiques	(é)TSC7	1108.756	443,5	13,2	(32,9)
	(é)TSC6	820.308	328,1	9,8	
	(é)TSC5	828.812	331,5	9,9	73,2
	(a)TSC3	1593.080	637,2	19,0	(40,3)
	(a)TSC4	1784.436	713,8	21,3	
ROCHES	TSC1	300.712	120,3	3,6	3,6
GLACIS	TSC8	1295.264	518,1	15,5	15,5
IMAGE TOTALE		8376.412	3350,6	100,	100,0

En km²

POURCENTAGE DES GROUPES PAR RAPPORT A LA SUPERFICIE TOTALE

Figure n° 2

2.2- Image du 17 décembre 1986

La classification sur l'image du 17 décembre 1986 génère 12 classes soit deux de plus que sur la zone d'Oursi et quatre de plus que sur la scène de septembre. Ceci peut paraître à priori surprenant. Rappelons que sur la fenêtre du bassin versant d'Oursi en septembre, on avait obtenu 11 classes et seulement 10 classes en décembre. Deux raisons expliquent cela :

- la zone d'Oursi regroupe trois classes de végétation dense de bas-fond en septembre occupant 10,41 % de la superficie totale. Sur la scène entière, cette superficie n'est plus que de 7,7% et la forte teneur en végétation active de cette unité contraste fortement avec les autres.
- sur la scène entière de septembre la végétation masque des différences entre certaines formations superficielles.

Neuf classes ont des significations identiques pour les deux cadres de décembre (tableau n° 4 et figure n° 3) :

DC4	TDC8	végétation de mare + eau
DC10	TDC9	végétation de mare, eau moins dominante
DC8	TDC5	végétation des marigots et des franges de mares
DC9	TDC6	zones sableuses dénudées et très réfléchissantes, l'erg vif est compris dans cette classe. Indique aussi les brousses très dégradées au nord de la mare d'Oursi
DC2	TDC4	sables d'arènes granitiques et de vieilles dunes éoliennes
DC7	TDC7	zones de champs et de fourrages peu dégradées sur sables éoliens
DC5	TDC1	glacis arénacés et sur sols bruns
DC6	TDC11	roches sombres, ombres des nuages, eau libre
DC1	TDC3	glacis sur sols ferrugineux non lessivés, sols bruns vertiques et vertisols

L'apparition des trois dernières classes est corrélée avec la surface qu'elles recouvrent hors du bassin d'Oursi :

- TDC2 : localise les cordons dunaires anciens et dénudés.
- TDC10 : indique les sables sombres de dépressions en zone dunaire et dans le cours des marigots. Ces sables semblent être de bons supports pour la végétation si l'on compare les images de septembre et de décembre.

Notons aussi que l'image est affectée au sud est par la présence de nuages dont l'ombre est classée dans les unités TDC11 (roches sombres) et TDC3 (glacis). Le tableau n° 5 donne les superficies des unités et leur regroupement en grandes unités du paysage. La comparaison de ce tableau avec celui de septembre montre que les unités de sables déjà majoritaires en septembre augmentent légèrement, passant de 73,2 à 75,9%. Mais surtout on constate que les sables d'arènes passent de 40,3 à 50,4% tandis que la fraction des unités classées "sables éoliens" en septembre régresse de 32,9 à 25,5%. Il s'agit exactement du même phénomène que celui enregistré sur la zone d'Oursi. L'extension de l'unité TDC4 "glacis arénacés" se fait au détriment des classes TSC5 "dunes de piémonts sableux avec végétation" et TSC8 "glacis". TSC5 est formée de glacis sur sables sombres dont les valeurs radiométriques sont très proches de TDC4 en décembre. Il en est de même pour certaines parties de TSC8 ce qui explique la présence de ces deux classes dans l'unité "arènes glacées" en décembre. L'extension de l'unité TDC3 "arènes granitiques" se fait aussi au détriment de l'unité TSC5 notamment à proximité des placages amorphes sur arènes granitiques. La végétation dense diminue, ce qui est logique, passant de 7,7 à 3,6%. Elle se retrouve uniquement sur les dépressions endoréiques des mares et les sections des cours d'eau encore humides. L'unité TDC1 "roches sombres" augmente anormalement entre septembre et décembre (3,6 à 4,8%). Ceci est dû à la présence de l'ombre des nuages dans cette classe (figure n°5).

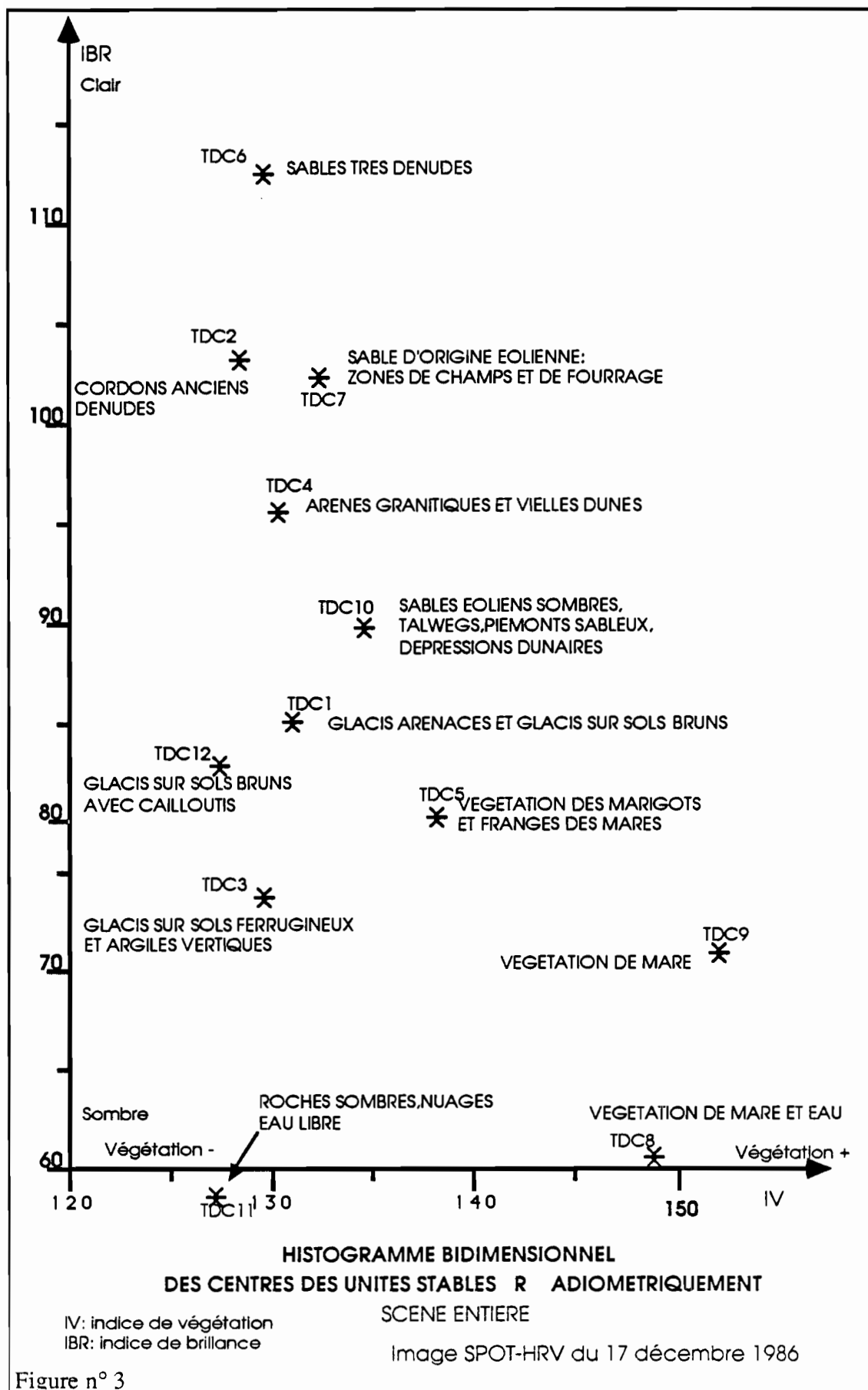


Figure n° 3

INTERPRETATION DES UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT

à l'aide des indices de végétation et de brillance

Tableau n° 4

Scène entière - Classification: image 17 décembre 1986

unités	signification thématique des unités	IV* (1)	IB* (1)
TDC5	Végétation des marigots et des franges de mares	139,5	79,3
TDC8	Végétation de mare et eau	146,7	61,9
TDC9	Végétation de mare, eau moins dominante	151,8	72,5
TDC6	Zones sableuses dénudées-très réfléchissantes, brousse tigrée très dégradée, nuages	129,7	112,1
TDC2	Cordons dunaires anciens dénudés	129,1	103,2
TDC7	Zones de champs de mils et zones de fourrages peu dégradées sur sables éoliens	133,5	102,4
TDC10	Sables éoliens de dunes et de fond des marigots substrat sombre-faible végétation	134,8	88,7
TDC4	Arènes granitiques et vieilles dunes éoliennes	130,6	95,1
TDC1	Glacis arénacés, glacis sur sols bruns	130,6	86
TDC11	Roches sombres, ombres des nuages, eau libre	126,1	55,1
TDC3	Glacis sur sols ferrugineux principalement, sur sols bruns vertiques et vertisols	129,5	74,3
TDC12	glacis sur sols bruns avec pavage de cailloutis brousse tigrée, mare de Ganadaori	126,4	83,8

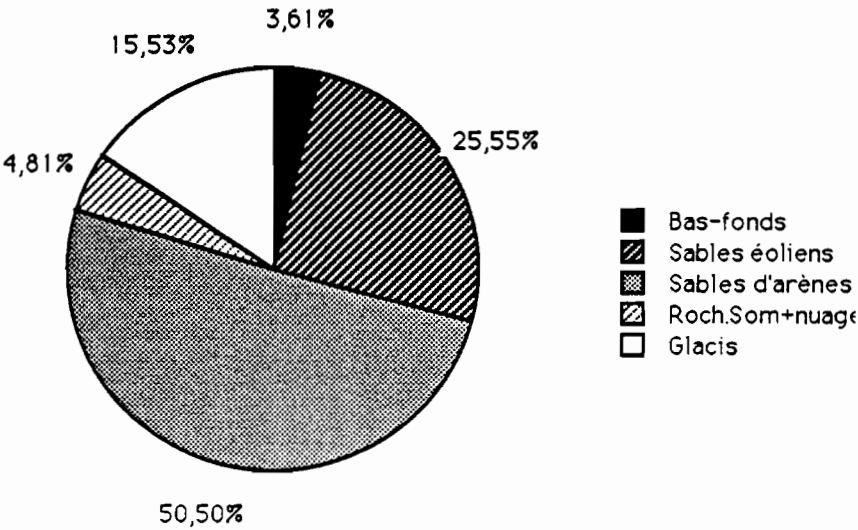
*IV: indice de végétation , IB: indice de brillance , 1 moyenne des unités

STATISTIQUES DES UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT
SUPERFICIES DES GROUPES ET UNITES

Tableau n° 5 Scène entière - Classification: image 17 décembre 1986

GROUPES	UNITES	NOMBRE DE PIXELS	SUPERFICIE	% DE <u>DE L'IMAGE TOTALE</u> UNITES § GROUPES	
BAS-FONDS	TDC5	135.296	54,1	1,6	3,6
	TDC8	127.616	51,0	1,5	
	TDC9	43.388	17,4	0,5	
SABLES d'(a)rènes granitiques	(é)TDC6	200.056	80,0	2,4	(25,5)
	(é)TDC2	580.692	232,3	6,9	
	(é)TDC7	649.176	259,7	7,6	
	(é)TDC10	708.344	283,3	8,6	75,9
	(a)TDC4	1930.396	722,2	23,0	
	(a)TDC1	2295.204	918,1	27,4	
ROCH. SOMB. NUAGES	TDC11	402.528	161,0	4,8	4,8
GLACIS	TDC3	1051.136	420,5	12,5	15,5
	TDC12	252.580	101,0	3,0	
IMAGE TOTALE		8376.412	3350,6	100,	100,

En km2



POURCENTAGE DE CHAQUE GROUPE PAR RAPPORT A LA SUPERFICIE TOTALE
Figure n° 4

3- L'IMAGE MULTIDATE : SCENE ENTIERE

3.1- Les unités majeures relatives

Ici encore la méthodologie appliquée est rigoureusement la même que sur le bassin d'Oursi. La conjonction image sur la scène entière génère 96 classes multirate (8 x 12). Cinq U.M.R. se dégagent de cet ensemble. Il faut toutefois signaler la présence d'une erreur dans les calculs imputable à la présence de l'ombre des nuages ce qui n'a pas permis de classer automatiquement les roches sombres comme faisant partie des unités majeures relatives. Une comparaison avec les U.M.R. du cadre d'Oursi montre que quatre d'entre elles possèdent la même signification thématique avec cependant l'obtention d'une meilleure précision pour la classification sur la scène toute entière :

- TU72 : sables ou brousses tigrées très dégradées
- TU34 : arènes granitiques et vieilles dunes
- TU111 : roches sombres
- TU83 : glacis sur sols bruns
- TU41 : glacis arénacés

La cinquième TU41 "glacis arénacés" ne figurait pas parmi les U.M.R. de la zone d'Oursi mais ce type de surface présentait déjà une bonne stabilité spectrale entre les deux dates sélectionnées. Les "glacis de piémonts sableux avec végétation" qui ressortaient en tant qu'UMR en septembre se trouvent englobés dans l'U.M.R. TU41 "glacis arénacés". Notons aussi que la superficie totale des U.M.R. sur la scène entière n'est que de 33,1% contre 40,8% pour la zone d'Oursi et la figure n°5 indique qu'elles n'ont pas ou très peu de végétation se situant aux deux dates pratiquement sur le même axe vertical.

3.2- Les unités variantes

Le tableau n°6 montre les unités multirates classées en ordre croissant suivant l'indice de végétation aux deux dates. Seules figurent les U.V. dont la superficie excède 0,1% de l'image entière. Il y a 51 UV >0,1% dont la superficie totale représente 64,76 %. Et si l'on rajoute les U.M.R. la superficie passe à 98,62%. Le nombre d'U.V. étant élevé il est nécessaire de procéder à des regroupements. Ceci est obligatoire dans la mesure où l'on désire obtenir un document de synthèse lisible restitué au 1 : 100.000. Seules 28 U.V. >= 0,8% seront interprétées et regroupées en 19 classes.

Tableau n°6

UNITES MULTIDATES: 4 SEPTEMBRE-17 DECEMBRE 1986

CLASSEMENT D'APRES L'INDICE DE VEGETATION

Images SPOT-HRV Scènes entières

végé. dense (UNITE) TU9 de mare (INDICE) 151,8								29 0,36
végé de mare + eau TU8 146,7	18 0,25							
végé. des marigots TU5 139,5						65 0,11	55 0,39	25 0,95
sables sombres éoliens TU10 faible végétation 134,8		810 0,11	310 1,09	410 0,90	710 0,44	610 2,20	510 2,32	210 1,31
sables éoliens TU7 zones de champs 133,5			37 0,65		77 3,94	67 3,01	57 0,12	
glacis arénacés TU1 et glacis sur sols bruns 130,6	11 0,19	81 6,56	31 3,00	●41 11,45	71 0,22	61 0,75	51 3,67	21 1,55
arènes granitiques TU4 130,6		84 0,24	●34 10,79	44 4,9	74 2,5	64 2,66	54 1,63	24 0,30
zones sableuses TU6 très dénudées 129,7			36 0,01		76 2,18			
glacis sur sols ferrugineux TU3 et sur sols bruns vertiques 129,5	13 1,50	●83 6,40	33 0,38	43 1,60		63 0,31	53 0,96	23 1,30
cordons dunaires TU2 anciens dénudés 129,1			32 2,22	42 0,32	●72 3,77	62 0,43	52 0,14	
glacis sur sols bruns TU12 pavés de cailloutis 126,4		812 1,26	312 0,43	412 1,22				
roches sombres, nuages TU11 eau libre 126,1	●111 1,45	811 0,84	311 0,30	411 0,80		611 0,24	511 0,46	211 0,67
17 DECEMBRE	C1 130,9	C8 131,3	C3 132	C4 132,1	C7 133,6	C6 142	C5 142,5	C2 152,3
4 SEPTEMBRE	roches somb. + eau libre	gla.sur sols bruns	arènes grani. +dunes ancien.	glacis arénac.	sables dénudés	végé. sur sa. éoliens champs	piem. sableux	végé dense mares +bas-f.

* en pourcentage de l'image totale

Pour des raisons pratiques, le tableau est inversé par rapport à celui de la classification sur la fenêtre Oursi. Il faut lire les numéros des unités multirates en commençant par ceux de l'image du mois de septembre se trouvant en abscisse.

Le chiffre supérieur est le numéro de l'unité multirate, le chiffre inférieur indique le pourcentage de l'unité par rapport à la superficie totale de la scène.

Les U.M.R sont indiquées en gras accompagné du symbole ●

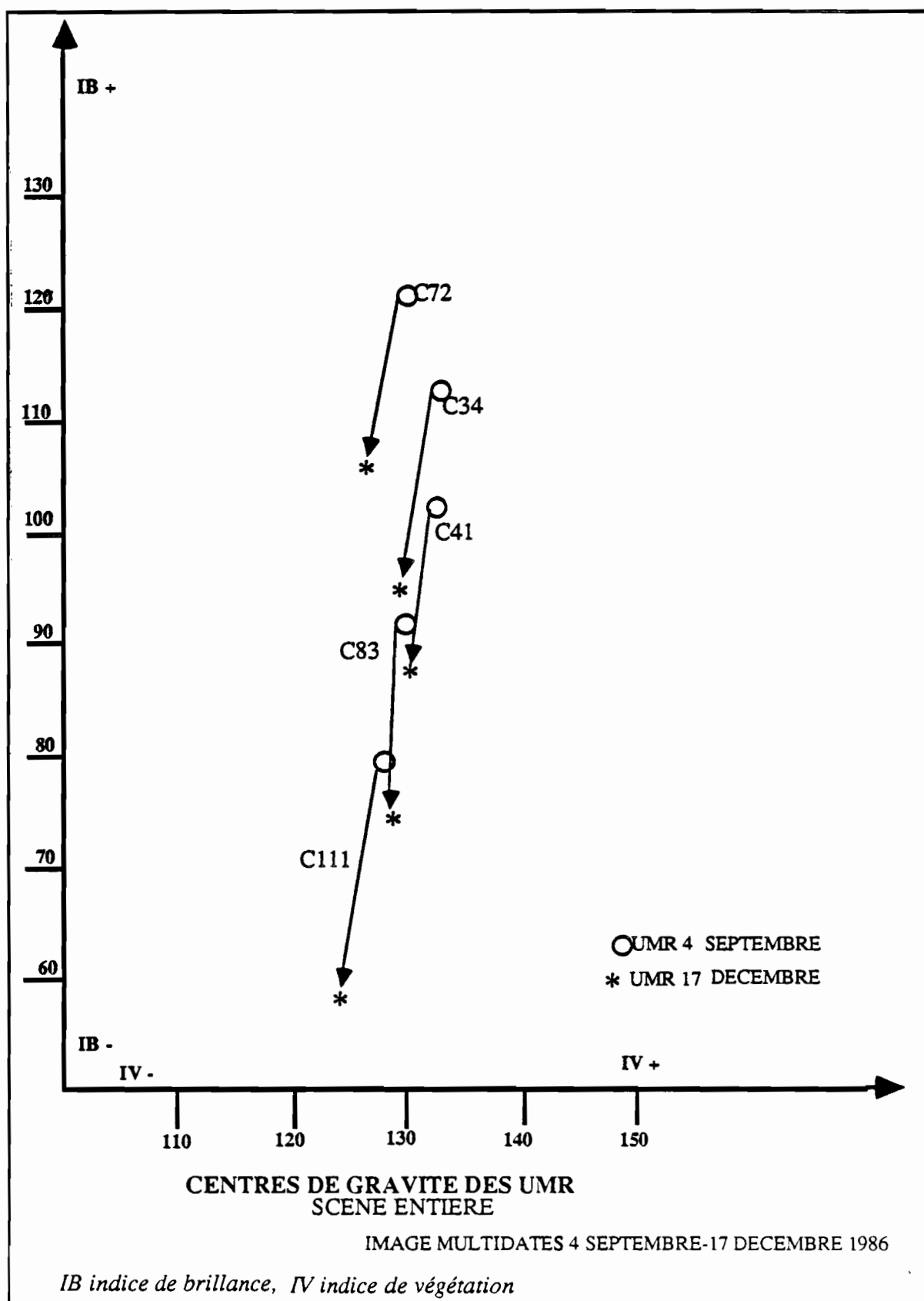


Figure n°5

INTREPRETATION DES U.R.P 4 SEPTEMBRE-17 DECEMBRE 1986

Tableau n° 6

Image multodate - scène SPOT-HRV " Oudalan "

U.R.P	UNITES REGROUPEES	INTERPRETATIONS
A	11, 18 à 110	eau libre de mare et argiles vertiques de bas-fonds humides en décembre.
B	13 à 17	vertisols des dépressions encore humides en décembre.
C	111 = UMR	massifs de roches sombres, cuirasses.
D	21 à 27	végétation dense des marigots durant l'hivernage. Les champs de sorghos sont contenus dans cette classe.
E	28	végétation dense des mares et de certaines sections de marigots les plus importants sur le flanc sud de la dune de Sikiré. Végétation encore active en Décembre et eau dominante.
F	29	végétation active des mares aux deux dates, moins saturée en eau que l'U.R.P. E.
G	31 à 34	UMR 34 + regroupement de classes très proches. Arènes granitiques, et vieux cordons dunaires principalement. Existe aussi sur trois courtes sections de l'erg récent d'Oursi. Indique aussi les brousses tigrées peu dégradées.
H	41 = UMR 41	glacis arénacés.
I	43 à 49	ombre des nuages mais indique aussi une inter-classe entre les glacis arénacés et les sables sombres de bas-fond avec végétation verte en septembre.
J	51 à 512	placages éoliens de piémonts sableux et rebords des marigots avec végétation active en septembre. Indique aussi les champs en friche.
K	61 à 63, 610 à 612	végétation des sables éoliens bien localisée autour des secteurs de champs de mil. Semble indiquer des secteurs peu dégradés des dunes sableuses et placages amorphes. Comme J, peut indiquer des secteurs de champs en friche.
L	64 à 69	champs sur sables éoliens. Culture ayant un taux de biomasse élevé en septembre.
M	71 à 74	UMR 72 secteurs de sable éolien et de brousse tigrée en voie de dégradation.
N	76	sables éoliens très dégradés, remobilisés par le vent. Brousses tigrées très dégradées recouvertes d'un placage de surface très réfléchissant.
O	77 à 710	indique particulièrement les secteurs de champs de mil à faible taux de biomasse début septembre 1986. Au nord-est cette classe, localise les pâturages ayant un taux de biomasse moins élevé que la classe K.
P	81	glacis sur sol brun.
Q	83 à 810	UMR 83 regroupant aussi des classes proches. Il s'agit de glacis sur sols bruns vertiques, vertisols et sur sols ferrugineux tropicaux à drainage interne associé à des sols gravillonnaires.
R	811 et 812	glacis sur sols intermédiaires entre P et Q.
S	311	mare de Ganadaouri. Cette mare se différencie des autres par l'absence de végétation et par une eau très turbide contenant des argiles en suspension.

3.3- Interprétation des classes multidade

L'interprétation des U.V. n'offre pas de surprise majeure par rapport à la classification multidade établie sur la zone d'Oursi. Il suffit de comparer les deux images pour voir que les classes générées sur les deux fenêtres de travail sont semblables. Il en est de même en ce qui concerne les paramètres statistiques du transfert des unités entre les deux dates. Par conséquent l'initialisation de l'interprétation des classes se fait directement à partir des résultats issus de la classification multidade du bassin d'Oursi et les regroupements se font automatiquement. La classification finale comprend 19 classes (tableau n° 6).

3.4- Analyse des dynamiques agissant sur le paysage

Au cours de l'analyse multidade sur le bassin d'Oursi, trois types de dynamiques ont été mis en évidence, agissant à des échelles temporelles différentes :

- dynamique du réseau hydrographique
- dynamique de la formation des glacis
- variabilité pluviométrique inter-annuelle et annuelle et dynamique anthropique

Cette dernière se scinde en trois sous-groupes:

- surpâturage et dégradation de certains glacis
- surpâturage et dégradation des dunes fixées
- implantation des zones de cultures.

La pertinence de ce mode d'extention est donc efficace puisque toutes les dynamiques détectées au niveau du bassin test se retrouvent intégralement sur la scène entière.

Le travail sur la scène entière se révèle même plus intéressant parce qu'il permet de mettre en évidence des linéaments de grande amplitude peu visibles au sol ou sur les mosaïques de photographies aériennes. Sur l'image multidade de la scène entière il existe un accident tectonique très important qui barre du nord au sud la partie centrale de la scène. Cet accident d'ailleurs est déjà visible sur l'image classée du 4 septembre 1986. A cette date celui-ci est décrit comme étant "un long couloir de glacis arénacés" compris entre deux zones de glacis sur sols bruns et à gravillons ferrugineux à l'est et à l'ouest de ce couloir sans que l'on puisse en déterminer précisément la cause. Pour s'assurer qu'il ne s'agissait pas d'un artefact dû à "l'effet barrette", qui se manifeste de toute manière sur tous les canaux SPOT et possède justement une orientation NNE-SSW, une vérification a été faite sur la scène Landsat MSS du 6 novembre 1975 à partir des axes factoriels. La visualisation des axes factoriels 2 et 3 valide l'existence d'un réseau continu de failles selon une orientation nord-sud.

La bordure ouest de l'accident est particulièrement visible et il ne s'agit probablement que d'une seule fracture. Elle se marque soit par une différenciation rectiligne très tranchée entre états de surface des glacis soit en empruntant les talwegs des marigots. Cette fracture part de la région de Tassamakati au sud et se prolonge verticalement vers le nord en direction du bassin du Gountouré où il suit le cours du marigot pour finalement disparaître vers la mare de Ganadaori tout au nord de la scène. Sa longueur est supérieure à une cinquantaine de kilomètres et elle doit probablement se poursuivre sous les formations de l'Infracambrien présentes au nord de l'Oudalan. D'autre part on constate que cet accident se situe pratiquement au centre du craton à égale distance des deux géosynclinaux bordant à l'est et l'ouest ce craton.

On ne peut actuellement avancer d'explications concernant l'apparition de ce phénomène tectonique ni dater sa mise en place. Il n'en demeure pas moins que l'existence de cet accident contribue à la différenciation des sols et des glacis. L'hypothèse que l'on peut avancer en ce qui concerne cette différenciation est liée à la circulation de l'eau dans les sols. Cette dernière est probablement influencée par cet accident induisant des variations importantes dans les bilans d'eau au sein des unités.

3.4.1- Dynamique induite par le réseau hydrographique

La dynamique du réseau hydrographique est moins visible au 1 : 150.000, échelle de restitution écran. Elle se devine mais n'apparaît pas aussi franchement que sur le bassin d'Oursi. Ici encore, le processus est intimement lié à la topographie. Or nous n'avons pas les documents cartographiques nécessaires pour procéder à cette vérification.

3.4.2- Dynamique de la formation des glacis

A l'échelle de la scène toute entière la relation entre type de glacis et substrat en place est évidente avec cependant quelques nuances : les glacis de la classe Q "sur sols bruns vertiques, vertisols et sols ferrugineux tropicaux non lessivés associés à des sols gravillonnaires" se développent de préférence sur les roches ortho-amphibolites de la formation de Sikiday et les gabbros de type Tin Edjar. Il y a un très bel exemple à l'ouest de Gorom-gorom près du village de Gountouwala. Ceci est moins évident pour les glacis formant la classe P "glacis sur sols bruns" qui semble beaucoup plus tributaire des conditions topographiques. La carte géologique au 1:200.000 ne permet malheureusement pas de se faire une idée très précise de celle-ci. Cette hypothèse n'est émise que par extrapolation de l'observation faite sur le bassin d'Oursi, et elle demanderait, bien sûr, à être vérifiée. Comme dans le cas d'Oursi la construction ou la destruction des glacis est visible sur l'image par l'ordre de succession des U.R.P. sur les versants.

3.4.3- Dynamique anthropique

La dynamique anthropique marque les domaines agricoles et pastoraux.

- Les zones de cultures aussi bien de sorgho que de mil ont été bien localisées à l'échelle du 1 : 150.000 et même à celle du 1 : 300.000. La classification multidate induit même une différenciation très nette à l'intérieur des secteurs de cultures de mil sur sable basée sur le critère du taux de biomasse verte enregistré au 4 septembre 1986. Sur une zone précise le taux de biomasse calculé avec l'indice de végétation verte est dans bien des cas étroitement corrélé à la pluviométrie totale durant la période de culture mais surtout à sa répartition régulière en "pluies utiles". Les pluies cessant début septembre le calcul du taux de biomasse peut aider à localiser les zones déficitaires et celles qui sont "normales" compte tenu des pratiques culturales des agriculteurs sahéliens. On sait que le taux de biomasse n'est pas directement lié au rendement d'une parcelle, mais il existe tout de même un seuil minimum pour l'indice de végétation à partir duquel on peut presque affirmer que le rendement sera déficitaire.
- En ce qui concerne l'élevage, la classification multidate localise bien les espaces dégradés (classe N) ou en voie de dégradation (classe M). Par contre, l'estimation des zones de pâturage peu dégradées est beaucoup moins nette. Ces espaces apparaissent dans trois classes :

- G : arènes granitiques, vieux cordons dunaires, brousses tigrées peu dégradées.
- J : végétation active des zones peu dégradées sur sables éoliens.
- O : zones des champs de mil à faible taux de biomasse et zones de pâturages peu couvertes.

La classe N "sables éoliens très dégradés non fixés" regroupe aussi les faciès très dégradés de la brousse tigrée au nord de la mare d'Oursi vers Zamarkoye.

- Conclusion

La classification thématique multitempore appliquée sur l'Oudalan concorde bien avec celle effectuée sur le bassin d'Oursi malgré la présence des nuages. Pour de futures études sur la dynamique du paysage appréhendé par télédétection satellitaire haute résolution, il sera possible de traiter la scène entière ce qui permettra de connaître le contexte régional d'évolution à une échelle comprise entre le 1 : 200.000 et le 1 : 100.000. Il suffira dans un deuxième temps d'appliquer la technique de classification pyramidale uniquement sur la zone d'étude et de restituer les résultats avec des échelles comprises entre le 1 : 50.000 et le 1 : 25.000.

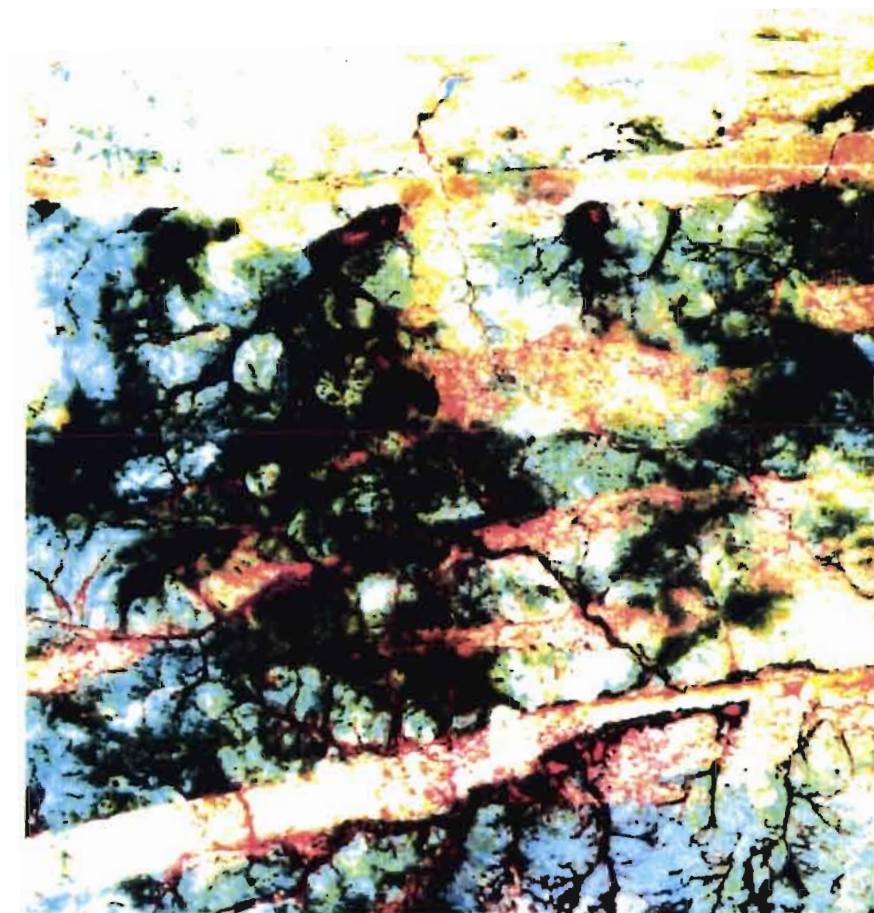


Image 7 - Composition colorée "4 septembre 1986" Scène entière

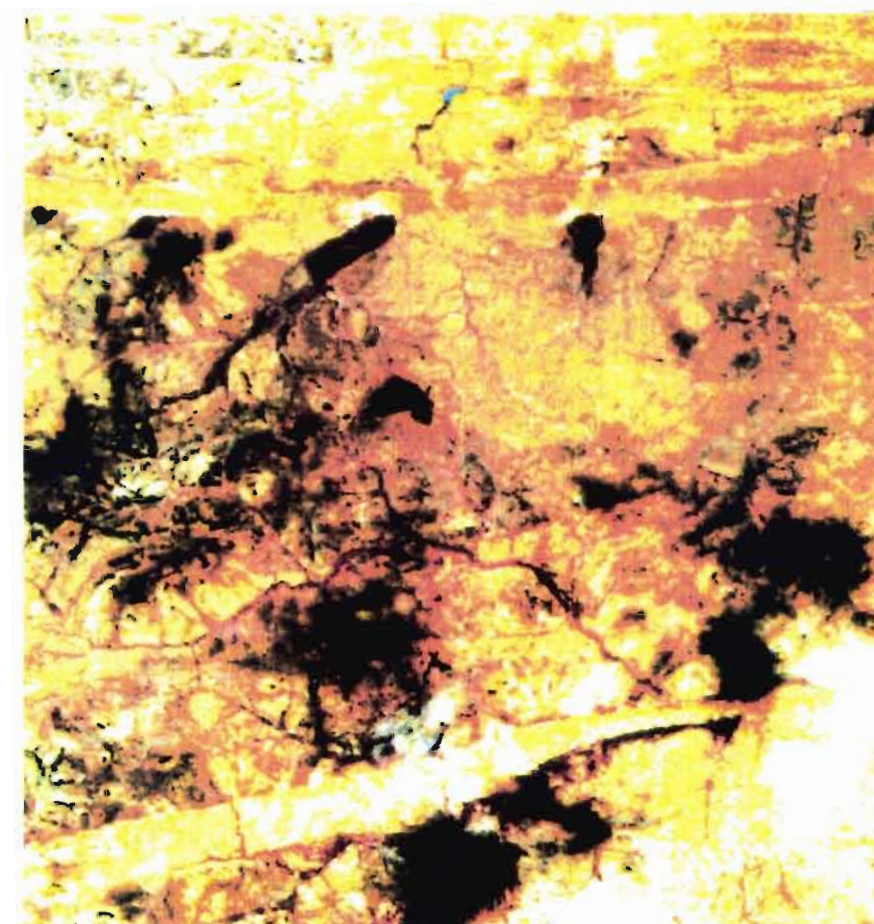


Image 8 - Composition colorée "17 décembre 1986" Scène entière

LEGENDES

Image n° 10

UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT
CLASSIFICATION DE L'IMAGE DU 4 SEPTEMBRE 1986
 SCÈNE ENTIÈRE

- TSC1 : roches sombres, eau libre, argiles humides de bas-fonds
- TSC2 : végétation des mares et bas-fonds
- TSC3 : arènes granitiques et vieilles dunes
couvertes de végétation herbacée
- TSC4 : glacis arénacés
- TSC5 : dunes de piémonts sableux, rebord des marigots
- TSC6 : végétation sur sables, ergs récents, placages amorphes,
zones de champs
- TSC7 : sables dénudés ou très peu couverts, très réfléchissants
- TSC8 : glacis sur sols bruns

Image n° 11

UNITES STABLES RADIOMETRIQUEMENT
CLASSIFICATION DE L'IMAGE DU 17 DECEMBRE 1986
 SCÈNE ENTIÈRE

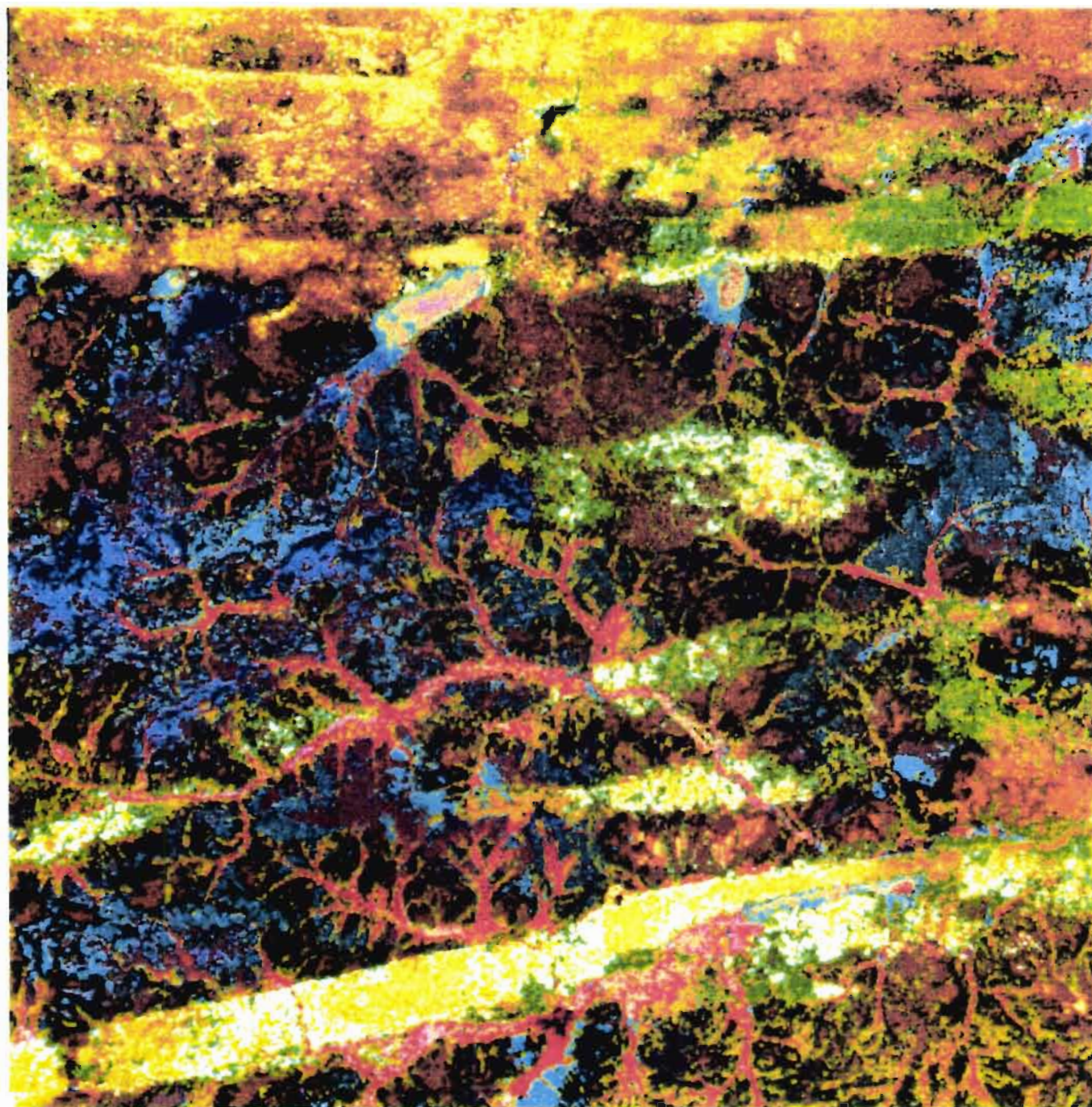
- TDC1 : glacis arénacés et glacis sur sols bruns
- TDC2 : cordons dunaires anciens dénudés
- TDC3 : glacis sur sols ferrugineux et argiles vertiques
- TDC4 : arènes granitiques et vieilles dunes
- TDC5 : végétation des cours d'eau, pourtour des mares
- TDC6 : sables très dénudés
- TDC7 : sables d'origine éolienne, zones de champs et de fourrages
- TDC8 : végétation de mare et eau libre
- TDC9 : végétation de mare
- TDC10 : sables éoliens sombres, talwegs, piémonts sableux,
dépressions dunaires
- TDC11 : roches sombres, nuages, eau libre
- TDC12 : glacis sur sols bruns, pavés de cailloutis de roches diverses

LEGENDE

Images n° 12, 13, 14

UNITES RELATIVES DU PAYSAGE , CLASSIFICATION MULTIDATE : 4 SEPTEMBRE-17 DECEMBRE 1986 SCENE ENTIERE

- **A** : eau libre de mare et argiles vertiques de bas-fonds humides en décembre.
- **B** : vertisols des dépressions encore humides en décembre.
- **C** : massifs de roches sombres, cuirasses.
- **D** : végétation dense des marigots en septembre (ligneux et herbacées).
Comprend les champs de sorgho.
- **E** : végétation dense des mares et de certaines sections des marigots les plus importants
sur le flanc sud de la dune de Sikiré. Végétation active en décembre et eau dominante.
- **F** : végétation active des mares aux deux dates, moins saturée en eau que E.
- **G** : U.M.R 34 regroupée avec des classes très proches. Arènes granitiques et vieux cordons
dunaire principalement. Existe sur de courtes sections de l'erg récent d'Oursi. Comprend
les brousses tigrées peu dégradées.
- **H** : glacis arénacés.
- **I** : ombre des nuages et interclasse entre les glacis arénacés et les sables sombres
- **R** : glacis sur sols bruns. Clarté intermédiaire entre P et Q.
de bas-fonds avec végétation.
- **J** : placages éoliens de piémonts sableux et rebord des marigots avec végétation
active en septembre
- **K** : végétation des sables éoliens bien localisés autour des champs de mil. Semble
indiquer les secteurs peu dégradés des dunes et des placages amorphes.
- **L** : champs sur sables éoliens. Cultures ayant un taux de biomasse élevé en septembre.
- **M** : UMR 72, secteurs des sables éoliens et des brousses tigrées en voie de dégradation.
- **N** : sables très dégradés d'origine éolienne, remobilisés par le vent. Brousses tigrées
très dégradées. Surface minérale recouverte par une pellicule argileuse réfléchissante.
- **O** : Champs de mil à faible taux de biomasse début septembre.
- **P** : glacis sur sols bruns.
- **Q** : glacis sur sols bruns argileux • vertique, vertisols et sols ferrugineux tropicaux
à drainage interne associé à des sols gravillonnaires.
- **S** : mare de Ganadaori. Argiles en suspension.



Légende

A	
B	
C	
D	
E	
F	
G	
H	
I	
J	
K	
L	
M	
N	
O	
P	
Q	
R	

Image 12 - Unités Relatives du Paysage "U.R.P. septembre-décembre 1986" Scène entière

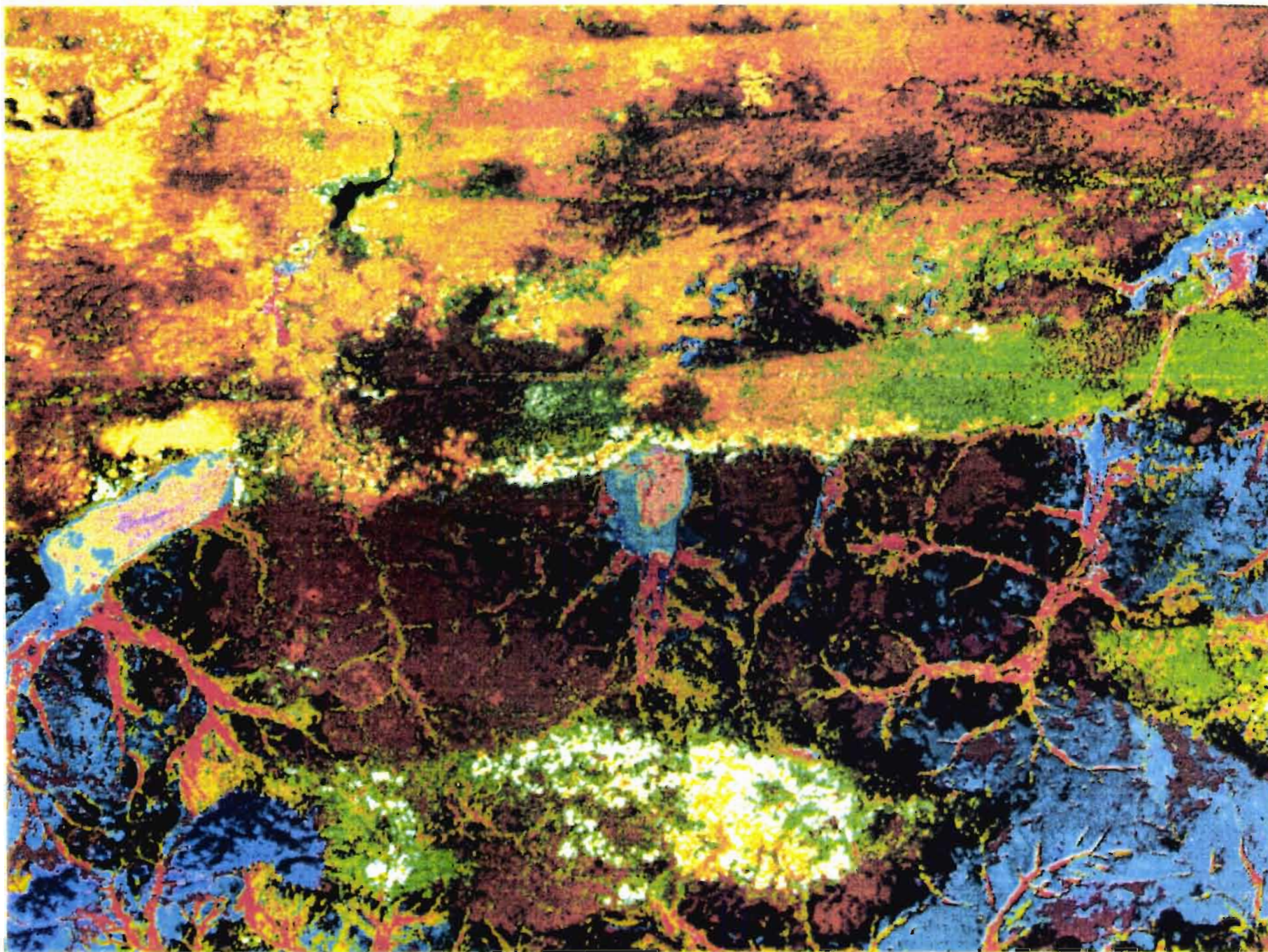


Image 13 - U.R.P. "septembre-décembre 1986" Région: "Oursi-Darkoy"

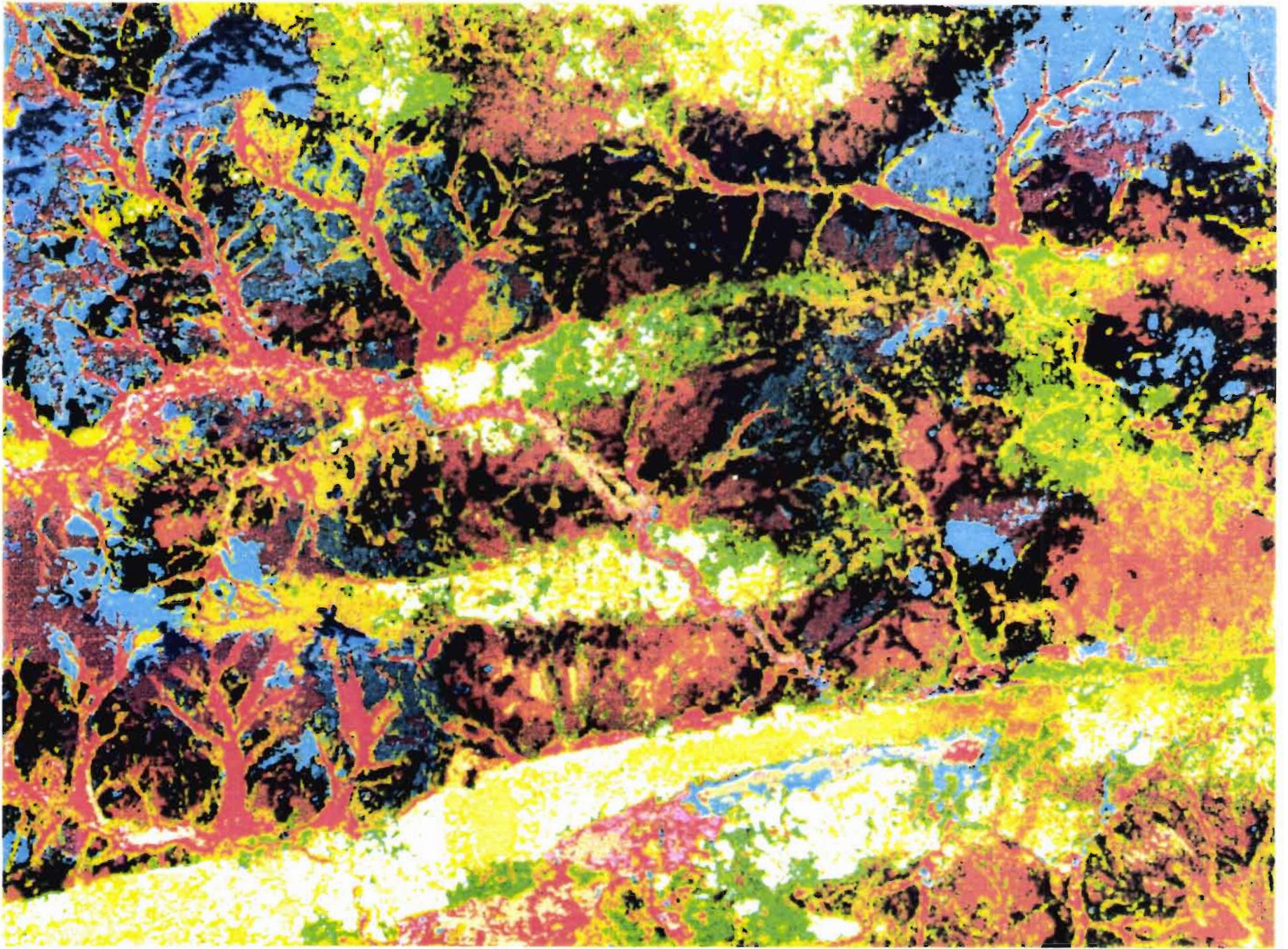


Image 14 - U.R.P. "septembre-décembre1986" Région: "Koel-Gorom Gorom"

CHAPITRE XI

ANALYSE DES SOUS CLASSES SABLEUSES

Image du 4 septembre 1986

1- PREAMBULE

Le précédent chapitre présentait une méthode d'extension spatiale des résultats obtenus sur une zone témoin à un ensemble régional plus vaste. Dans ce chapitre est présentée une méthode d'extrapolation spectrale. On entend par extrapolation spectrale l'opération consistant à pratiquer sur une classe radiométrique stable déjà établie de niveau 1 une classification pyramidale faisant apparaître des sous-classes de niveau 2. Rappelons à ce propos que le nombre de strates information par classes radiométriques stables de niveau 1 est souvent très élevé. Il suffit pour cela de se référer aux variances des classes sur les tableaux statistiques obtenus pour la zone d'Oursi. La procédure "classification pyramidale" consiste à répéter le même mode de classement aux niveaux 1 et 2 sur une classe radiométrique considérée alors comme indépendante.

Une telle classification ne peut s'appliquer qu'à grande échelle si l'on veut avoir un document qui soit lisible. Elle concerne donc uniquement des études fines très localisées sur les unités du paysage. Les échelles maximales de restitution pour des images SPOT se situent entre le 1:50.000 et le 1:25.000 et permet d'accéder à des informations très détaillées sur les relations entre les variables du milieu physique. L'application de ce type de classification se fera à la date du 4 septembre 1986 et uniquement sur les classes sableuses.

Le choix de cette date répond à l'intérêt que l'on accorde à la reconnaissance des formations végétales herbacées en particulier à une tentative de reconnaissance des secteurs de culture du mil. La reconnaissance du stade phénologique des cultures constitue un volet important des possibilités offertes par la télédétection satellitaire. Ceci tend à devenir "routinier" dans les régions où les façons culturales sont mécanisées et où les cultures présentent des stades de développement sensiblement équivalents en tout point de la parcelle, l'apport des engrais chimiques tendant à "gommer" les différences de conditions édaphiques. Il s'agit donc le plus souvent des régions agricoles des pays industrialisés ou des régions des pays en voie de développement où la pluviométrie est suffisante pour permettre l'implantation de cultures de rentes. Il en va tout autrement pour les cultures des régions sahéliennes au couvert végétal souvent hétérogène et dont le parcellaire offre des contours irréguliers. La localisation des zones de champs se révèle alors assez complexe. Le choix d'analyser les régions sableuses procède à la fois des raisons invoquées plus haut - la végétation herbacée étant surtout présente dans les régions sableuses - mais aussi du fait de l'importance de la superficie de ce

groupe. Rappelons à ce propos que le groupe "sables" représente 60,19% dans la classification obtenue au mois de septembre.

2- L'ETUDE DES CLASSES SABLEUSES

Le groupe "sables" de la classification du mois de septembre possède 5 classes. Parmi celles-ci, deux n'ont pas une interprétation satisfaisante parce que trop générale. Dans ces conditions l'utilisation d'une classification pyramidale est justifiée. Il s'agit des deux unités suivantes :

- SC2: sables éoliens et arènes granitiques
- SC7: végétation sur sables éoliens-zones de champs

2.1- Etude de l'unité SC2 "sables"

A l'évidence la classe SC2 qui représente 20,4% du cadre étudié manque de précision. La variance de cette classe est de 22,21 sur le canal XS2 donnant un nombre maximum théorique de 10 sous-classes. Cette classe mélange des sables d'origines géomorphologiques différentes: dépôts éoliens pour les dunes et placages sableux, météorisation du substrat granitique pour les arènes du même nom. La granulométrie de ces deux fractions sableuses est de ce fait différente, les conditions édaphiques et la densité végétale aussi. Dans ces conditions une distinction serait indispensable pour cartographier en deux sous-classes au minimum ces deux types de milieux.

L'application des critères de stabilité montre qu'avec cinq sous-classes on obtient le maximum de stabilité. L'interprétation des sous-classes est la suivante:

- SC21: sables éoliens avec légère couverture herbacée active.
- SC22: zones de dégradation des dunes éoliennes. Correspond parfaitement à l'UV27 de la classification multidade sur Oursi. La localisation de cette unité au sommet de certaines dunes à l'ouest d'Oursi tend à prouver que cette classe est bien une classe témoin des phénomènes de dégradation sur dunes éoliennes.
- SC23: sables éoliens sombres possédant une légère couverture herbacée. Sa localisation sur les dunes semble indiquer des zones de sables de l'erg récent issus du remaniement in-situ de l'erg ancien sous-jacent.
- SC24: arènes granitiques et vieux cordons dunaires. Cette classe est aussi localisée dans certaines dépressions de l'erg récent. L'appartenance à cette classe de ces couloirs dunaires semble indiquer l'existence de stocks sableux provenant de l'erg ancien ou bien de l'influence du substrat sous-jacent. Ces deux hypothèses n'ont pas été vérifiées.
- SC25: indique les zones d'arènes granitiques compactées sur les versants du Gountouré.

2.2- Etude de l'unité SC7 "végétation sur sable éolien"

La variance de 27,6 donne un nombre maximum théorique de 11 sous-classes. Les tests de stabilité indiquent que la partition en trois sous-classes est la plus stable. L'interprétation est la suivante:

- SC71: végétation dense sur sable. Entourant souvent les secteurs de culture de mil. Il s'agit le plus souvent de champs en friches.

INTERPRETATION DES UNITES RADIOMETRIQUES DES SOUS-CLASSES SABLEUSES

à l'aide des indices de végétation et de brillance*

Tableau n° 7

Classification: image 4 septembre 1986

unités	sous unités	légende sur les images	signification thématique des unités	IV* (1)	IB* (1)
SC2	SC21	1	Sables éoliens clairs avec une légère couverture herbacée	135,1	115,7
	SC22	2	Secteurs de dégradation des dunes éoliennes	131,8	118,3
	SC23	3	Sables éoliens sombres avec une légère couverture herbacée	134,8	109,6
	SC24	4	Arènes granitiques et vieux cordons dunaires	132,6	112,3
	SC25	5	Arènes granitiques glacées sur les versants du Gountouré	129,9	114,3
SC6		6	Végétation sur sable foncé des piémonts et dépressions, zones de friches sur dunes	138,5	99,1
SC8		7	Sables foncés des glacis arénacés	131,	105,4
C11		8	Erg vif, sables très clairs	130,4	133,9
SC7	SC71	9	Secteur de dunes avec végétation élevée, secteurs de friches	138,2	107,5
	SC72	10	Champs de mil, biomasse élevée	144,0	108,1
	SC73	11	Champs de mil, biomasse moyenne	138,9	114,0

1; moyenne des classes

-SC72: champs de mil avec un taux de biomasse élevé. Particulièrement bien représentée sur les sables de l'erg ancien en bordure sud du cordon dunaire, entre les mares d'Oursi et de Yomboli et sur les placages amorphes à l'amont du bassin du Gountouré.

-SC73: champs de mil avec un taux de biomasse moins élevé que SC72.

Association fréquente SC72 et SC73 sur des parcelles bien dessinées et apparemment d'un même tenant montre que la pluviométrie est loin d'être le seul facteur explicatif de cette hétérogénéité. Les conditions édaphiques, les resemis fréquents en début de saison des pluies sur les secteurs où les cultures n'ont pas levé ainsi que l'hétérogénéité de la couleur du sable au sein d'une même parcelle doivent aussi être pris en compte.

3- INTERPRETATION DES SOUS-CLASSES SABLEUSES

L'interprétation globale peut être scindée en deux parties : d'une part l'analyse statistique du parcellaire agricole et d'autre part la différenciation des états de surfaces sur les régions sableuses non cultivées permettant l'élaboration de nouvelles hypothèses concernant les processus hydrodynamiques

Il faut, avant de poursuivre, revenir sur la notion d'échelle et préciser ici l'importance de ce facteur. Procéder à une classification pyramidale sur des U.S.R. réclame des restitutions cartographiques à une échelle plus importante que pour la classification initiale en classes radiométriques stables. Ceci est facilement vérifiable en regardant successivement les images n°15, 16, 17 qui représentent les sous-classes sableuses obtenues à différentes échelles. On perçoit nettement que l'image n°15 au 1/135.000 n'est pas très lisible. On discerne mal les unités qui se présentent sous forme de petites plages. Elle apporte certes une information du type global mais à peine plus que l'image multirate n°9 sur le bassin d'Oursi puisque l'on n'arrive pas à discerner la structure des petites plages délimitées par les sous-classes.

Encore une fois se pose le problème de la structure et de la texture étroitement lié à la notion d'échelle et qui est bien mis en évidence dans l'exemple présent. Néanmoins l'image n° 15 permet une visualisation intégrale du bassin et l'on peut repérer facilement les plages homogènes de sous-classes et celles qui se révèlent très éclatées. Il est ensuite possible en considérant les indices de brillance et de végétation relatifs aux sous-classes apparaissant en plages compactes de déterminer la signification de ces sous-classes (tableau n°6).

Pour discerner les contours des petites plages dispersées des unités il devient nécessaire de travailler sur des restitutions à des échelles plus grandes de l'ordre du 1/50.000. C'est le cas, par exemple, en ce qui concerne les contours du parcellaire agricole qui n'apparaît nettement que sur l'image n°17. De fait entre les images n°15 et 17 les opérations de visualisation ont consisté à appliquer, à partir de l'image n°16 qui est l'image originale, une incrémentation de niveau 2 pour obtenir l'image n°15 afin d'avoir une vue synthétique sur l'ensemble de la zone visualisée. Puis un "zoom" de niveau 2 par duplication pour obtenir l'image n°17. Si l'on veut maintenant procéder à une étude plus approfondie des sous-classes, c'est à dire passer du niveau 2 des sous-classes au niveau 3 on comprend qu'il soit nécessaire de visualiser les résultats à partir d'une carte restituée à une échelle plus importante, de l'ordre du 1/25.000.

Corrélativement on peut penser qu'il existe une relation étroite entre échelle spectrale et échelle de restitution d'ordre spatiale sur un plan à deux dimensions. Les recherches en cours actuellement sur ce sujet ne sont pas suffisamment avancées pour qu'il soit possible d'établir une relation entre ces deux paramètres. Mais il paraît évident en appliquant la classification pyramidale que ce sujet est de première importance puisqu'il permet une décomposition raisonnée des éléments texturaux d'une classification d'un niveau 1 en éléments structuraux de niveau 2.

3.1- Le parcellaire agricole

L'étude relative à la vérification du parcellaire agricole n'a pu être menée de façon exhaustive. Elle a porté sur un nombre réduit de parcelles test repérées au sol durant l'enquête terrain en 1986. La difficulté majeure provient du nombre restreint de documents à notre disposition pour confronter les résultats obtenus avec la réalité. En effet les photographies aériennes antérieures à l'année 1986 ont peu de valeur puisque des zones de friches peuvent très bien avoir été remises en culture cette année-là tandis que d'autres parcelles cultivées auparavant sont peut-être en repos. Ceci est moins probable, la tendance générale dans cette zone sahélienne étant plutôt orientée vers l'extension des surfaces cultivées, mais il est nécessaire de tenir compte de cette hypothèse. Il faut d'autre part ajouter que la reconnaissance du parcellaire agricole n'entrait pas initialement dans les objectifs thématiques des chercheurs du projet PEPS et que les observations sur le parcellaire agricole sont de ce fait peu nombreuses.

Il est cependant possible de recourir aux quatre compositions colorées à notre disposition, au 1/50.000 sur la zone du bassin d'Oursi et au 1/200.000 pour la scène toute entière et à la figure n° 6 donnant la position des centres de gravité des sous-unités avec les axes des indices de brillance et de végétation. L'examen conjoint des CC d'août, septembre et décembre permet de cerner assez bien le parcellaire. La présence des champs est mise en évidence grâce à la différence de réponse spectrale existant sur les images de septembre et décembre dans ces secteurs.

L'examen des sous-classes de champs montre que les champs sont loin d'être homogènes et ne sont reconnus qu'à l'aide des contours réguliers formés principalement par les sous-classes SC72 et SC73. L'estimation de la reconnaissance des parcelles de cultures est faite à partir des photographies aériennes et les compositions colorées des scènes. Elle a porté sur trois secteurs test situés sur des substrats différents : les secteurs de la mare d'Oursi, ceux des piémonts granitiques de Tounti, et la région de Koel sur placages amorphes. Le taux de reconnaissance est évalué à 80% par rapport à la superficie reconnue sur les CC. Il convient toutefois de remarquer qu'il est indispensable de re-tenter l'expérience avec des vérités terrain plus fiables.

3.2- Analyse des versants du bassin du Gountouré

Le bassin versant du Gountouré est situé entre les bassins d'Oursi à l'ouest et de Yomboli à l'est. Contrairement aux deux bassins contigus qui le bordent les eaux du Gountouré arrivent à traverser le cordon dunaire par une cluse aux parois assez raides pour finalement atteindre la mare de Ganadaori à environ 5 km au nord du cordon dunaire. Les eaux de la mare de Ganadaori présentent un aspect trouble dû à la dispersion des particules argileuses en suspension. On peut considérer ce fait comme remarquable si l'on songe que les eaux de la mare d'Oursi sont claires ce qui indique que les particules argileuses flocculent facilement.

Ceci est bien évidemment en rapport avec les conditions chimiques du milieu aqueux différentes pour l'une et l'autre mare mais cette raison n'est peut être pas la seule que l'on puisse invoquer si l'on examine la restitution au 1/44.000 des sous-classes sableuses cadrées sur le cours supérieur du cours d'eau (image n°18). L'étude des versants à partir de la ligne de crête de l'interfluve de Tounti montre qu'il existe une différence des états de surface entre le versant incliné vers la mare d'Oursi et celui du bassin du Gountouré. Tout d'abord la ligne de crête est formée de petites éminences granitiques qui se présentent sous forme de tors, dos de baleines, chaos de blocs. Les plus massifs ressortent en blanc sur l'image puisqu'ils sont classés parmi les unités sableuses. Tout autour se trouvent les piémonts d'arènes granitiques fraîches (SC21) alternant avec des surfaces claires dénudées (SC22). Sur ces piémonts apparaissent des parcelles cultivées (SC72, SC73), les conditions édaphiques étant propices aux cultures de mil, et l'eau accumulée dans les arènes fraîches étant restituée en différé. Des arènes granitiques de granulométrie plus fine que sur les piémonts leur succèdent ensuite (SC24).

Jusqu'à présent la succession est la même pour les deux versants mais les états de surface divergent ensuite. Alors que sur le versant incliné vers la mare d'Oursi on passe aux arènes glacées de la classe C8, le versant du Gountouré passe à la classe SC25. La différence entre ces deux classes est notable (voir le tableau n°6): la première indique des surfaces d'arènes granitiques glacées sur lesquelles interviennent des processus d'accumulation des particules argileuses. Les surfaces de l'unité SC25 sont des surfaces de transit pour les particules argileuses qui atterrissent dans le lit du cours d'eau et de là sont transportées dans la mare de Ganadaori. Cette hypothèse est confirmée par l'exacte symétrie du phénomène en ce qui concerne les versants de l'interfluve entre le bassin de Yomboli et celui de Ganadaori. La succession des sous-unités est identique à celle de l'interfluve de Tounti.

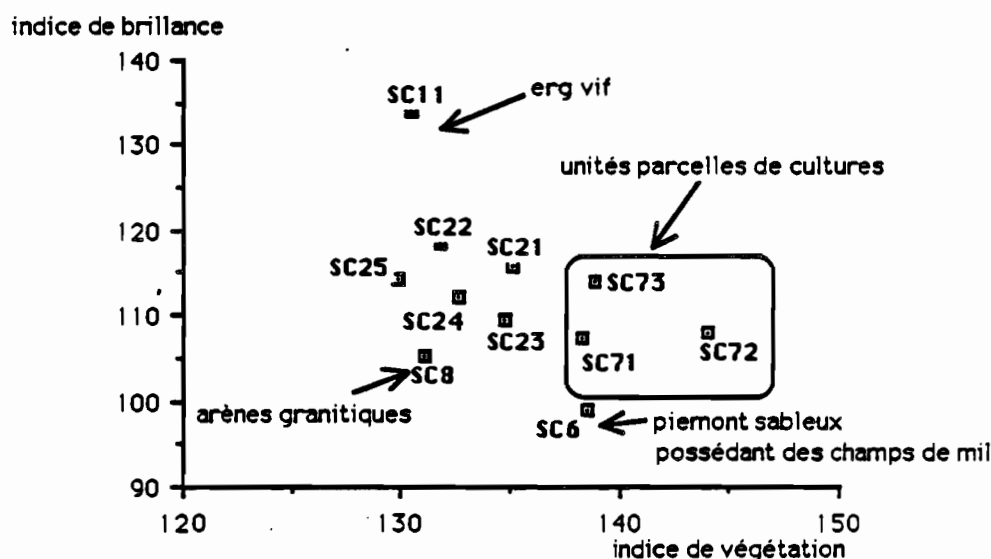


Figure n°8

DISPOSITION DES CENTRES DE GRAVITE DES SOUS-CLASSES SABLEUSES

Image du 4 septembre 1986 - Zone des bassins d'Oursi et Yomboli

La différenciation des états de surface est vraisemblablement liée aux différences de topographie. Les versants du bassin de Ganadaori ont des valeurs de pente plus élevées de l'ordre de 0,8% que sur le versant d'Oursi où elles sont inférieures à 0,5% en moyenne sur la section médiane du versant.

Conclusion

L'étude des paysages sahéliens à l'aide de la classification pyramidale est manifestement une aide précieuse pour l'interprétation fine des états de surfaces. La décomposition hiérarchisée des classes permet d'obtenir une précision accrue dans l'analyse des constituants des sous-classes et, d'une façon globale, de comprendre les relations existant entre les sous-classes. Une amélioration notable de la méthode consisterait à appliquer aux sous-classes une analyse multivariate comme cela a été effectué au niveau des unités radiométriques stables de niveau 1. Il est sûr que la précision des résultats serait accrue notamment en ce qui concerne la reconnaissance du parcellaire agricole.

La méthode possède aussi ses limites : celles imposées par le degré de résolution des capteurs utilisés. Dans des paysages aussi complexes que ceux de l'Oudalan sahélien la classification pyramidale semble pouvoir être appliquée efficacement jusqu'au niveau trois de sous-classes en utilisant des images SPOT-HRV. A ce niveau les classifications peuvent être restituées à l'échelle du 1/25.000. Notons que l'on s'accorde à penser que cette échelle est bien adaptée aux études d'aménagement entreprises au niveau d'un bassin-versant. Citons comme exemples possibles : des plans de reboisement, la gestion des pâturages et l'extension des terres cultivables. Or l'extension des résultats obtenus sur le bassin-versant d'Oursi s'étant avérée fiable il est envisageable de réaliser une cartographie au 1/50.000 du paysage sur l'ensemble de la scène.

LEGENDE

Images n° 15, 16, 17, 18

SOUS CLASSES SABLEUSES
ISSUES DES UNITES SC2 "SABLES" ET SC7 "VEGETATION SUR SABLE"
IMAGE DU 4 SEPTEMBRE 1986
BASSIN DE LA MARE D'OURSI

- **SC21** : sables éoliens clairs avec légère couverture herbacée.
- **SC22** : secteurs de dégradation sur dunes.
- **SC23** : sables éoliens sombres avec légère couverture herbacée.
- **SC24** : arènes granitiques et vieux cordons dunaires.
- **SC25** : glacis arénacés sur les versants du Gountouré.
- **SC6** : végétation sur sable foncé des piémonts et dépressions, secteurs de friches sur dunes.
- **SC8** : sables foncés des glacis arénacés.
- **SC11** : erg vif, sables très clairs.
- **SC71** : secteurs de dunes avec végétation élevée, secteurs de friches.
- **SC72** : champs de mil, biomasse élevée.
- **SC73** : champs de mil, biomasse moyenne.

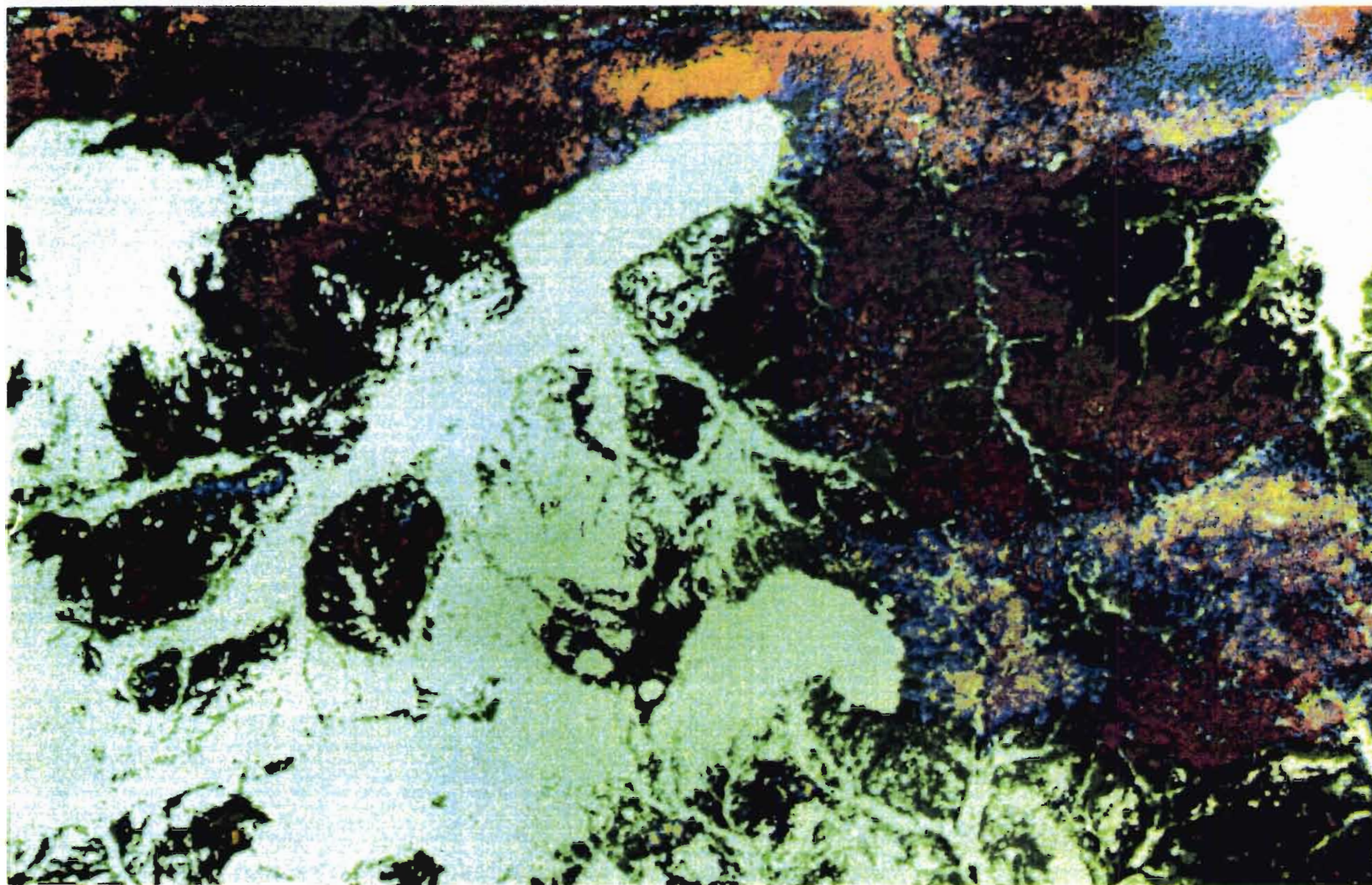


Image 15 - Sous-classes des U.S.R. : "SC2, sables" et "SC7, sables avec végétation"
Echelle 1: 135 000 Bassins Oursi-Gountouré

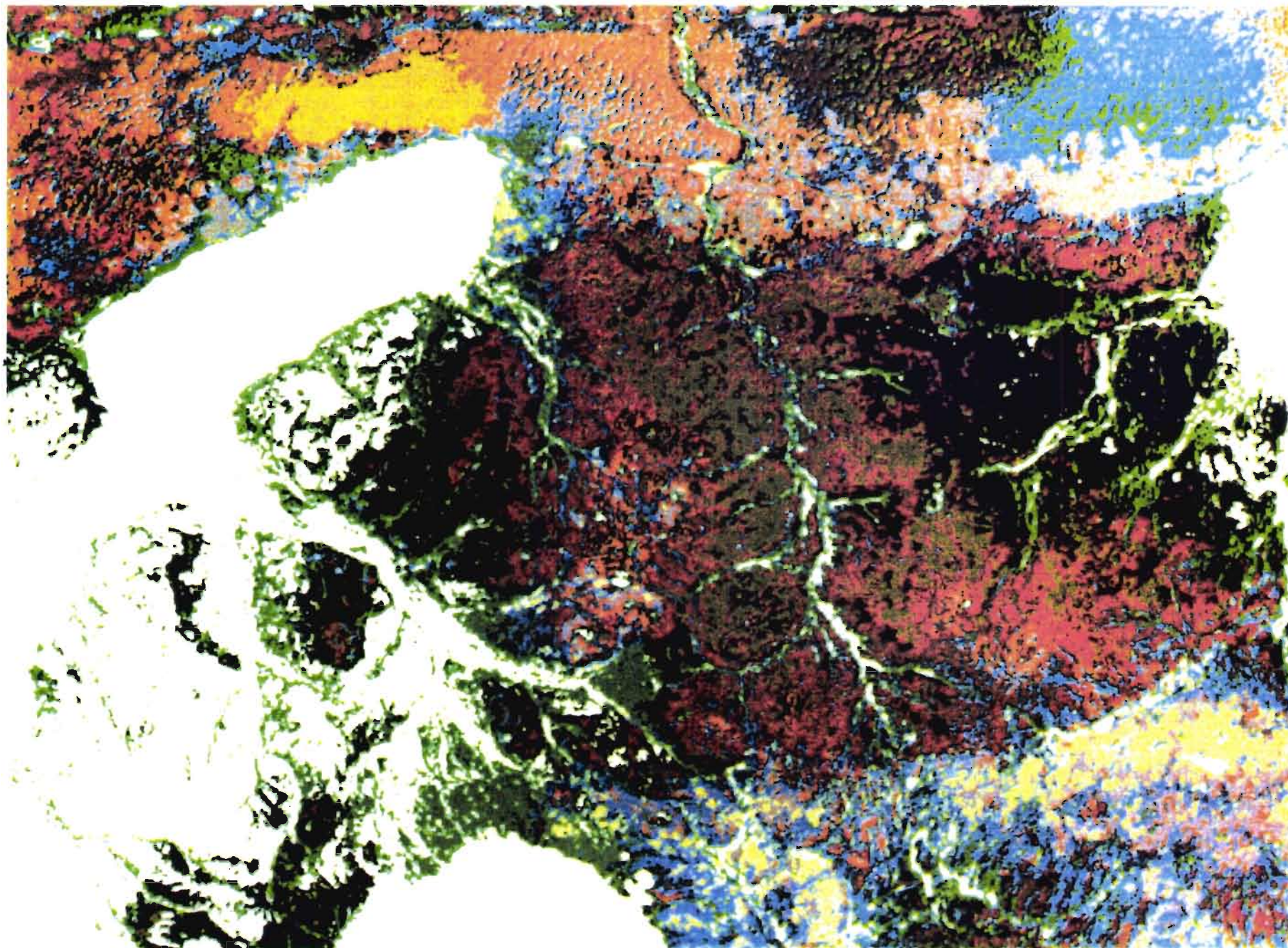


Image 16 - Sous-classes des U.S.R. : "SC2, sables" et "SC7, sables avec végétation"
Echelle 1: 88 000 Bassin du Gountouré

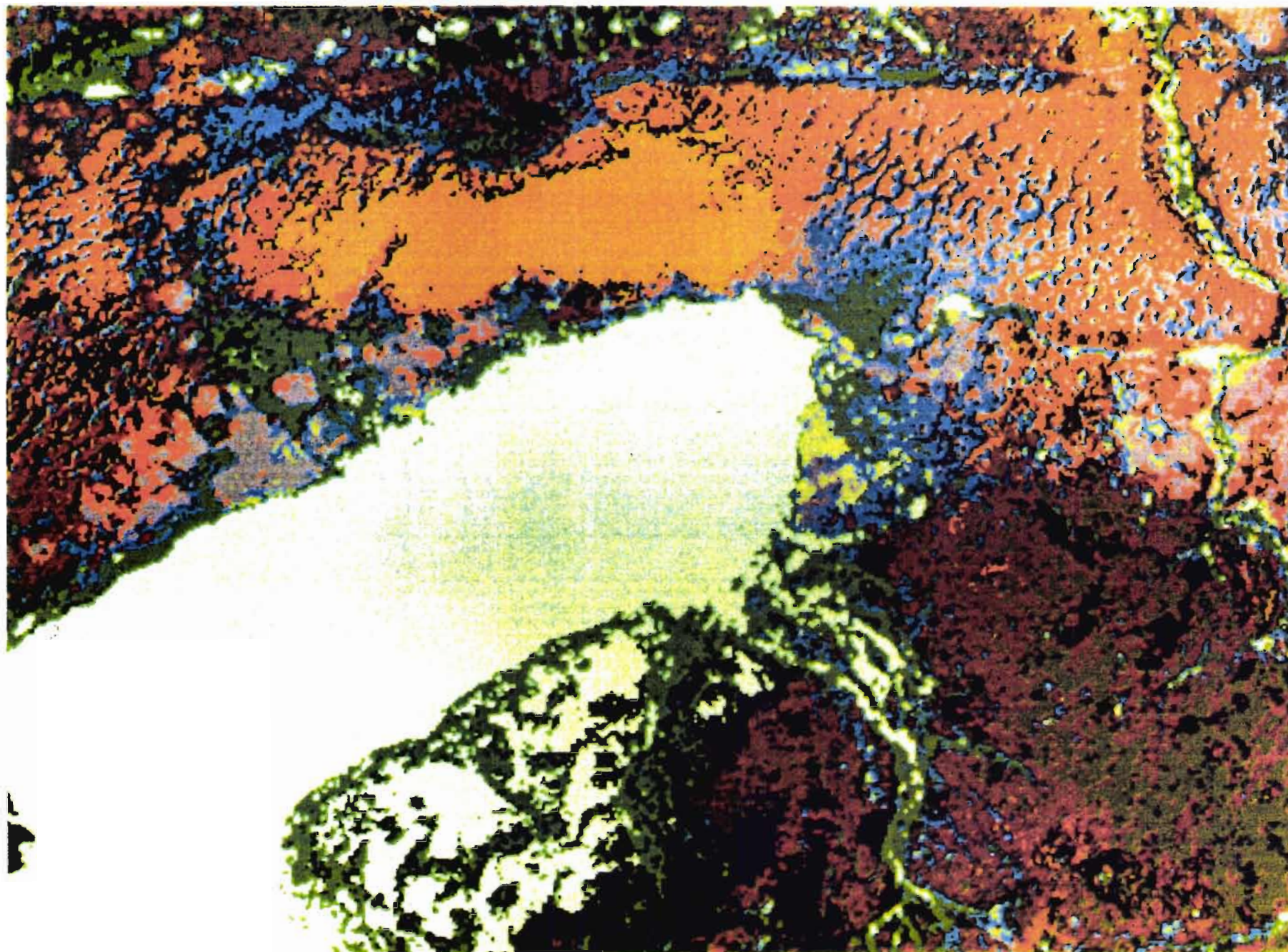


Image 17 - Sous-classes des U.S.R. : "SC2, sables" et SC7, "sables avec végétation"
Echelle 1: 44 000 Zone Est de la mare d'Oursi

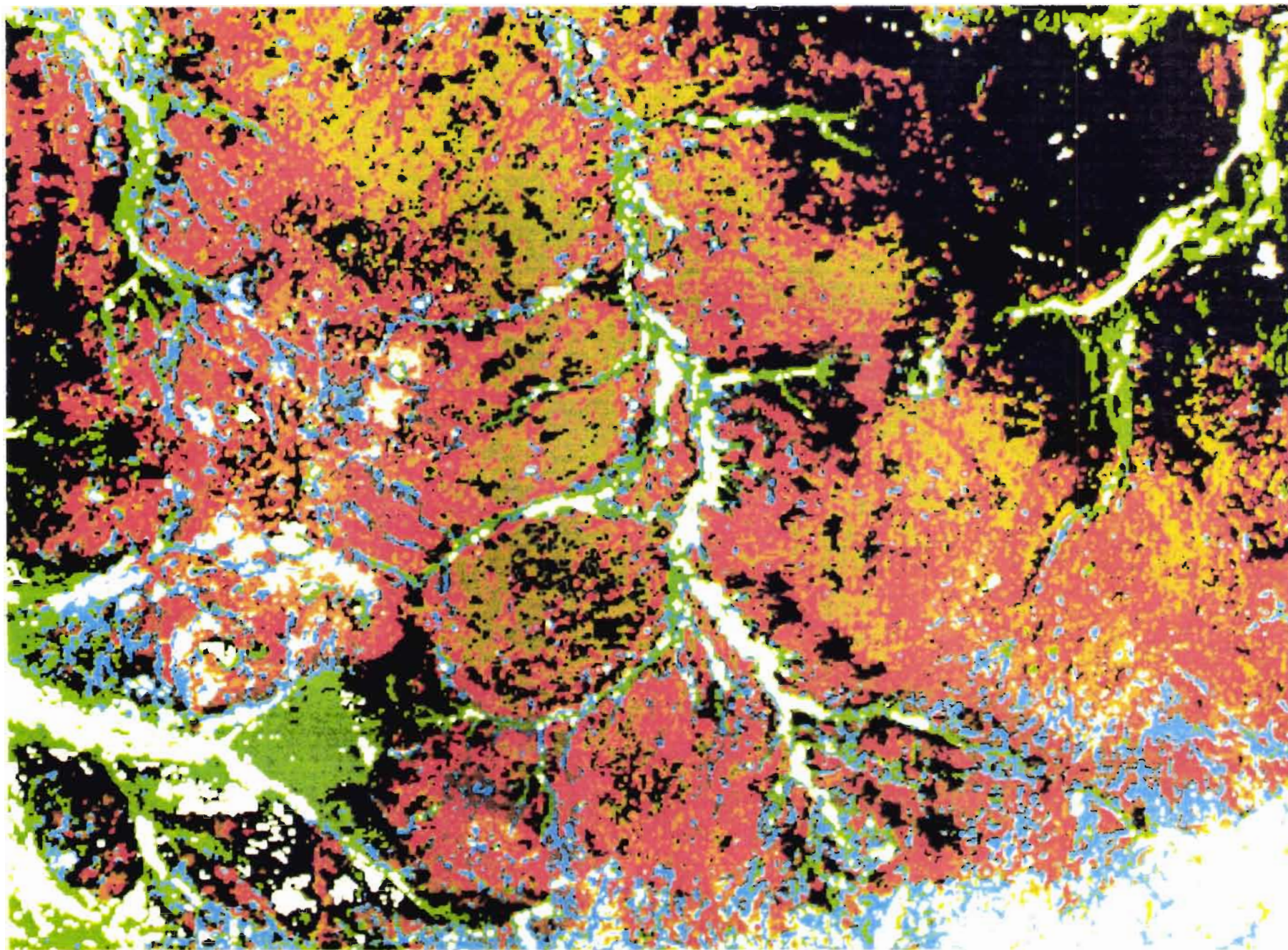


Image 18 - Sous classes des U.S.R. : "SC2, sables " et "SC7, sables avec végétation"
Echelle 1: 44 000 Tounti-Gountouré

CONCLUSION

Le but de cette étude était le développement d'une méthode d'approche du paysage utilisant les images satellitaires haute résolution SPOT-HRV. Ces dernières devaient prouver leur aptitude à fournir des informations, spatialisées et quantifiées, pour l'établissement d'un diagnostic du paysage.

Les principaux acquis de cette recherche sont avant tout méthodologiques. Ils découlent de la mise au point d'une démarche globale de traitement des images satellitaires pour obtenir une restitution cartographique des potentialités dynamiques des ressources renouvelables. Cette démarche comporte trois étapes :

- la première consiste à hiérarchiser les images satellitaires en unités stables radiométriquement. Elle emploie une classification non dirigée du type centres mobiles. La détermination du nombre de classes stables est fondée sur des critères de stabilité radiométrique et quantitative. Cette étape est appelée "recherche des unités de paysage stables radiométriquement".
- la deuxième est la réalisation d'une image multidate en croisant spatialement deux images classées avec la méthode précédente. L'analyse de l'image résultante est faite à partir d'un critère fondé sur la stabilité thématique des unités multidates. On désigne tout simplement cette étape par l'expression "obtention des unités relatives du paysage".
- la troisième part du principe selon lequel chaque "unité stable radiométriquement" générée contient potentiellement un certain nombre de sous-classes et que leur interprétation constitue un gain d'information. On considère alors qu'une "unité stable radiométriquement" est une image individuelle et l'extraction des sous unités se fait en appliquant la méthode développée au cours de la première étape. Cette opération est appelée "classification pyramidale".

Cinq types d'unités du paysage sont produits par la démarche. Chacun d'entre eux est désigné par une expression qui définit le sens thématique attribué en fonction des caractéristiques de leurs états de surface :

- | | |
|----------------|---------------------------------------|
| - U.S.R. | • unité stable radiométriquement |
| - U.S.R.(X)/nx | • sous-unité stable radiométriquement |
| - U.M.R. | • unité majeure relative |
| - U.V. | • unité variante |
| - U.R.P. | • unité relative du paysage |

Cette démarche a été expérimentée en zone sahélienne, dans le nord du Burkina-Faso. Elle s'est révélée apte à traduire, dans une certaine mesure, la complexité des interactions des facteurs écologiques intervenant sur ce type de milieu. Les recherches ont porté sur l'évolution du bassin-versant d'Oursi entre saison humide et saison sèche.

L'image prise en saison humide est hiérarchisée en 11 "unités stables radiométriquement". La vérification de ces unités en utilisant des données de terrain montre que la classification obtenue recoupe des informations collectées au sol sur la végétation. La corrélation entre l'indice de végétation ou l'indice de brillance et le taux de recouvrement total de la végétation est élevée : 0,791 pour l'indice de végétation, 0,791 pour l'indice de brillance. L'indice de végétation présente aussi une corrélation élevée avec la phytomasse totale : 0,850. En ce qui concerne l'image de saison sèche, les contrôles au sol montrent la prédominance des états de surface liés aux formations superficielles.

L'image des unités relatives du paysage, construite à partir des deux images classées, a mis en évidence des processus dynamiques agissant sur des unités bien localisées. Sur l'image résultante on étudie le contexte topographique des unités, leurs interrelations et les paramètres des états de surface. Le recoupement de ces diverses sources d'information permet une interprétation sur l'évolution du milieu physique.

Pour le bassin-versant d'Oursi, l'étude de la dynamique des glacis a montré que quelques versants subissent actuellement une dégradation alors que d'autres sont en cours de formation. Elle a aussi permis d'observer l'évolution de petits glacis, dit "glacis autonomes", qui évoluent d'une manière originale par rapport à ceux de piémont ou d'interfluve. Dans la région des cordons dunaires les secteurs de dégradation sont bien identifiés. Il en est de même des secteurs potentiels de culture de mil qui apparaissent dans une classe unique bien caractérisée.

Ces divers éléments montrent que la classification du paysage en U.R.P constitue une cartographie fiable des potentialités des terres.

Devant ces résultats positifs, on a procédé au traitement de la scène toute entière. Ils concordent en grande partie avec les résultats obtenus sur le bassin-versant d'Oursi. Les grandes unités identifiées sur le site d'Oursi sont parfaitement localisées sur l'image. Faute de moyens financiers certaines interprétations n'ont pas pu être vérifiées et il convient à l'avenir de prévoir une mission post-traitements d'images.

Afin de tester la classification pyramidale nous avons traité deux "unités stables radiométriquement" de l'image de saison humide. La première recouvrait les secteurs dunaires et d'arènes granitiques, la deuxième la végétation sur sable. La hiérarchisation de ces deux unités en sous unités a permis de différencier plusieurs sous-états de surface. Pour certaines sous unités sur lesquelles on possède des éléments de vérification, les interprétations thématiques sont cohérentes avec la situation réelle de ces secteurs à cette date. Par exemple, pour l'unité "végétation sur sable" ils mettent en évidence le parcellaire agricole et permettent de différencier cette unité en trois sous-unités. Celles-ci représentent deux classes de champs de mil et une classe de friches.

L'étude réalisée à différentes échelles de perception a permis de mettre en évidence l'importance particulière des emboîtements d'échelles. L'emploi de la classification pyramidale montre que la mise en évidence des sous-unités s'accompagne d'un changement d'échelle pour la lecture de celles-ci. Il semble donc exister une relation entre le volume d'informations restitué à un niveau donné de hiérarchisation et l'échelle de lecture. Ce problème est fondamental. En effet la perception d'un facteur écologique du paysage ou de ses interactions avec d'autres facteurs est largement fonction de l'échelle d'approche. Or, de par leur nature, les images satellitaires se prêtent bien à la hiérarchisation des informations qu'elles recèlent.

Si l'on considère les aspects méthodologiques, les modules d'analyse développés constituent par leur complémentarité un puissant outil d'investigation. Ils sont susceptibles d'offrir à

l'utilisateur des informations spatialisées difficilement accessibles avec d'autres outils. Or cette démarche s'appuie uniquement sur des paramètres statistiques en ce qui concerne le nombre de classes. L'application de cette démarche tend de ce fait vers l'objectivité.

De plus cette démarche, fondée sur l'emploi de modules statistiques, est entièrement automatisable. Ce simple fait revêt une grande importance si l'on désire traiter plusieurs scènes ce qui représente un gros volume d'informations. Les opérations de classification sont souvent fastidieuses et l'utilisation d'un système expert sera dans l'avenir un apport précieux.

Dans le cadre spécifique des pays en voie de développement, la mise au point d'un système expert fondé sur cette démarche est pleine de promesses pour l'élaboration de cartes sur les potentialités des terres, le suivi des pâturages, l'évaluation des superficies cultivées, etc... En outre elle s'insère parfaitement dans un programme d'alerte précoce demandant l'utilisation simultanée de plusieurs plateformes de capteurs satellitaires.

Dans cette perspective nos prochains efforts porteront sur l'étude des transferts d'échelles au sein d'une image, puis entre images prises par des capteurs différents. Nous espérons contribuer par ce travail au développement et à l'emploi de plus en plus opérationnel des capteurs satellitaires.

BIBLIOGRAPHIE CITEE

- AMBOUTA K. , 1984. contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'ouest nigerien. Thèse d doct. Ing., Uni. Nancy, multigr. 116p. Nancy
- AMBOUTA K. , ICOLE M. , 1986. L'écosystème "brousse tigrée" de l'ouest du Niger : son évolution lors des variations climatiques de durée pluriannuelle. Acte du symposium de Dakar : changement globaux en Afrique, INQUA, 4p.
- ANGLADE I. , 1982. Etude comparée par traitement d'image de quelques paramètres influençant le comportement hydrique des sols nus. Photo Interprétation 82 - 3 / 5 - 6.
- ANDRIANASOLO H., MALEK C. , 1988. Définition et détermination des unités dynamiques d'un paysage sahélien (OURSIS) pour un diagnostic des facteurs de dégradation et de régénération des ressources naturelles et renouvelables. Congress of ISPRS, (International Society Photogrammetry and Remote Sensing), juillet 1988. Kyoto.
- ANDRIANASOLO H., MALEK C., 1988 Proposition d'une méthode de structuration du paysage à partir d'images Spot, application en zone sahélienne. Congrès des Sociétés Savantes, 1988. Strasbourg.
- ANDRIANASOLO H. H., 1987. Analyse statistique des données de télédétection. Statistiques agricoles. Application sur Madagascar. Thèse 3ème cycle, EHESS Paris. 2 tomes, 538p.
- BADIARA L., 1986. Contribution à l'étude de l'évolution saisonnière des états de surface des zones pâturées sur le bassin-versant de la mare d'Oursi, Burkina-Faso. Mémoire de fin d'études, Université de Ouagadougou, 146p + ann. Ouagadougou.
- BARIOU R., LECAMUS D., LE HENAFF F., 1985. Dossiers de télédétection, tome 1 : réponse spectrale des végétaux, tome 2 : indice de végétation. Centre régional de télédétection, Université Rennes 2. Rennes.
- BARRAL H. et al , 1983. Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo. Synthèse de fin d'études d'une équipe de recherches pluridisciplinaire. A.C.C-G.R.I.Z.A (LAT). G.E.R.D.A.T-O.R.S.T.O.M, 172p. Paris.

- BARRAL H., 1977. Les populations nomades de l'Oudalan et leur espace pastoral. Trav. & Doc. de l'O.R.S.T.O.M n°77, 120p. Paris.
- BERTALANFFY L. von, 1973. Théorie générale des systèmes. Dunod, 296p. Paris.
- BRUNEAU M., KILLIAN 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, pp 197-202, Cepadues-Editions, Toulouse.
- C.T.F.T., 1978. 1ère campagne d'étude du ruissellement et de l'érosion hydrique à Oursi, Burkina-Faso. C.T.F.T., 14p. Nogent sur Marne.
- C.T.F.T., 1979. 2ème campagne d'étude du ruissellement et de l'érosion hydrique à Oursi, Burkina-Faso. C.T.F.T., 17p. Nogent sur Marne.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1987. Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration, version provisoire. 142p + ann. Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé.
- CELEUX G., CHEVALLIER C., 1982. Méthodes de segmentations non-paramétriques. Revue de statistiques appliquées, 1982, vol XXX, n°4, pp 39-53. Paris.
- CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B., BERNARD A., 1985 : Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina-Faso) - 1976-1981. Trav. & Doc. de l'O.R.S.T.O.M. n°190, 251p. Paris.
- COLLINET S., LAFFARGUE A., 1979. Mesure du ruissellement et de l'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. O.R.S.T.O.M Abidjan, 129p + fig. ht. Abidjan.
- COUREL M.F., 1977. Etude géomorphologique des dunes du Sahel (Niger nord-occidental - Haute-Volta septentrionale). Thèse 3ème cycle, Uni. Paris VII, 284p.
- COUREL M.F., 1985. Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'état, Uni. Paris I, 407p + ann.
- DE ROSNAY J., 1975. Le microscope - vers une vision globale. Seuil (Points), 295p. Paris.
- DELFOUR J., JEAMBRUN M., 1970. Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000 - Oudalan. Edit B.R.G.M., 74 rue de la Fédération, 45p + 1 carte. Paris.
- DEROO (M.), DUSSAIX (A.M.), 1980. Pratique et analyse des enquêtes par sondage. Presses Universitaires de France, 217p. Paris.
- DESBOIS M., et al., 1988. Characterization of some elements of the sahelian climate and their interannual variations for july 1983, and 1985 from the analysis of Meteostat ISCCP data. American Meteorological Society, B4211, T 1, 8. pp 1-38. New York.
- DEVINEAU J. L., FOURNIER A., LAMACHERE J.M., 1986. Programme d'évaluation préliminaire SPOT, PEPS n°149 SPOT-OURSI; rapport intermédiaire, 52p. O.R.S.T.O.M Ougadougou.
- DIDAY J., et al, 1980. Optimisation en classification automatique. Tomes 1 et 2. Publication de l'I.N.R.I.A., 78150 Le Chesnay, 896p. Rocquencourt.
- DOMERGUE J.L., CHANZY A., 1987. Les outils satellitaires et les produits Agrhymet. Veille climatique satellitaire, n° 16, pp 32-48. Lannion.

- GROUZIS M., 1987. Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (Mare d'Oursi, Burkina-Faso). Thèse de doctorat d'état Uni. Paris Sud. Orsay, 336p.
- GUYOT G , 1984. Caractérisation spectrale des couvert végétaux dans le visible et le proche infrarouge. Application à la télédétection. Bul S.F.P.T n°95, pp 5-22.
- I.N.S.D , 1975. République de Haute-Volta, Recensement National de 1975. I.N.S.D , Ougadougou , 2 tomes. Ougadougou.
- I.N.S.D , 1986. République du Burkina-Faso, Recensement National de 1975. I.N.S.D , Ougadougou , 2 tomes. Ougadougou.
- JANEAU J. L. , LAMACHERE J M 1988. Caractérisation des principales surfaces élémentaires de la région d'Oursi. PEPS SPOT-Oursi, Rapport intermédiaire, septembre 1988 O.R.S.T.O.M-CNES, 33p. O.R.S.T.O.M Ougadougou.
- JOLY F., 1976. La cartographie. P.U.F. , Collection Magellan, 276p. Paris.
- JOLY F., DEWOLF Y., RIOU G., 1980. Le bassin de la mare d'Oursi. Etude géomorphologique et géodynamique. Contraintes naturelles. Travaux de laboratoire de géographie physique n° 7. Paris VII, 65p + ann. + cartes ht. Paris.
- JOURNAL OFFICIEL , 1984. Arrêté du 25 septembre 1984 relatif à l'enrichissement du vocabulaire de télédétection aérospatiale. Journal Officiel, 20 octobre 1984.
- LAHUEC J.P., CARN M., GUILLOT B., 1986. Convection et pluviométrie en Afrique de l'Ouest. Bilan provisoire pour la saison 1986. 1er mai-31 octobre. Veille climatique satellitaire. Bull n° 15, pp 19-24. Lannion.
- LEPRUN J. C. ,1977. Esquisse pédologique à 1/50.000 ème des alentours de la mare d'Oursi avec notice et analyse des sols. ACC-D.G.R.S.T/O.R.S.T.O.M, 53p. Ougadougou.
- LEPRUN J. C. ,1977. Rapport de mission pédologique. ACC-D.G.R.S.T/O.R.S.T.O.M, 19p + 1 carte. Ougadougou.
- MILLEVILLE P., 1982. Etude d'un système de production agro-pastoral sahélien de haute-volta 1ere partie: le système de culture., 66p. O.R.S.T.O.M Ouagadougou.
- PERETTI M ,1976. Projet mise en place de l'O.R.D. du Sahel. Situation actuelle de l'O.R.D. Ministère du Développement Rural, Burkina-Faso, 2 tomes. Ougadougou.
- PION JC., 1979. Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute-Volta. Thèse d'Etat, Institut de Géologie. Strasbourg, 220p + ann. Strasbourg.
- RIOU G. , 1986. Vous avez dit glaci...? Pour Fernand Joly. Paris C.E.R.C.G, 91 rue Saint Jacques, pp 505-521. Paris.
- ROUAMBA J. , 1983. Rapport de stage de fin de deuxième année, O.R.D. du Sahel. Ministère du développement rural, Burkina-Faso, 50p. Ougadougou.
- 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, pp 309-317.
- SCHERRER B., 1984. Biostatistique. Gaëtan Morin Editeur, 850p. Québec.

- SICOT M. , 1978. Cycle de l'eau et bilan hydrique dans les écosystèmes types du bassin de la mare d'Oursi. Rapp. ACC-D.G.R.S.T /O.R.S.T.O.M Ouagadougou, 76p + ann. Ouagadougou.
- SIMONIN A., VERCESIL L., 1981. Télédétection des phénomènes géomorphologiques dans le bassin de la mare d'Oursi (Haute-Volta) Revue Méditerranée. Univ.Aix-en-Provence n°2, pp 75-78. Aix-en-Provence.
- TOUTAIN B., 1976. Notice de la carte des ressources fourragères au 1/50.000 ème. ACC-D.G.R.S.T/I.E.M.V.T., 61p - 1 carte. Maison Alfort.
- TOUTAIN B., 1978. Etude des effets de la mise en repos temporaire de quelques formations végétales sahéliennes dégradées sur leur évolution. D.G.R.S.T-I.E.M.V.T. , 67p. Maison Alfort.
- TRAUBE L., 1985. Analyses radiométriques et caractérisation des différences locales de l'état de surface des formations loessiques de la région d'Ermenonville. Mémoire de DEA, Paris VI, 121p.
- VALENTIN Ch., 1981. Esquisse au 1:25.000 des différenciations morpho-structurales de la surface des sols d'un petit bassin versant sahélien (Polaka-Oursi, Nord Haute-Volta). O.R.S.T.O.M. Abidjan.
- VALENTIN Ch., 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques. thèse 3ème cycle, U.E.R. Sc. Phys. de la Terre, Université Paris VII, 221 p.+ ann.
- VOLLE M., 1985. Analyse des données. Economica, 323p. Paris.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	: 1
PREMIERE PARTIE : METHODOLOGIE	
CHAPITRE I	
Contexte de l'étude.	: 5
1 : le choix de l'outil	: 5
2 : le choix de la région d'étude	: 6
CHAPITRE II	
Télédétection satellitaire et perception du paysage.	: 9
1 : caractéristiques des satellites	: 9
1.1 : objectivité des mesures satellitaires	: 9
1.2 : acquisition de l'information sur différentes bandes spectrales.	: 10
1.3 : comparaison entre vues, études synchrones sur de grands espaces.	: 10
1.4 : répétitivité des vues	: 11
2 : le pixel	: 11
3 : relation entre mesures radiométriques et paysage	: 11
3.1 : la notion d'échelle	: 12
3.1 : partition de l'image	: 12
3.2 : réflectance des objets	: 12
conclusion	: 12
CHAPITRE III	
Principes de l'analyse des unités dynamiques.	: 13
1 : les états de surface	: 13
1.1 : les états de surface en télédétection satellitaire	: 13
1.2 : les états de surface en sciences de la nature	: 14
1.3 : comparaison des deux définitions	: 15
2 : les problèmes relatifs à la classification des données	: 15
2.1 : démarche dirigée	: 15
2.2 : démarche non-dirigée	: 16
3 : schéma d'ensemble pour l'analyse des unités dynamiques	: 16
4 : méthode de recherche des unités radiométriques stables	: 18
4.1 : extraction de la population échantillon	: 20

4.2 : classification automatique	: 20
4.3 : calcul du nombre maximum de classes	: 21
4.4 : partition de la population échantillon	: 24
4.5 : évaluation de l'intervalle de stabilité	: 25
4.6 : filiation des classes	: 26
4.7 : critères de stabilité des classes	: 28
4.7.1 : logique du raisonnement	: 29
4.7.2 : critère de stabilité des signatures spectrales	: 30
4.7.3 : critère de stabilité quantitative	: 31
4.8 : classification de l'image	: 32
5 : image des dynamiques du paysage	: 34
5.1 : principes de constitution d'une image dynamique	: 34
5.2 : formation de l'image multirate	: 34
5.3 : unités majeures relatives et unités variantes	: 36
5.4 : la signification des unités et les variables d'états et de flux :	: 40
6 : l'analyse des sous classes : la classification pyramidale	: 41
conclusion	: 41

DEUXIEME PARTIE : APPLICATION DE LA METHODE

Analyse d'un bassin versant sahélien

CHAPITRE IV

Cadre géographique régional de l'Oudalan.	: 47
1 : l'Oudalan région sahélienne	: 47
2 : les conditions du milieu	: 47
2.1 : géologie	: 43
2.2 : les unités du paysage	: 50
2.3 : le micro climat sahélien	: 51
2.3.1 : alternance saisonnière	: 51
2.3.2 : la pluviométrie	: 52
3 : la population de l'Oudalan	: 54
3.1 : les pasteurs	: 54
3.2 : les sédentaires	: 55
conclusion	: 55

CHAPITRE V

Le bassin de la mare d'Oursi.: 52

1 : les documents de référence	: 57
1.1 : cartes et photographies aériennes	: 57
1.1.1 : les cartes thématiques	: 57
1.1.2 : les documents satellitaires	: 58
1.2 : les photographies aériennes	: 58
2 : le milieu physique	: 58
2.1 : les massifs et buttes	: 60
2.2 : les glacis	: 60
2.3 : les dépressions	: 60
2.4 : les systèmes dunaires	: 61

3 : les variables climatiques	: 61
4 : la végétation	: 64
5 : schéma d'ensemble	: 65
conclusion	: 65

CHAPITRE VI

Les données satellitaires, les données terrain.	: 77
---	------

1 : choix des dates : 71	
1.1 : les dates retenues	: 77
1.2 : caractéristiques des prises de vues sélectionnées	: 78
1.3 : sélection du cadre de travail	: 78
2 : choix des paramètres images	: 80
2.1 : les variables images disponibles	: 80
2.2 : sélection des axes factoriels	: 81
3 : les réalités terrain	: 82
3.1 : situation climatique au 4 septembre 1986	: 82
3.2 : situation climatique au 17 décembre 1986	: 83
conclusion	: 83

CHAPITRE VII

Traitements de l'image SPOT-HRV du 4 septembre 1986.	: 91
--	------

1 : stratification de l'image	: 91
2 : interprétation	: 94
2.1 : classification de l'image	: 94
2.2 : étude statistique des classes	: 95
2.3 : contrôles avec les documents de référence au sol	: 103
2.3.1 : contrôle du contexte topographique et géomorphologique	: 103
2.3.2 : contrôles à l'aide des réalités terrain	: 107
2.4 : interprétation finale	: 112
conclusion	: 112

CHAPITRE VIII

Traitements de l'image SPOT-HRV du 17 décembre 1986.	: 113
--	-------

1 : stratification de l'image	: 113
2 : interprétation	: 116
2.1 : classification de l'image	: 116
2.2 : étude statistique des classes	: 117
2.3 : contrôles avec les documents de référence au sol	: 124
2.3.1 : contrôle du contexte topographique et géomorphologique	: 124
2.3.2 : contrôles à l'aide des réalités terrain	: 129
conclusion	: 131

CHAPITRE IX

Etude de la dynamique des unités du paysage.	: 133
1 : comparaison des deux images	: 133
2 : génération des unités multidates	: 134
3 : recherche des unités majeures relatives	: 136
3.1 : signification des U.M.R	: 136
3.2 : obtention des U.M.R 4 septembre - 17 décembre	: 136
3.3 : interprétation des U.M.R	: 137
3.3.1 : documents de contrôle	: 137
3.3.2 : évolution des U.M.R	: 140
4 : dynamique des unités variantes	: 140
4.1 : élaboration des documents interprétatifs	: 140
4.2 : interprétation des unités variantes	: 145
4.3 : les autres unités variantes	: 154
5 : dynamique des unités variantes	: 155
5.1 : comment fonctionne l'analyse dynamique ?	: 155
5.2 : dynamique de la morphogénèse	
du bassin d'Oursi et de sa région dunaire	: 155
5.2.1 : évolution des glacis	: 155
5.2.2 : évolution des dunes et des placages sableux	: 159
conclusion	: 160

TROISIEME PARTIE : LES EMBOITEMENTS D'ECHELLES
Echelle spatiale et échelle spectrale

CHAPITRE X

Extension à la scène SPOT toute entière.	: 165
1 : échelle spatiale - échelle spectrale	: 165
1.1 : structure de l'image	: 166
1.2 : texture de l'image - échelle spectrale	: 167
2 : région d'étude	: 167
2.1 : image du 4 septembre 1986 : scène entière	: 168
2.1 : image du 17 décembre 1986 : scène entière	: 172
3 : l'image multidate : scène entière	: 176
3.1 : les unités majeures relatives	: 176
3.2 : les unités variantes	: 176
3.3 : interprétation des classes multidates	: 180
3.4 : analyse des dynamiques agissant sur le paysage	: 180
3.4.1 : dynamique induite par le réseau hydrographique	: 181
3.4.2 : dynamique de la formation des glacis	: 181
3.4.3 : dynamique anthropique	: 181
conclusion	: 182

CHAPITRE XI

Analyse des sous-classes sableuses, image du 4 septembre 1986.	: 185
1 : préambule	: 185
2 : l'étude des classes sableuses	: 186
2.1 : étude de l'unité SC2 "sables"	: 186
2.2 : étude de l'unité SC7 "végétation sur sables éoliens"	: 187
3 : interprétation des sous-classes sableuses	: 188
3.1 : le parcellaire agricole	: 189
3.2 : analyse des versants du bassin du Gountouré	: 189
conclusion	: 191

CONCLUSION	: 193
-------------------	--------------

ANNEXE I

Type 45 : Surface à recouvrement sableux éolien épais sur jupe de piémont et dunes fixées ; erg ancien.

1 - Couvert herbacé abondant = type 45 a

1 bis - ou culture de mil induit un changement de groupe = n° 1

Ki de 60 à 75 % = type 45 b.

2 - Pellicule fragile et discontinue (50 %) à porosité vésiculaire fine et discontinue.

3 - Sables déliés d'épaisseur supérieure ou égale à 10 mm.

4 - Prise en masse des sables.

Matrice du sol sous-jacent déliée à tendance massive et texture sableuse. Bon enracinement, zone de culture et de pâturage

Localisation pédo-géographique : erg ancien et jupes de piémont.

Parcelle élémentaire : Type 45a : Ki de 60 à 75 %, sous végétation naturelle.

Surface de type dessication : DES

Type 45b : Ki de 40 à 60 %, sous culture de mil. Surface de type cultivé 2 : C2.

TYPE 46 : Surface à pellicule rebroussée.

1 - 75 % de la surface couverte de végétation herbacée couchée (*Schoenefeldia gracilis*) et de graines poilues plantées dans 2.

2 - Pellicule rebroussée à texture fine, épaisseur 1 mm, largeur des squames 30 mm, solidaire de 3.

3 - Sables fins à moyens, partiellement pris en masse.

4 - Pellicule facultative, caractéristiques très proches de 2.

5 - Plusieurs successions 2 plus 3 jusqu'à une profondeur de 20 mm, la dernière pellicule à texture fine étant solidaire de 6.

6 - Premier horizon du profil D (VALENTIN 1981).

Localisation pédo-géographique : sols vertiques, proximité marigot, zone hydromorphe.

Surface élémentaire : Ki de 20 à 35 %.

surface de type décantation : DEC

TYPE 47 : Surface à recouvrement pelliculaire desquamé des dépressions topographiques.

1 - Pellicule desquamée épaisse de plus de 1 mm.

2 - Porosité vésiculaire sous-jacente.

3 - 10 à 20 mm de micro-horizons pelliculaires.

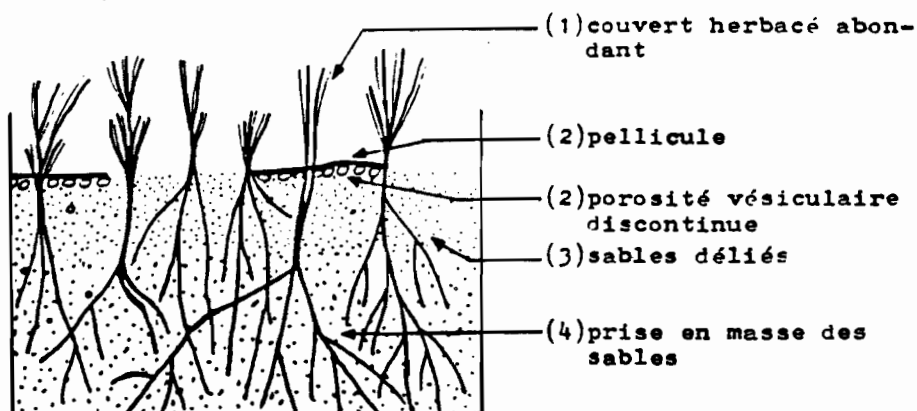
Matrice du sol sous-jacent déliée et texture sableuse.

Localisation pédo-géographique : dépressions topographiques.

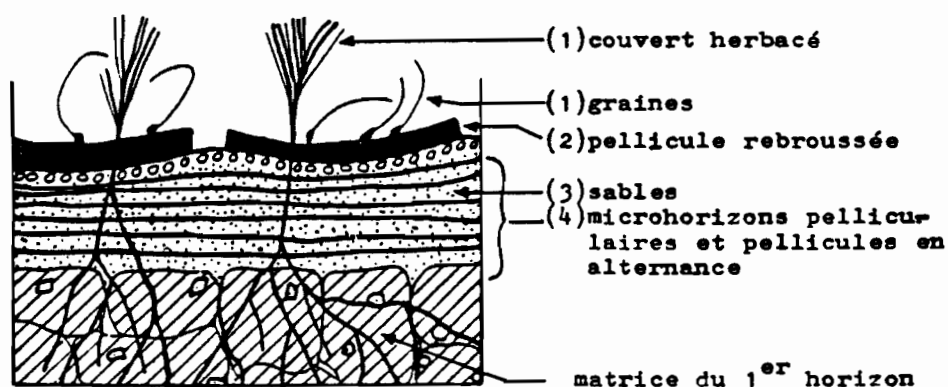
Surface élémentaire : Ki de 20 à 35 %.

surface de type décantation : DEC

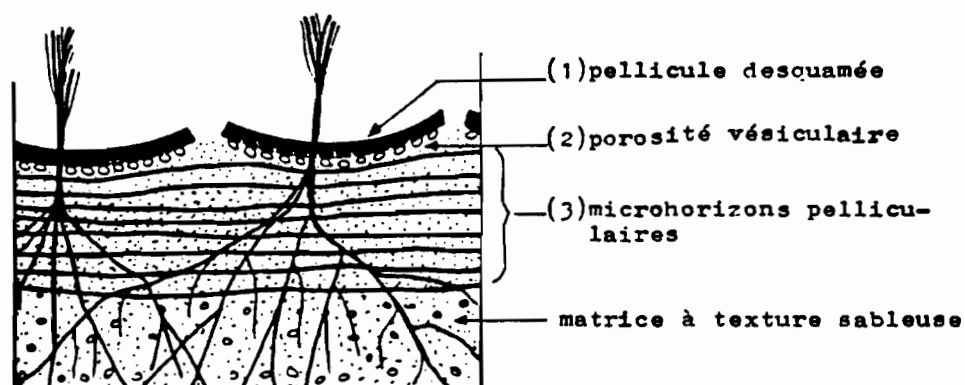
QUELQUES ETATS DE SURFACES RELEVES SUR LE BASSIN DE LA MARE D'OURSI
(Janeau J.L., Lamachère J.M., 1988)



Type 45 SURFACE A RECOUVREMENT SABLEUX EOLIEN
EPAIS SUR JUPE DE PIEMONT ET DUNES FIXEES



Type 46 SURFACE A PELLICULE REBROUSSEE



Type 47 SURFACE A RECOUVREMENT PELLICULAIRE
DESQUAME DES DEPRESSIONS TOPOGRAPHIQUES

TYPE 35 : Surface à recouvrement sableux éolien, enherbée sur jupes sableuses de piémont.

1 - Zone de pâturage, de 10 à 80 % d'enherbement suivant la saison d'observation.

2 - Recouvrement sableux éolien d'épaisseur : 100 mm.

3 - Débris de micro-horizons pelliculaires de 20 à 30 mm d'épaisseur plus ou moins enfouis dans les sables.

Micro-relief d'amplitude 0-100 mm dû au piétinement des animaux.

Activité faunique : trous de petits mammifères.

Matrice de l'horizon sous-jacent déliée et texture sableuse

Localisation pédo-géographique : jupes sableuses de piémont.

Surface élémentaire : Ki de 60 à 75 %.

surface de type dessication : DES

TYPE 36 : Surface à recouvrement sableux éolien sur jupes de piémont et dunes vives.

1 - Sables bouillants, épaisseur de 60 à 80 mm.

2 - Succession de stries éoliennes à texture fine et sableuse sur une profondeur de 200 mm, pellicules de dépôts éoliens.

Structure lamellaire et texture sableuse.

Localisation pédo-géographique : Jupes sableuses de piémont et dunes vives.

Surface élémentaire : Ki de 85 à 100 %.

surface de type dessication : DES

variante sol sableux.

TYPE 37 : Surface à recouvrement sableux éolien enherbée sur dunes et aval de jupes de piémont.

1 - Débris végétaux et paille de mil en recouvrement de 5 à 20 %.

2 - Sables grossiers déliés en surface.

3 - 10 à 20 mm de sables fins, pris en masse.

4 - Pellicule à 1 ou 2 micro-horizons et à fort micro-relief induit par l'action du vent.

5 - Porosité vésiculaire fine et discontinue.

Matrice de l'horizon sous-jacent déliée à tendance massive et texture sableuse.

Bonne activité racinaire.

Localisation pédo-géographique : erg récent.

Surface élémentaire : Ki de 15 à 25 %.

surface de type structurale : ST3

De 40 à 49 : Pellicules plasmiques.

TYPE 40 : Surface à pellicule plasmique.

1 - Pellicule à texture fine, épaisseur 0,4 mm, réseau de fentes non généralisé largeur 0,1 mm, espacement 20 mm, 75 % de surface fracturée (piétinement du bétail avec 2), peu de desquamation.

2 - Microhorizon pris en masse, épaisseur 2 à 3 mm, texture fine avec quelques sables grossiers, 80 % de porosité vésiculaire diamètre 0,8 mm.

3 - Sables fins déliés, microhorizon facultatif, épaisseur 5 mm (sables éoliens recouverts par produits de ruissellement en nappes ?).

4 - Microhorizon facultatif identique à 1, solidaire du premier horizon du profil type D, (VALENTIN, 1981).

Localisation pédo-géographique : Glacis.

Surface élémentaire : K_i de 10 à 20 %.
surface de type érosion : ERO

TYPE 41 : Surface à pellicule plasmique et éléments grossiers enchassés.

1 - Quelques grains de quartz, quartzites, et gravillons ferrugineux recouvrant moins de 1 % de la surface.

2 - Pellicule indurée, pellicule d'érosion.

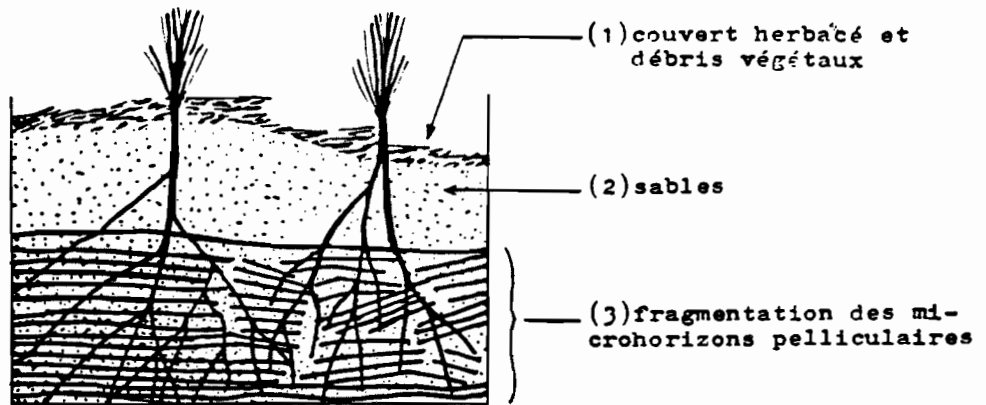
3 - Porosité vésiculaire très discontinue.

4 - Prise en masse des sables sous-jacent sur 10 à 20 mm d'épaisseur.

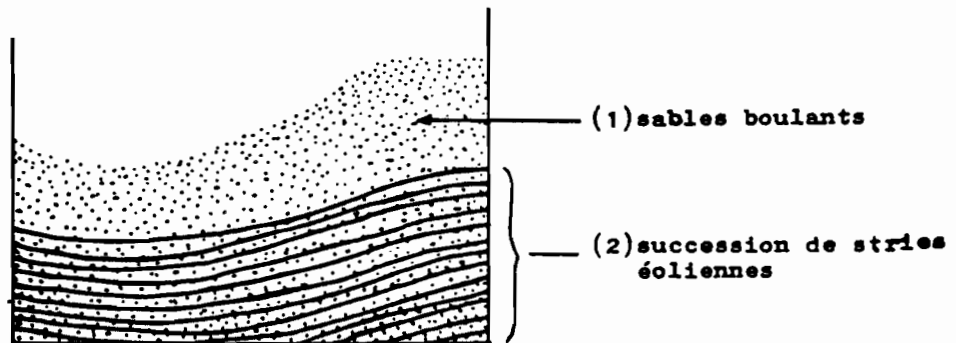
Matrice de l'horizon sous-jacent de structure à tendance massive et texture à sables grossiers et quelques petits ; gravillons (2 à 6 mm de diamètre).

Localisation pédo-géographique : Glacis sur arène granitique.

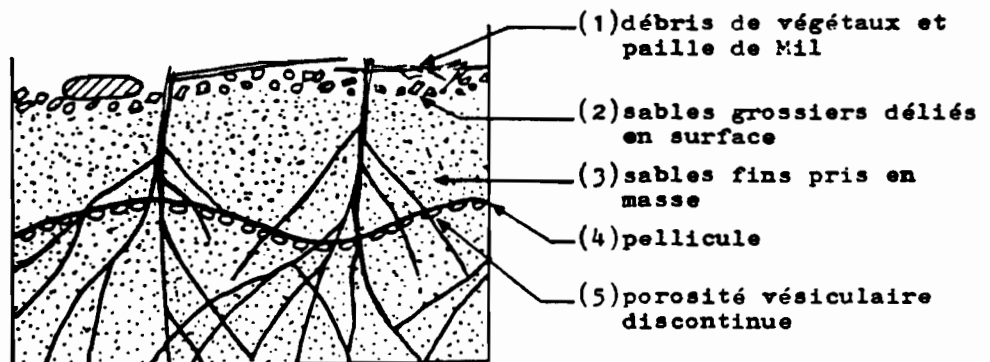
Surface élémentaire : K_i de 10 à 20 %.
surface de type érosion : ERO



Type 35 SURFACE A RECOUVREMENT SABLEUX EOLIEN ENHERBEE SUR JUPES SABLEUSES DE PIEMONT



Type 36 SURFACE A RECOUVREMENT SABLEUX EOLIEN SUR JUPES SABLEUSES DE PIEMONT ET DUNES VIVES



Type 37 SURFACE A RECOUVREMENT SABLEUX EOLIEN ENHERBEE SUR DUNES ET AVAL DE JUPES DE PIEMONT

De 40 à 49 : Pellicules plasmiques.

TYPE 40 : Surface à pellicule plasmique.

1 - Pellicule à texture fine, épaisseur 0,4 mm, réseau de fentes non généralisé largeur 0,1 mm, espacement 20 mm, 75 % de surface fracturée (piétinement du bétail avec 2), peu de desquamation.

2 - Microhorizon pris en masse, épaisseur 2 à 3 mm, texture fine avec quelques sables grossiers, 80 % de porosité vésiculaire diamètre 0,8 mm.

3 - Sables fins déliés, microhorizon facultatif, épaisseur 5 mm (sables éoliens recouverts par produits de ruissellement en nappes ?).

4 - Microhorizon facultatif identique à 1, solidaire du premier horizon du profil type D, (VALENTIN, 1981).

Localisation pédo-géographique : Glacis.

Surface élémentaire : Ki de 10 à 20 %.
surface de type érosion : ERO

TYPE 41 : Surface à pellicule plasmique et éléments grossiers enchassés.

1 - Quelques grains de quartz, quartzites, et gravillons ferrugineux recouvrent moins de 1 % de la surface.

2 - Pellicule indurée, pellicule d'érosion.

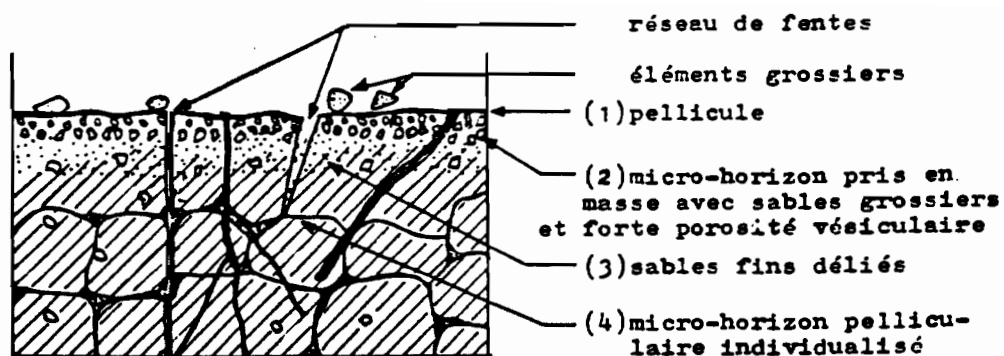
3 - Porosité vésiculaire très discontinue.

4 - Prise en masse des sables sous-jacent sur 10 à 20 mm d'épaisseur.

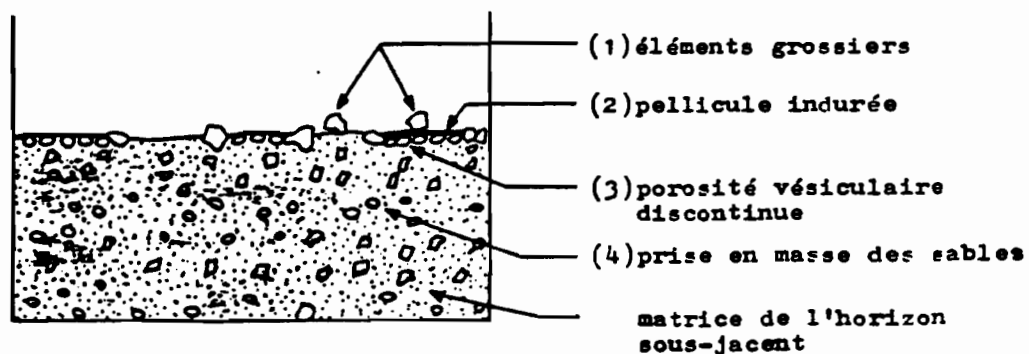
Matrice de l'horizon sous-jacent de structure à tendance massive et texture à sables grossiers et quelques petits ; gravillons (2 à 6 mm de diamètre).

Localisation pédo-géographique : Glacis sur arène granitique.

Surface élémentaire : Ki de 10 à 20 %.
surface de type érosion : ERO



Type 40 SURFACE A PELLICE PLASMIQUE



Type 41 SURFACE A PELLICULE PLASMIQUE ET
ELEMENTS GROSSIERS ENCHASSES

ANNEXE II

PARAMETRES DES SCENES

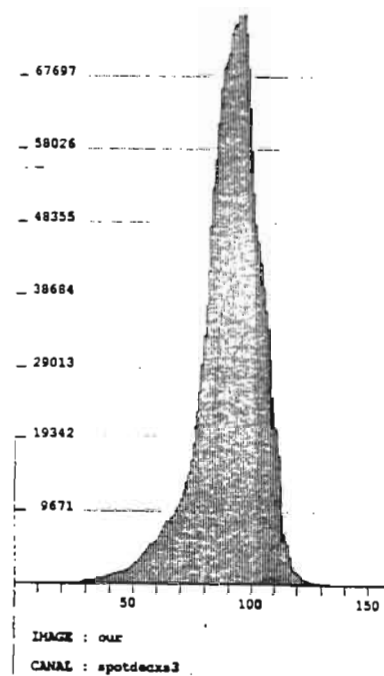
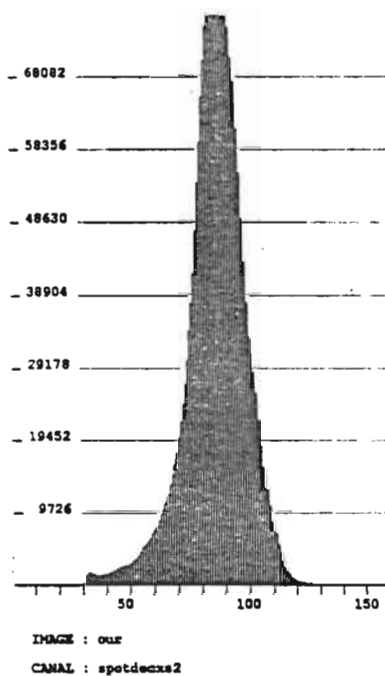
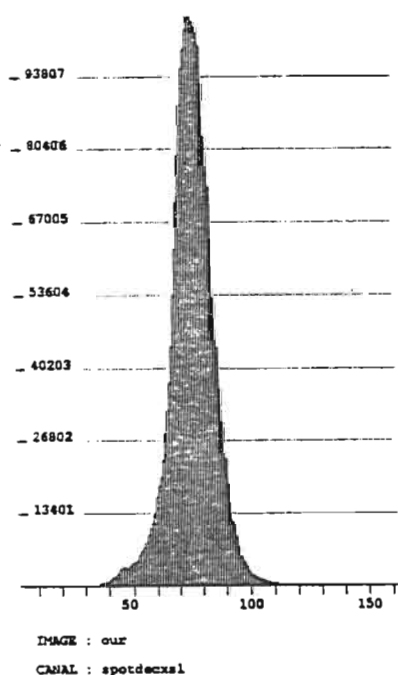
Image du 4 septembre 1986

Image SPOT : Canal	HRV n°	Année	Mois	Jour	Heure	Min	Sec
S1	H1	86	09	04	10	35	55
Trace:	55						
Rang :	321						
0000001	W3600131						
Coord. du centre de la scène:	N0143115				Ligne n°:	1501	
:	W0002531				Colonne		n°: 1641
Coord. du point Haut/Gauche:	N0144943				Ligne n°:	0001	
:	W0003853				Colonne		n°: 0197
Coord. point C2 :	N0144438	W0000507			0001		3262
Coord. point C3 :	N0141752	W0004606			3003		0001
Coord. point C4 :	N0141247	W0001225			3003		3066
Coordonnées du NADIR : Latitude		: N0141518					
: Longitude		: E0004707					
Angle de visée: R 10.4							
Soleil : Azimuth		: +106.1					
: Elévation:		068.0					

Image du 17 décembre 1986

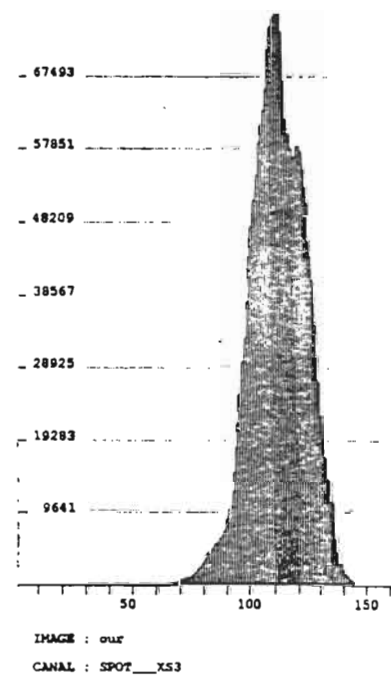
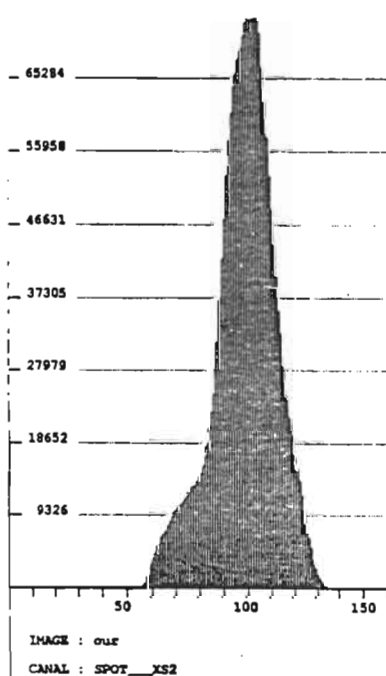
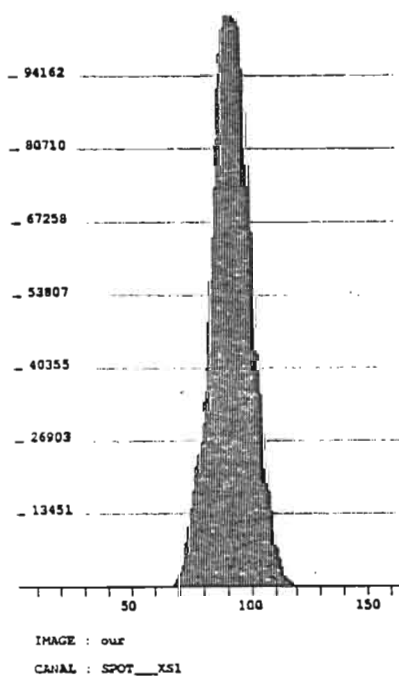
Image SPOT : Canal	HRV n°	Année	Mois	Jour	Heure	Min	Sec
S1	H1	86	12	17	10	35	36
Trace:	055						
Rang :	321						
0000001	W3600214						
Coord. du centre de la scène:	N0143115				Ligne n°:	1501	
:	W0002614				Colonne		n°: 1641
Coord. du point Haut/Gauche:	N0144943				Ligne n°:	0001	
:	W0003936				Colonne		n°: 0197
Coord. point C2 :	N0144438	W0000550			0001		3262
Coord. point C3 :	N0141752	W0004649			3003		0001
Coord. point C4 :	N0141248	W0001308			3003		3066
Coordonnées du NADIR : Latitude		: N0141519					
: Longitude		: E0004624					
Angle de visée: R 10.4							
Soleil : Azimuth		: +151.8					
: Elévation:		047.3					

Histogrammes des canaux



Scène entière

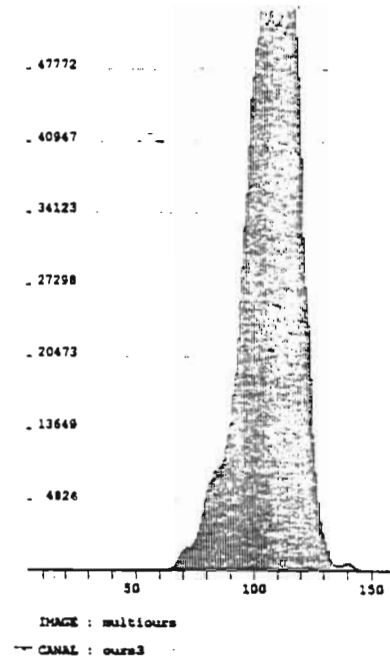
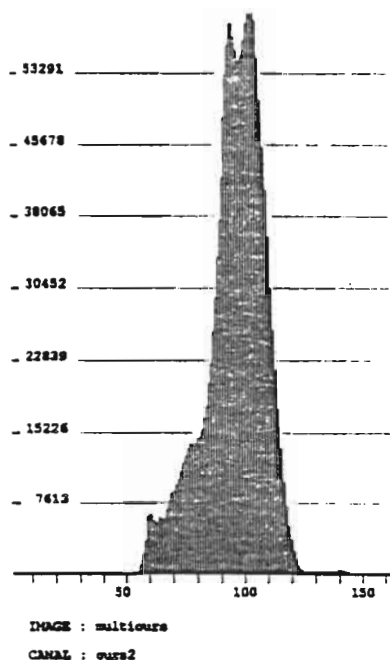
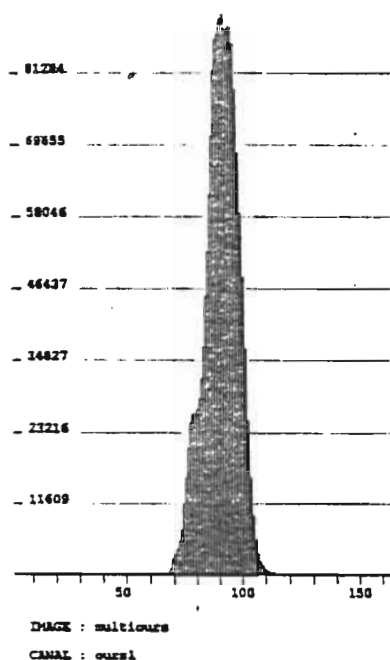
Image SPOT-HRV 4 septembre 1986



Scène entière

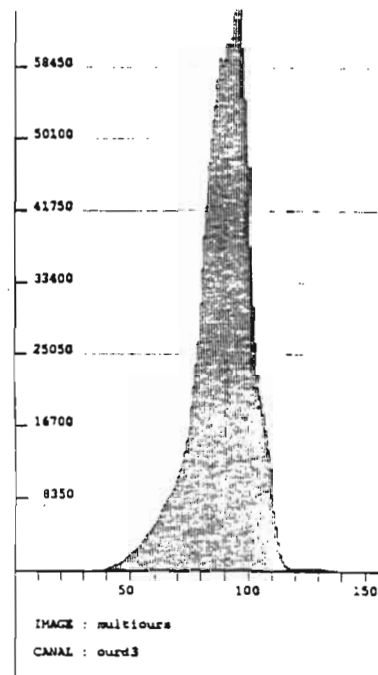
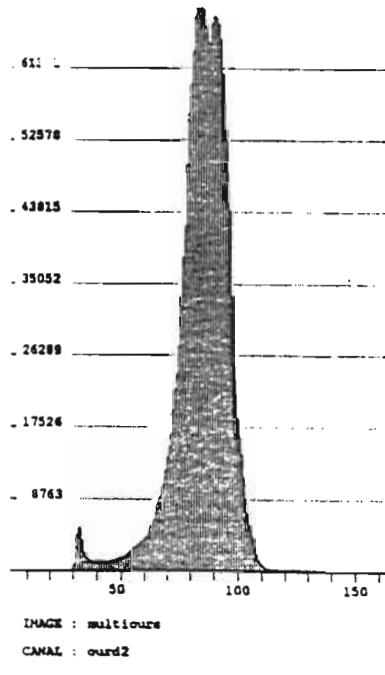
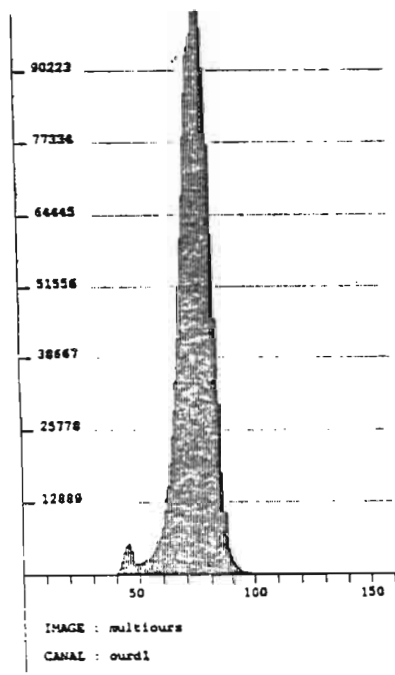
Image SPOT-HRV 17 décembre 1986

Histogrammes des canaux



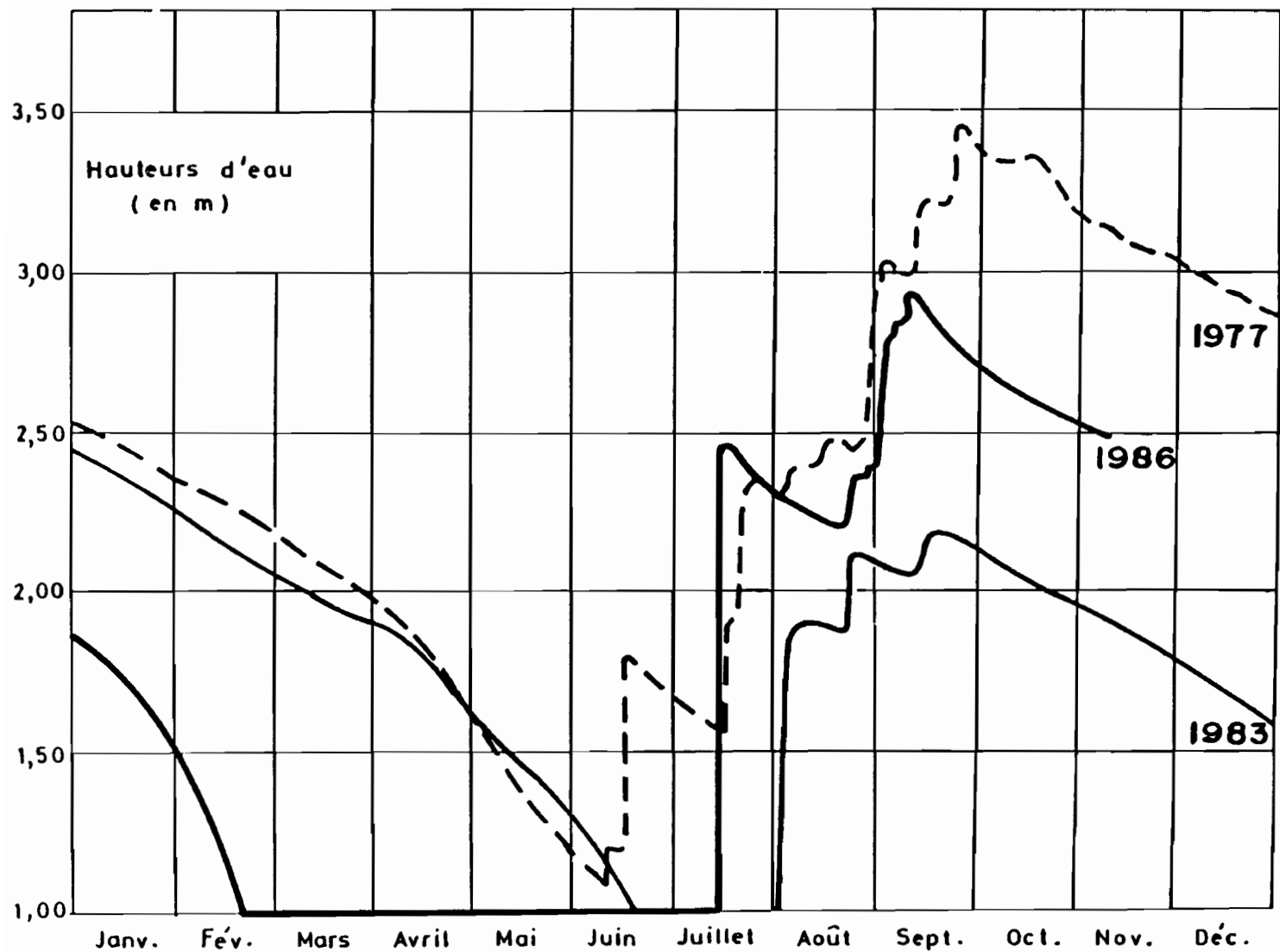
Bassin Oursi-Gontouré

Image SPOT-HRV 4 septembre 1986



Bassin Oursi-Gontouré

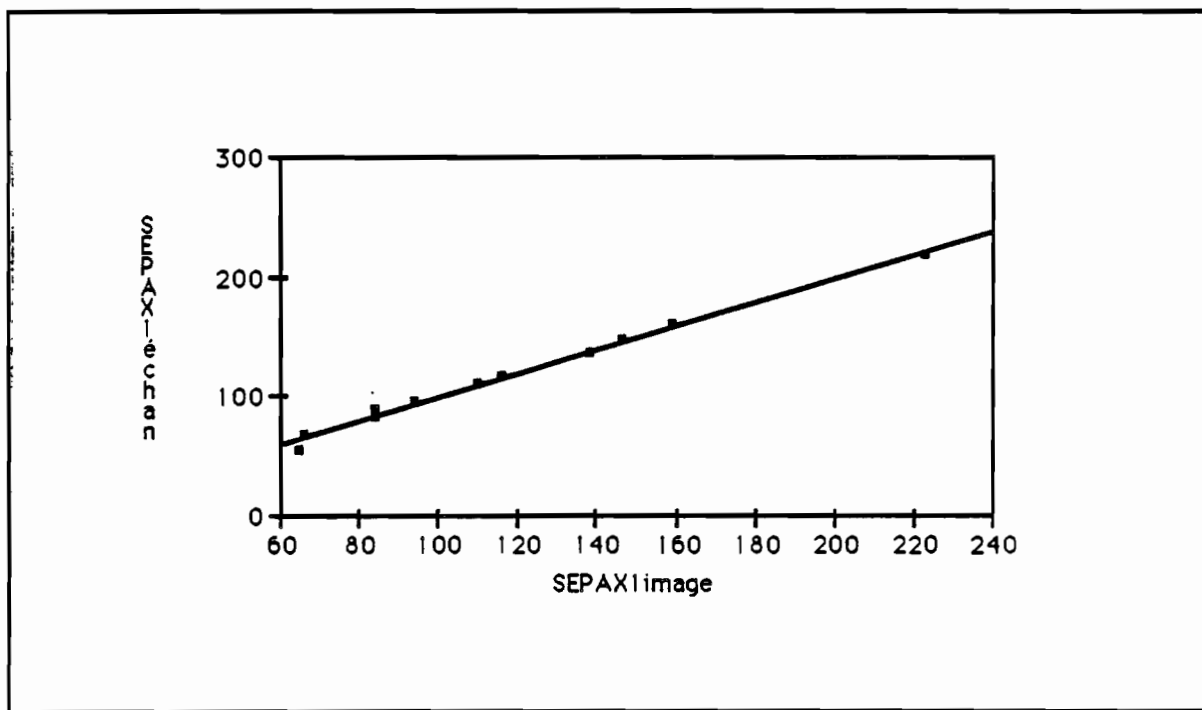
Image SPOT-HRV 17 décembre 1986



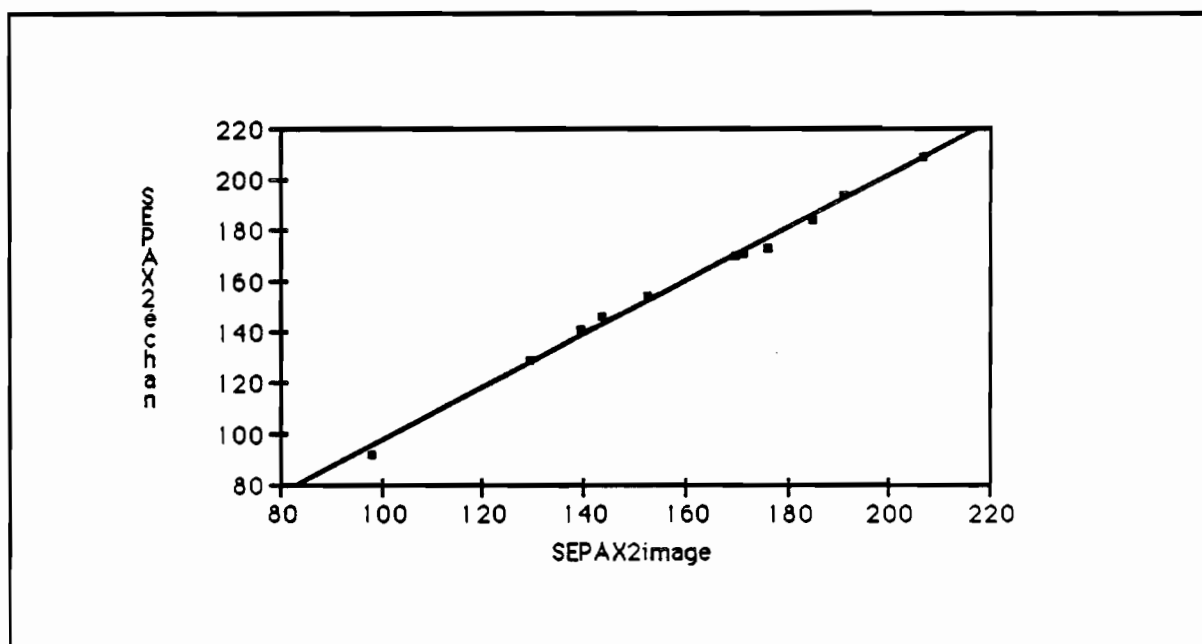
CHRONIQUES DES HAUTEURS D'EAU DE LA MARE D'OURSI

remarque : La mare s'assèche à la cote 1,00 mètre

CORRELATIONS POPULATION ÉCHANTILLON/POPULATION IMAGE
À PARTIR CENTRES DE CLASSES
 Image du 4 septembre 1986

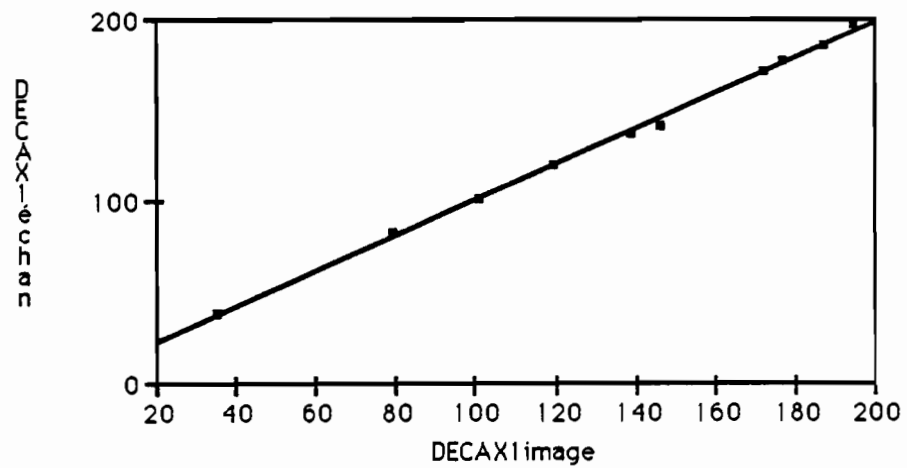


Axe factoriel 1

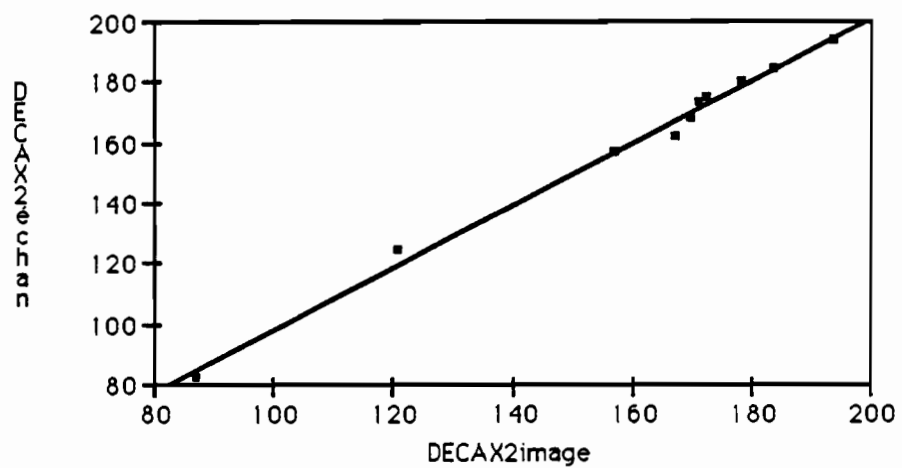


Axe factoriel 2

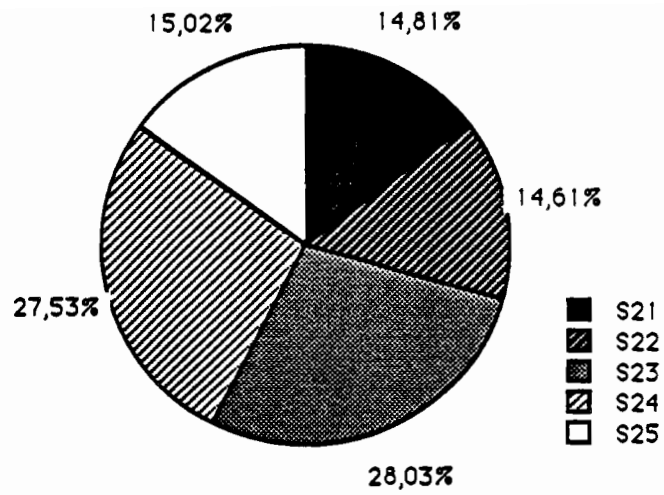
CORRÉLATIONS POPULATION ÉCHANTILLON/POPULATION IMAGE
À PARTIR DES CENTRES DE CLASSES
 Image du 17 décembre 1986



Axe factoriel 1

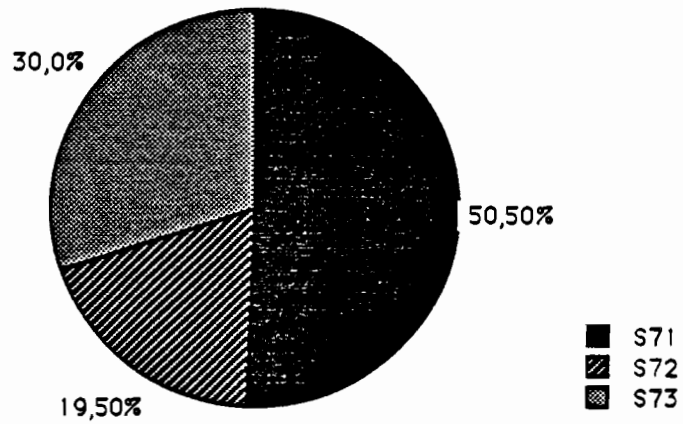


Axe factoriel 2



**POURCENTAGE DES SOUS-CLASSES ISSUES DE L'UNITE C2
PAR RAPPORT A LA SUPERFICIE TOTALE DE LA CLASSE**

Image du 4 septembre 1986



**POURCENTAGE DES SOUS-CLASSES ISSUES DE L'UNITE C7
PAR RAPPORT A LA SUPERFICIE TOTALE DE LA CLASSE**

Image du 4 septembre 1986