

# 11

## **Inondations au Bangladesh, étude préliminaire à l'aide de données SPOT 1**

DANIEL GUILLEMYN, MARIE-FRANCE BELLAN et FRANÇOIS BLASCO

*Institut de la carte internationale de la végétation, Unité associée 688 du Centre national de la recherche scientifique, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France*

### **Résumé**

Cette étude montre l'intérêt du système SPOT pour l'étude et la gestion des problèmes d'inondations au Bangladesh. L'utilisation optimale de ces images sur de grandes surfaces est faite par photo-interprétation, mais une perspective est ouverte pour leur exploitation numérique, notamment pour une application précise : la localisation rapide et la mesure des surfaces inondées. Les inondations concernent principalement le centre du pays. Des images sur plusieurs années, une en saison sèche, et une en saison humide quand se produit une inondation, semblent suffisantes pour assurer un suivi et une quantification du phénomène.

## **1 Introduction**

### **1.1 Généralités**

L'objet de cette étude est de montrer comment il est possible d'aborder la gestion des ressources en eau au niveau régional, à l'aide de données satellitaires de type SPOT.

Dans de nombreux pays de la zone intertropicale, l'excédent comme le manque d'eau occasionnent de nombreux problèmes. Il existe en quelques endroits des régions juxtaposées qui subissent des rythmes pluviaux opposés et complémentaires. Il est alors possible d'envisager d'utiliser l'excédent d'eau en un endroit pour le distribuer à un autre, où une sécheresse se fait sentir au même moment.

La première opération, dans cette perspective, est de caractériser le régime hydrique de la zone excédentaire. Il faut cartographier la répartition de l'excédent, ceci au cours du cycle annuel. Il faut caractériser le mode de retenue (étendue, profondeur), notamment à l'aide du modelé du terrain, pour enfin évaluer les quantités d'eau concernées.

Il paraît intéressant d'examiner comment la télédétection satellitaire SPOT peut contribuer à cette connaissance.

## **1.2 Localisation de la zone d'étude**

La surface étudiée se situe dans le plus vaste delta intérieur du monde constitué par le confluent des eaux venant du Gange, du Brahmapoutre et de la Meghna. La capitale du Bangladesh, Dacca, est située dans cette zone. La surface choisie est couverte par une image SPOT de type multispectral. Elle fait donc environ 60 km de côté (KJ 237-303). Elle couvre le confluent Gange-Meghna. La ville de Dacca se trouve dans le coin nord-ouest. La figure 1 montre la zone étudiée.

## **1.3 Climatologie**

Le Bangladesh connaît une alternance d'une saison sèche intense et d'une saison de pluies diluviennes. Ce pays est affecté presque chaque année par un ou plusieurs cyclones de force variable causant de nombreuses pertes. La partie continentale de ce pays est inondée par des eaux fluviales qui ne peuvent s'évacuer vers l'aval en raison des fortes marées (en situation météorologique dépressionnaire) et poussées de surcroît par des vents du sud. Ces inondations se produisent lors des pluies de mousson. En théorie, les deux tiers du pays sont submersibles.

Il n'est pas question de discuter ici des causes précises, mais principalement d'observer le phénomène et la contribution de la télédétection à sa quantification.

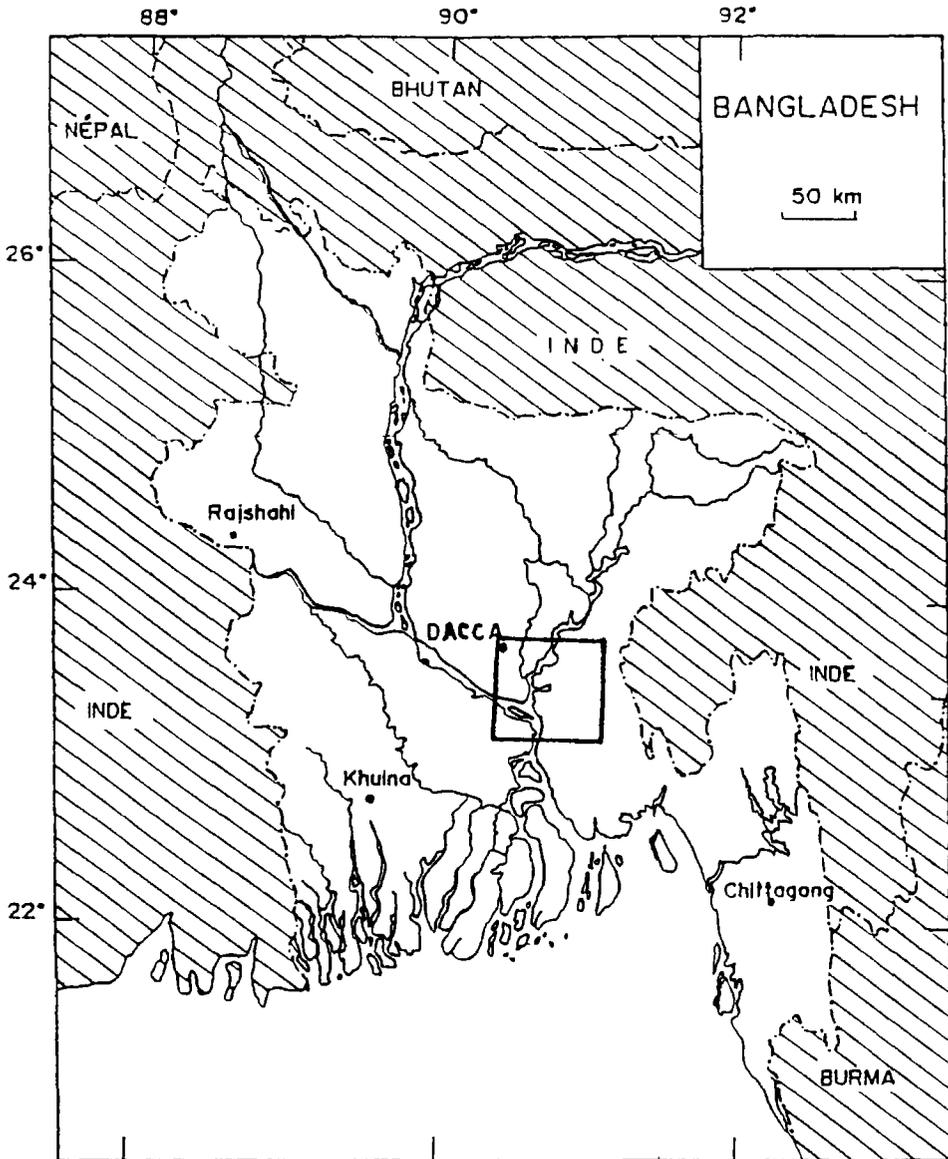
## **1.4 Les données utilisées**

Les données destinées à ce genre d'étude doivent être diachroniques. Un suivi au cours de l'année est donc souhaitable, tout au moins pour la phase de mise au point méthodologique. Une première investigation imposait une ou plusieurs vues en saison sèche, une ou plusieurs en saison des pluies, ceci sur plusieurs années. Le tableau I donne les dates d'acquisition.

**Tableau I.** Dates d'acquisition des images (cadre KJ 237-303)

Date	Saison
9 janvier 1987	Saison sèche
7 novembre 1987	Saison des pluies, inondation moyenne
10 octobre 1988	Saison des pluies, inondation importante

Deux autres images couvrant des zones de reforestation dans le sud du pays ont aussi été observées à des dates voisines. Les données sont obtenues sous forme de bandes magnétiques



**Figure 1.** Localisation de la zone d'étude et contour du cadre SPOT

numériques, mais aussi sous forme analogique : tirages photographiques en composition colorée fausses couleurs au 1:100 000 pour l'ensemble.

Ces images ont pu être obtenues aux bonnes dates, en grande partie grâce à la possibilité de programmation qu'offre le satellite.

## 2 Étude des données satellitaires

### 2.1 Interprétation classique des données

#### 2.1.1 Approche qualitative

##### a) Méthode

Une partie des travaux consiste à faire une photo-interprétation visuelle des tirages photographiques sur l'ensemble de chacune des trois images.

L'image de saison sèche sert à délimiter les entités de l'utilisation du sol. Elle permet de cartographier la limite de l'eau en cette période.

##### b) Résultats

Onze zones sont reconnues, principalement en rapport avec les variations géomorphologiques locales et l'occupation du sol. Ces zones sont représentées à la figure 2.

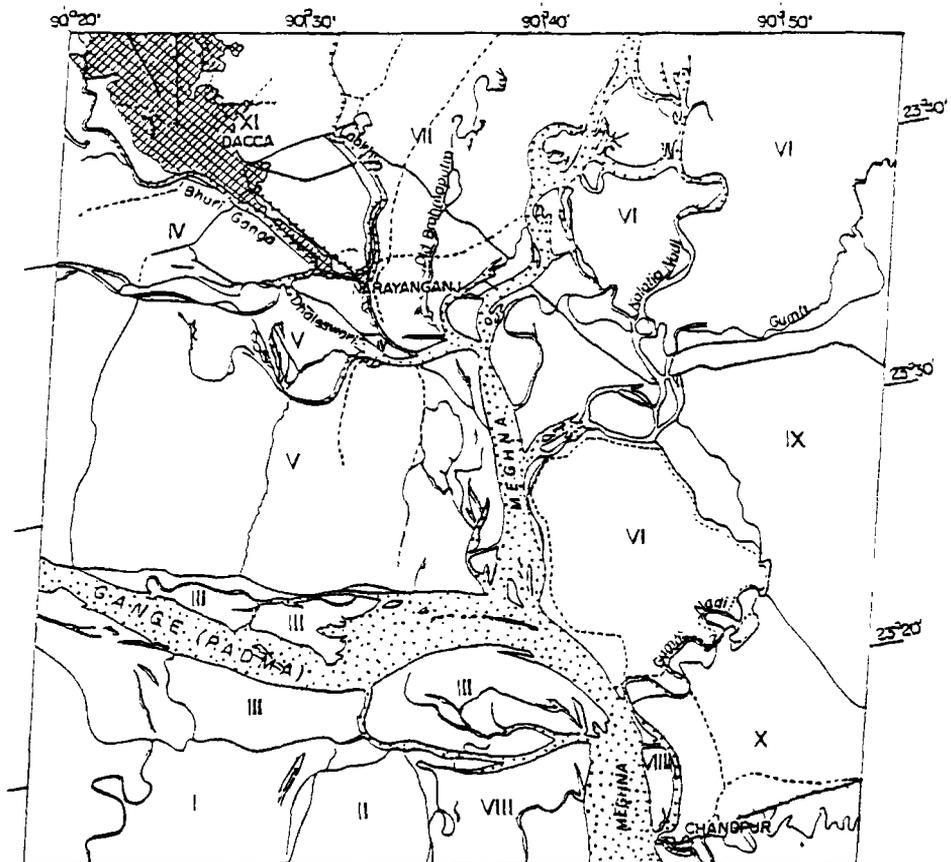


Figure 2. Zonage par photo-interprétation

La zone I est recouverte d'environ 1 à 1,5 m d'eau en période d'inondation moyenne.

La zone II, bien protégée par des digues, montre une bonne résistance à l'inondation. Seules les parties les plus basses ou mal protégées sont recouvertes lors de l'inondation la plus importante.

La zone III est constituée de sédiments très exposés aux inondations et fréquemment remaniés. L'inondation est très forte.

Les zones IV et V, relativement surélevées, ne sont envahies par l'eau que du côté ouest lors de la crue importante.

La zone VI est la plaine alluviale de la Meghna. Les ramifications du cours d'eau sont très complexes, la couleur de l'eau est différente d'un cours d'eau à l'autre. Ces couleurs sont utiles pour les études hydrodynamiques. Cette zone en apparence protégée en 1987 montre une inondation en 1988 qui pourrait être due à la rupture de digues.

La zone VII ne semble pas concernée par les inondations importantes, elle est constituée par un ancien bras du Brahmapoutre.

La zone VIII est le siège d'inondations importantes et sujette à de nombreux remaniements sédimentaires.

Les zones IX et X sont bien protégées.

La zone XI couvre la ville de Dacca et ses environs. La partie basse de la zone, notamment la rive gauche de la rivière Lakhya est inondée.

Dans le sud du pays, l'organisation du paysage reste assez constante. Les digues, souvent très hautes, jouent leur rôle de protection. Les grandes zones de reforestation en mangrove des zones côtières sont efficaces et l'inondation est peu importante.

La photo-interprétation permet d'établir la correspondance entre les sols argileux et limoneux observés en saison sèche et l'inondation de 1987. La cartographie des zones vulnérables et celle des régions protégées est opérationnelle. Les routes principales, pistes secondaires et voies de chemin de fer sont identifiables. Les routes intactes ou submergées, suivant l'ampleur de l'inondation, sont visibles. Les grands canaux d'irrigation sont apparents, leur état est observable.

### **2.1.2 Approche quantitative**

#### **a) Méthode**

Interprétation de la surface en eau : un document noir et blanc représentant en noir les surfaces recouvertes d'eau est réalisé sur film transparent par photo-interprétation. Ceci est fait pour les trois dates sur toute la surface des images. Ces films sont découpés en bandes et lus dans un appareil permettant de mesurer la quantité de noir par rapport à l'ensemble.

#### **b) Résultats**

Les pourcentages de surface en eau, pour chaque image entière de la région de Dacca, sont présentés au tableau II.

**Tableau II.** Surfaces couvertes en eau obtenues par photo-interprétation

Date	Surface en eau	Pourcentage
9 janvier 1987	512 km <sup>2</sup>	13%
7 novembre 1987	1050 km <sup>2</sup>	29%
10 octobre 1988	2010 km <sup>2</sup>	56%

Au-delà des chiffres, qu'il nous soit permis de faire remarquer l'ampleur catastrophique de ces inondations d'octobre 1988, où l'on voit la moitié de cette zone, très peuplée, recouverte par les eaux.

## 2.2 Traitement numérique des données

### 2.2.1 Sur la zone entière

#### a) Méthode

Le traitement numérique a été appliqué aux environs de la ville de Dacca sur une fenêtre de 512 par 512 pixels soit environ 10 km de côté. Il a aussi été réalisé sur une grande fenêtre rectangulaire couvrant une grande partie de l'image, obtenue par sous-échantillonnage d'un facteur 6 en lignes et en colonnes. L'approche quantitative a été privilégiée.

Le travail se fait tout d'abord par observation et interprétation de la composition colorée fausses couleurs sur écran. La délimitation de l'eau a été opérée par segmentation de l'histogramme du canal XS3, le transformant en plan binaire noir et blanc. Ce plan, qui remplace XS3, est affiché sur l'écran de visualisation en compagnie de XS2 et XS1, produisant ainsi une composition colorée améliorée du point de vue de la présence de l'eau. L'observation de cette image sert à retoucher la segmentation du canal XS3. On obtient une nouvelle image binaire de la scène. Cette image en noir et blanc permet de mesurer et de localiser la surface recouverte d'eau. Ce traitement est réalisé pour les trois dates.

#### b) Résultats

Les surfaces couvertes par l'eau sont présentées au tableau III.

**Tableau III.** Surfaces couvertes en eau obtenues par traitement numérique

Date	Surface en eau	Pourcentage
9 janvier 1987	324 km <sup>2</sup>	12%
7 novembre 1987	658 km <sup>2</sup>	26%
10 octobre 1988	1303 km <sup>2</sup>	51%

Il faut rappeler que la mesure est effectuée à l'intérieur d'une fenêtre de 2286 colonnes et 2742 lignes qui est la zone commune entre ces trois dates sur la partie disponible sous forme numérique.

Une comparaison de l'interprétation classique et du traitement numérique est permise à la figure 3 pour les trois dates.

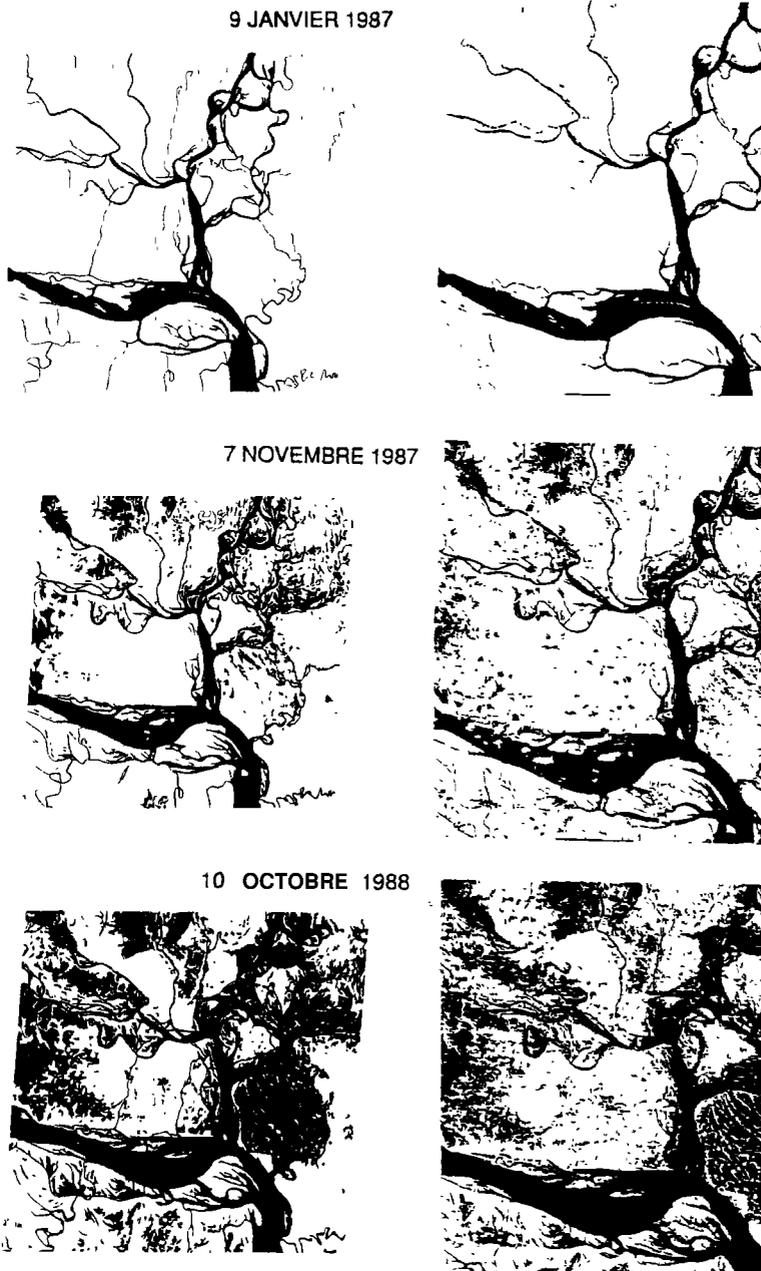
### 2.2.2 Étude locale de Dacca

#### a) Méthode

Une seconde approche a été tentée pour évaluer la profondeur de l'eau en certains endroits.

Pour cela, la zone de Dacca est choisie. Il n'y a pas de sous-échantillonnage dans cette partie (tous les pixels de l'image sont utilisés).

Une approche spectrale sur les deux périodes d'inondation est réalisée. Les résultats subissent quelques améliorations sous forme de filtrage pour diminuer la quantité de points isolés aberrants et de fonctions permettant de rendre aux objets linéaires (canaux ou cours d'eau étroits) leur continuité perdue lors du filtrage. Ce sont quelques fonctions simples de morphologie mathématique.



**Figure 3.** Résultats obtenus par photo-interprétation (colonne de gauche) et par traitement numérique (colonne de droite)

#### b) Résultats

Ce traitement permet de percevoir à la périphérie des surfaces inondées une zone de faible profondeur. La réflectance dans les canaux 1 et 2 provient du sol faiblement recouvert. Le modelé du terrain étant assez doux, on peut considérer que les bordures de ces bandes indiquent deux courbes de niveaux espacées de la profondeur de l'eau traversée par les rayons lumineux.

D'autre part, l'étude à plusieurs dates montre la possibilité de situer les rives des parties progressivement inondées et de caler des mesures de quantité d'eau sur les précédents renseignements, alliés à des cartes possédant des courbes de niveaux.

### **2.3 Analyse des résultats**

La comparaison des chiffres donnés par les deux méthodes est intéressante, car une différence existe. Ceci montre l'intérêt qu'il y a à travailler sur des zones tout à fait comparables. Parmi les dérives possibles, il faut noter : l'utilisation d'un appareil de mesure de surface sur film incomplètement calibré, l'utilisation de trois dates avec des images entières ayant une couverture un peu différente. En numérique, seule une partie des images a été utilisée. Ceci était dû à une raison technique (extraction de 2 550 colonnes de l'image au lieu des 3 000). Ce choix permet de faire les mesures sur trois zones à peu près homologues, par calage latéral. D'autre part, le sous-échantillonnage de l'image a pu produire une sous-estimation des surfaces inondées. La correction du facteur de surface ( 1,4), qui devait être appliqué aux chiffres obtenus par voie numérique pour rejoindre les chiffres obtenus par interprétation, ne suffit pas car les mesures sur l'image numérique sont faites dans la partie gauche des zones observées . Cette partie n'est pas tout à fait représentative de l'ensemble.

Pendant, les critères d'interprétation en numérique et par voie classique sont localement comparables et aboutissent sur les zones-test aux mêmes interprétations. D'autre part, le rapport entre les résultats chiffrés «analogiques» et «numériques» sur la partie commune aux deux méthodes est constant. Ce fait évoque une erreur résiduelle méthodologique systématique.

L'exploitation de plusieurs dates par des documents numériques binaires est améliorée en présentant chaque date sur un plan couleur de l'écran de visualisation. Les couleurs qui apparaissent suivent les lois de la synthèse additive. Cette méthode permet de localiser immédiatement les zones jamais recouvertes (en blanc), puis progressivement couvertes, en fonction de la force de l'inondation, mais aussi des endroits où des émergences sédimentaires sont apparues dans le temps.

## **3 Conclusion**

Bien que les faits soient connus localement au moment des événements, l'image SPOT permet une vue synoptique des phénomènes. Elle permet une vue dans le temps, archivable dans un système d'information géographique. Elle confirme la bonne tenue des digues dans le sud du pays, la réussite de la reforestation qui protège les zones côtières des tempêtes, et le fait que les inondations soient finalement plus sensibles dans le centre du pays (la constatation de la rupture de digues montre l'utilité de SPOT pour en cartographier et quantifier les conséquences).

La méthode classique (par photo-interprétation) montre sa supériorité, notamment car les moyens numériques employés sont limités. Elle permet actuellement de traiter des problèmes de manière très fiable sur de grandes surfaces. Toutefois, ces observations gagneront en rapidité quand elles seront reportées sur des systèmes informatiques puissants traitant en temps réel des images SPOT entières. Ils pourront alors assister les spécialistes en exécutant les tâches routinières. Cette première étude montre le caractère opérationnel du système SPOT, par rapport aux dates et fréquences de prise de vues, notamment par la possibilité de programmation de l'acquisition, avec ou sans dépointage de la visée.

Cette étude montre l'intérêt de vues acquises au moment du phénomène, notamment grâce à la possibilité de dépointage de la direction de prise de vues. C'est donc un outil efficace d'évaluation de la quantité et de la localisation de la retenue d'eau.

#### **4 Bibliographie sommaire**

- BLASCO, F., F. FROMARD et M. U. CHAUDURY, 1989. *Floods in Bangladesh. A preliminary study with SPOT 1 data.* —Centre national d'études spatiales. Direction des relations internationales et industrielles, Paris, 35 p.
- CHAUDURY, M. U., 1989. *Les mangroves du Bangladesh et leur analyse par télédétection spatiale.* —Thèse de l'Université Paul-Sabatier, Institut de la carte internationale de la végétation, Toulouse, 150 p.
- RASHID, H. E., 1978. *Geography of Bangladesh.* —Westview Press Inc., Colorado, 579 p.



# 12

## Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole au Sahel

ABDOUL'RHAMANE IRO\*, MICHEL YERGEAU\*\* et BERTIN GOZE BÉNIÉ\*\*\*

*\*Direction de la topographie, Ministère des finances, B. P. 250, Niamey, Niger, téléphone : 227-72-33-22 ou 23*

*\*\*Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1, téléphone : 819-821-7180, télécopieur : 819-821-7238, télex : 05-836149*

*\*\*\*Digim inc., 1 100, boul. René-Lévesque Ouest, Montréal, Québec, Canada H3B 4P3, téléphone : 514-876-4521, télécopieur : 514-876-9273, télex : 055-61250; actuellement au Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1, téléphone : 819-821-7180, télécopieur : 819-821-7238, télex : 05-836149*

### Résumé

Une formation théorique et pratique en télédétection a été dispensée à l'Université de Sherbrooke et à la division Digim inc. du groupe Lavalin. Cette formation s'inscrit dans le cadre d'un projet de formation et de démonstration sur l'utilisation de la télédétection pour les petits aménagements énergétiques et agricoles dans les pays du Sahel, lequel a été réalisé au Canada entre novembre 1988 et avril 1989. Une carte d'occupation des sols à l'échelle du 1:100 000 a été produite. Cette carte illustre les différentes classes de l'occupation des sols de la région de Tillabéry, en différenciant les zones de cultures pluviales et de cultures de contre saison.

### 1 Introduction

L'amélioration du suivi des ressources naturelles renouvelables et du système d'alerte précoce nécessite entre autres le recueil et le traitement rapide des informations permettant d'avoir

une vue globale et répétitive sur l'évolution des conditions agro-climatiques. Le projet «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel» (Ouattara, 1989a et b) vient en appui aux actions terrestres déployées par le programme du Centre AGRHYMET et le Ministère de l'agriculture et de l'environnement (MAG/E) du Niger dans ce domaine.

Ces dernières années, le développement de la télédétection offre en effet de nouvelles perspectives dont celle de pouvoir mieux approcher les deux facteurs les plus importants dans la détermination des productions agricoles et pastorales : les superficies et les rendements. Convaincu de l'apport important de la télédétection dans le domaine de la prévision des récoltes, le Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) a demandé et obtenu l'extension de l'expérimentation, conduite depuis 1981 au Mali et en Guinée, par le Centre commun de recherche des communautés européennes (CCRCE) dans le domaine de la prévision des productions agricoles et de la crue du fleuve Niger (Berg *et al.*, 1985).

Ce recentrage a abouti au projet régional appelé «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel». Son objectif est la prévision des productions céréalières au Sahel par l'utilisation de la télédétection de façon complémentaire aux données conventionnelles utilisées par les statistiques agricoles et l'agrométéorologie. Au Niger, une composante nationale intervient pour mettre en oeuvre, à travers sa connaissance du milieu, la recherche méthodologique et l'application opérationnelle de la télédétection (MAG/E, 1988). La composante nationale nigérienne regroupe les services techniques suivants :

- Direction des statistiques de l'agriculture et de l'environnement avec pour tâche la collecte des données de base nécessaires à l'utilisation de la télédétection;
- Direction de la topographie avec pour tâche le traitement et l'interprétation des documents cartographiques, des photos aériennes et des images satellitaires, et des opérations ponctuelles de levé des sites pilotes;
- Direction de la météorologie nationale avec pour tâche le recueil des données sur sites pilotes et l'intégration du suivi satellitaire dans les modèles météorologiques;
- Direction générale de l'Institut national des recherches agronomiques du Niger (INRAN) avec pour tâche le zonage agro-écologique, le recueil et le dépouillement des données de terrain.

Parallèlement à la mise en place de ce projet d'envergure régionale, le projet «Télédétection-Aménagement-Sahel» (Yergeau *et al.*, 1990) a formé des cadres sahéliens originaires du Burkina Faso, du Mali et du Niger. La partie nigérienne de ce projet est présentée dans le cadre de cette contribution.

## 2 Objectifs du projet «Télédétection-Aménagement-Sahel»

Le projet de formation et de démonstration «Télédétection-Aménagement-Sahel» vise à définir des moyens susceptibles de favoriser des conditions d'épanouissement du milieu rural sahélien par une gestion rationnelle des ressources.

En accord avec les autorités nationales du Niger, le projet nigérien retenu vise quant à lui la stratification d'un territoire au Niger permettant un zonage agro-écologique constituant une base d'échantillonnage pour les statistiques agricoles. Le choix de ce projet a tenu compte du fait que les partenaires nigériens oeuvraient déjà dans le cadre d'un projet autonome de gestion des ressources qui offrait la possibilité d'y exploiter un volet télédétection (Yergeau et Bigras, 1989).

### **3 Région d'étude**

La région d'étude, centrée sur la ville de Tillabéry, longe le fleuve Niger à une centaine de kilomètres au nord-ouest de Niamey, la capitale du pays. Le fleuve ne modifie pas sa direction générale NO-SE qu'il avait au Mali; il utilise les zones de moindre résistance comme les lignes de faille et franchit les barres rocheuses par des rapides, dont ceux d'Ayorou à cent kilomètres au nord-ouest de Tillabéry. Dans la zone d'étude, le lit majeur du fleuve a une largeur moyenne de deux kilomètres.

Le climat de cette zone est de type sahélo-soudanais. La moyenne pluviométrique établie sur la période 1968-1986 est de 358,4 mm à Tillabéry. La quasi-totalité de ces précipitations tombent de juin à septembre. Ces pluies sont généralement de grande intensité et entraînent un ruissellement important provoquant un encroûtement des surfaces, une mauvaise infiltration et une érosion sur les pentes. L'évaporation annuelle y atteint 2 100 mm.

Dans la région de Tillabéry, on observe :

- entre les plateaux et le fleuve, un large glacis dont la topographie varie de 300 à 200 m d'altitude, où les sols appartiennent au groupe des sols bruns steppiques; ces sols supportent une végétation clairsemée d'épineux; le relief est en général très plat;

- en bordure du fleuve, on rencontre plusieurs bandes de sols alluvionnaires exondés appartenant au groupe des sols ferrugineux tropicaux non lessivés, dont la largeur ne dépasse pas un kilomètre; ces bandes sont cultivées en mil et sorgho, parfois en arachides;

- à l'intérieur du lit majeur du fleuve, les sols alluvionnaires inondables se divisent en deux sous-groupes, les sols hydromorphes minéraux à gley et les sols hydromorphes jeunes sur matériaux d'apport récent; ces sols sont végétalisés naturellement par des graminées et des plantes aquatiques.

La région est une zone d'agriculture vivrière. L'agriculture ne se pratique guère qu'en bordure immédiate du fleuve et sur les zones exondées à l'étiage. Le Ministère de l'agriculture et de l'environnement y a aménagé plusieurs plaines dans lesquelles le contrôle de l'inondation permet une riziculture assez intensive.

Cette zone de Tillabéry est un exemple typique du phénomène de désertification associée à une insuffisance quantitative des précipitations provoquant non seulement un déséquilibre de son écosystème mais aussi des crises alimentaires très aiguës. La surveillance, le suivi et la prévision des productions agricoles demeurent donc une priorité pour répondre aux déficits chroniques de productions agricoles enregistrés ces dernières années. Mais, pour y parvenir, des actions pluridisciplinaires concertées sont nécessaires afin de mieux appréhender les mécanismes et les phénomènes qui régissent et définissent l'état actuel du milieu naturel.

Cette étude de démonstration se propose d'établir une carte de reconnaissance de l'utilisation et de la répartition spatiale des milieux naturels de la zone à partir des images du satellite américain Landsat Thematic Mapper (Landsat TM).

### **4 Données disponibles**

Le projet a utilisé les images Landsat TM (193-50) du 30 octobre 1987 et du 19 février 1988, ainsi que l'image SPOT (058-321) du 1<sup>er</sup> janvier 1988 qui est malheureusement fortement masquée par une couverture nuageuse qui limite son utilisation dans la zone d'étude.

Les données auxiliaires sont composées :

- d'une carte au 1:200 000 (feuillet de Tillabéry);

- de cartes au 1:50 000 (feuillet de Tillabéry : 1a, 1b, 1d, 2a et 2c);
- de cartes d'occupation du sol au 1:100 000 (feuillet 1 et 3 de Tillabéry);
- de cartes des unités physiographiques au 1:100 000 (feuillet 1 et 3 de Tillabéry).

## 5 Méthode globale utilisée

La méthode globale utilisée est présentée sous forme d'organigramme à la figure 1.

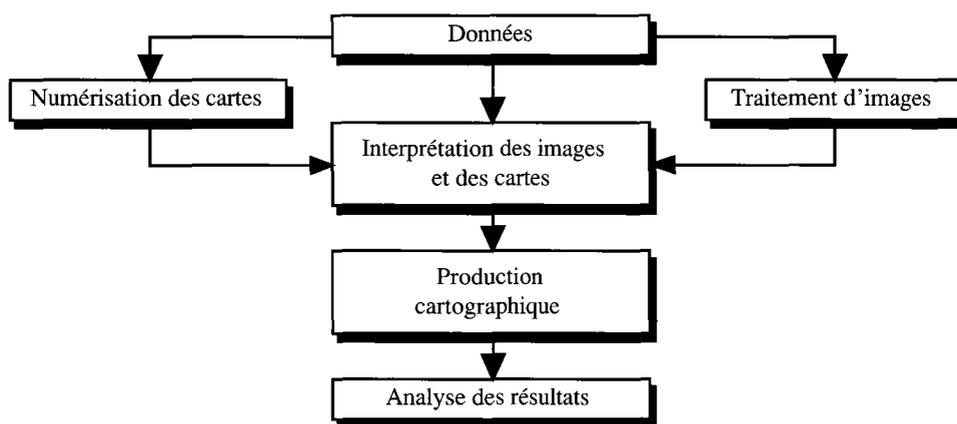


Figure 1. Méthode globale utilisée

### 5.1 La numérisation des cartes

Des portions de cartes topographiques (un feuillet au 1:200 000 et 3 feuillets au 1:50 000) ont été numérisées sur des stations Intergraph. Les thèmes numériques résultants (réseau routier, réseau hydrographique, physiographie, occupation du sol) ont été tracés automatiquement sur papier (traceuse Calcomp). Ces tracés ont ensuite été imprimés sur acétate (procédé photographique) pour faciliter leur mise à jour par télédétection (superposition de données). L'échelle de travail retenue a été le 1:100 000.

### 5.2 Le traitement d'images

Les images acquises ont été rehaussées afin d'en améliorer l'apparence visuelle pour l'interprète en faisant ressortir les aires homogènes. La principale méthode utilisée dans le cadre de ce projet a consisté à modifier l'histogramme de fréquence. Le système de coordonnées-image a aussi été transformé dans un référentiel cartographique. Après ces divers traitements, on a procédé à l'impression d'un film négatif, puis à l'agrandissement et enfin à l'épreuve couleur des images au 1:100 000. Les données numériques ont été traitées par Digim-Lavalin.

## 6 Résultats

### 6.1 L'interprétation des images

L'application la plus immédiatement opérationnelle de la télédétection en agriculture tropicale consiste en une stratification du territoire permettant un zonage agro-écologique (Lambin, 1988). Une clé d'interprétation (fig. 2) a été élaborée. Cette clé est basée sur la relation certaine entre la physiographie de la zone et les différents types d'occupation des sols. Les images satellitaires ont été visuellement interprétées par un cadre nigérien sous la supervision du CARTEL.

Physiographie	Plateau	Versant	Glacis et dune	Terrasse et cuvette	Lit du fleuve
Occupation des sols	Surface nue sur plateau, surface nue sur affleurement rocheux, brousse tigrée	Surface nue sur versant, steppe arbustive	Culture pluviale, culture de contre saison, mare, marécage, steppe arbustive, galerie arborée	Riziculture, verger, culture maraîchère	Culture sèche et riziculture sur les îles

Figure 2. Coupe schématique de la répartition de l'occupation des sols dans la région de Tillabéry

L'interprétation des images a mis en évidence certaines cicatrices de la désertification qui affectent la zone telles les régions incultes ou les surfaces nues, ainsi que les zones de steppes arbustives qui occupent les glacis. Parmi les autres éléments qui marquent le paysage, les zones d'aménagement rizicole le long du fleuve Niger ont été facilement identifiées. De même, les sites de culture de contre saison ou de culture irriguée en saison sèche ont été identifiés et cartographiés.

### 6.2 La production cartographique

Les planches numérisées des cartes topographiques existantes et les planches photographiques interprétées au 1:100 000 ont permis de produire une carte d'occupation du sol de la région de Tillabéry à la même échelle par des procédés cartographiques conventionnels. La carte a été confectionnée par Digim-Lavalin.

La figure couleur 12-3 illustre des classes d'occupation des sols centrées sur la ville de Tillabéry : les rizières aménagées (  ), les zones de cultures pluviales (vert pâle), les sites de cultures de contre saison (vert foncé), les steppes arbustives (beige), les surfaces dénudées (blanc) et enfin un élément structurant important dans le paysage, le fleuve Niger (bleu).

Les petites surfaces qu'occupent les cultures de contre saison peuvent aussi être cartographiées (fig. coul. 12-4, vert foncé). Cette information est issue de l'image Landsat

TM de février 1988. Les sites de cultures de contre saison sont localisés dans les bas-fonds (galerie arborée en vert, ou zone marécageuse représentée par le symbole bleu )( ). Les autres éléments du paysage sont : les zones de culture pluviale (vert pâle), les steppes arbustives (beige), les surfaces dénudées (blanc) et la brousse tigrée qui occupe les surfaces cuirassées (tacheté vert).

## 7 Conclusion

Faisant suite à cette formation théorique et pratique reçue dans le cadre du projet «Télé-détection-Aménagement-Sahel», la composante nationale nigérienne du projet «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel» a reçu le mandat de réaliser, par interprétation analogique, l'évaluation du domaine cultivé pour l'ensemble du département de Tillabéry (Niger). Cette interprétation se fera à l'aide de l'imagerie Landsat MSS; les résultats doivent être présentés sous la forme d'une cartographie au 1:200 000. La méthode suggérée pour cette tâche est semblable à celle utilisée dans le cadre du projet de formation.

Un transfert de technologie en matière de télé-détection a donc été réalisé envers deux membres de la composante nationale nigérienne intégrée dans un projet du Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel. Le projet «Télé-détection-Aménagement-Sahel» permet alors à une équipe nigérienne de fonctionner plus efficacement dans le cadre du projet d'envergure régionale de «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel».

## 8 Références

- BERG, A., J.-M. GRÉGOIRE et A. HUBAUX, 1985. Projet régional JOLIBA, Programmes CILSS «Prévision des productions rizicoles par télé-détection» et «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel». —Centre commun de recherche, Commission des communautés européennes, Ispra, 51 p.
- LAMBIN, E., 1988. Apport de la télé-détection satellitaire pour l'étude des systèmes agraires et la gestion des terroirs en Afrique occidentale, exemples au Burkina Faso. —Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 239 p.
- MAG/E (Ministère de l'agriculture et de l'environnement), 1988. Base régionale des données. —Projet CILSS/Fonds européen de développement «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel», Niamey, 52 p.
- OUATTARA, F., 1989a. La télé-détection satellitaire et la détermination des productions agricoles. —Compte rendu de la conférence sur la télé-détection satellitaire au service du Sahel, SAHEL CR(89)61, CILSS et Club du Sahel, Niamey, p. 111-133.
- OUATTARA, F., 1989b. Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel. —in M. Yergeau (éd.). La télé-détection au service de la gestion des ressources naturelles et de la planification des micro-réalisations. Compte rendu d'un séminaire régional, ACCT et CARTEL, Niamey, p. 82-83.

*Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole au Sahel*

- YERGEAU, M., B. G. BÉNIÉ, C. PRÉVOST, R. SIMARD, F. BONN et Q. H. J. GWYN, 1990. L'inventaire et l'aménagement des ressources au Sahel, un exemple de transfert de technologie en télédétection. —in P. Lafrance et J.-M. Dubois (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 283-295.
- YERGEAU, M. et P. BIGRAS, 1989. La télédétection, une source d'information pour la gestion de l'eau au Sahel. —Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 16 p.



# 13

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

CHRISTINE JACQUEMINET

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

### **Résumé**

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

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

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

### **1 Comment déterminer des indicateurs morphologiques sur images satellitaires**

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

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

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

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

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

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

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

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

Le traitement des données satellitaires comporte trois phases :

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

## **2 L'orientation des modelés dunaires**

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

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

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

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

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

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

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

## **2.2 La modélisation des formes dunaires**

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

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

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

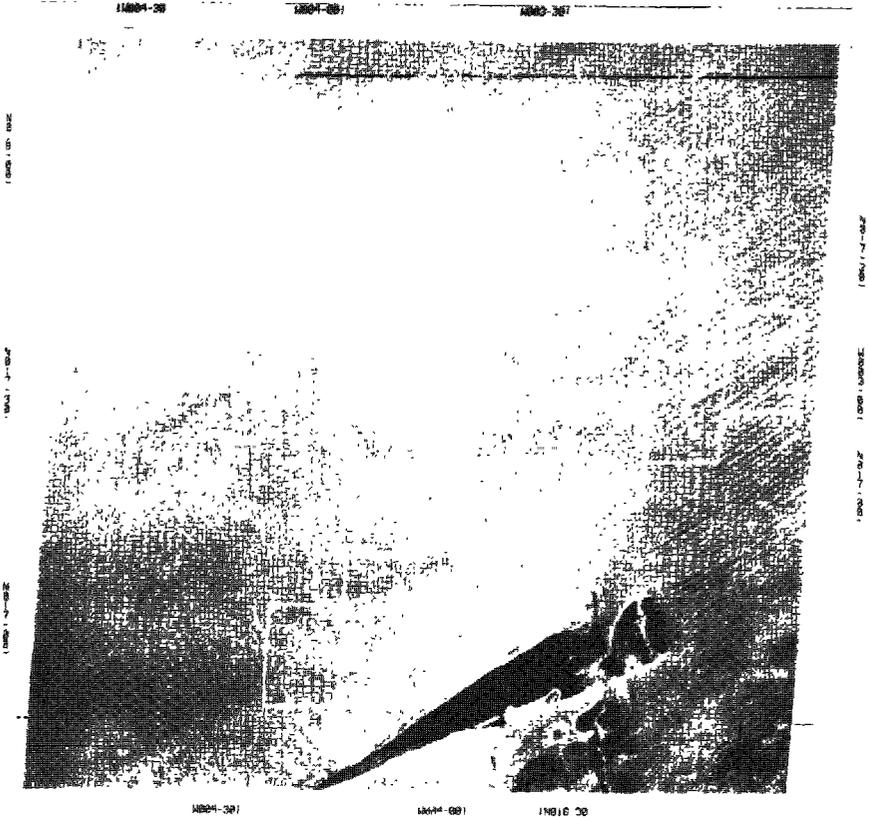


Figure 1. Localisation des échantillons sur l'image Landsat MSS du 10 mars 1982, canal MSS4

### 2.3 Le calcul des orientations des structures dunaires

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

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



Figure 2. Échantillon A, première composante principale

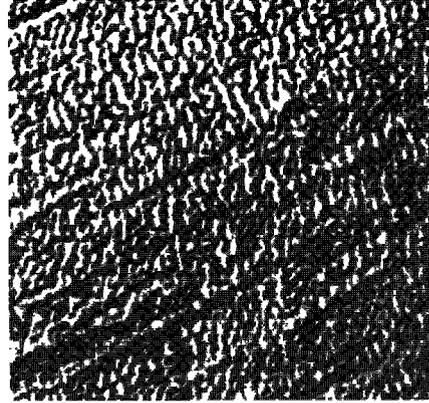


Figure 3. Échantillon A, filtre Gabarit «direction»

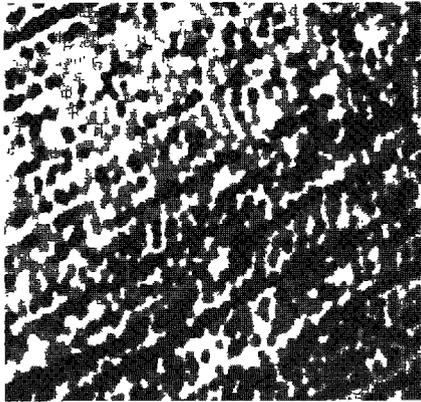


Figure 4. Échantillon A, fermeture de rayon 2

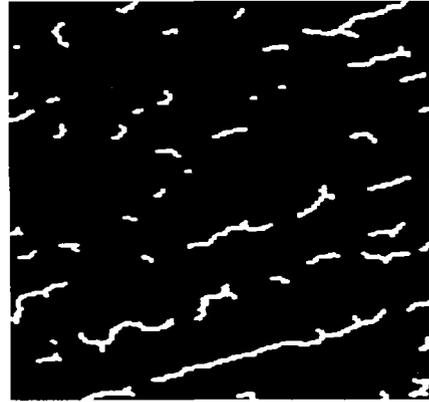


Figure 5. Échantillon A, squelette

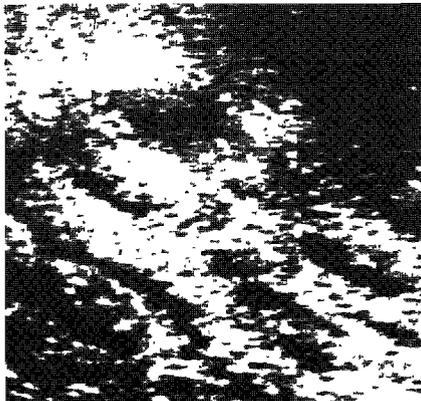


Figure 6. Échantillon I, première composante principale

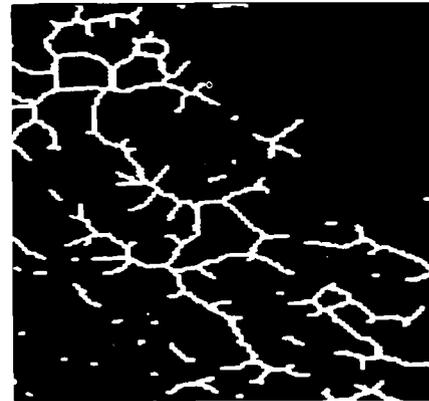


Figure 7. Échantillon I, squelette

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

### **3 L'organisation spatiale du couvert ligneux**

#### **3.1 La région d'Oursi et les textures végétales rencontrées**

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

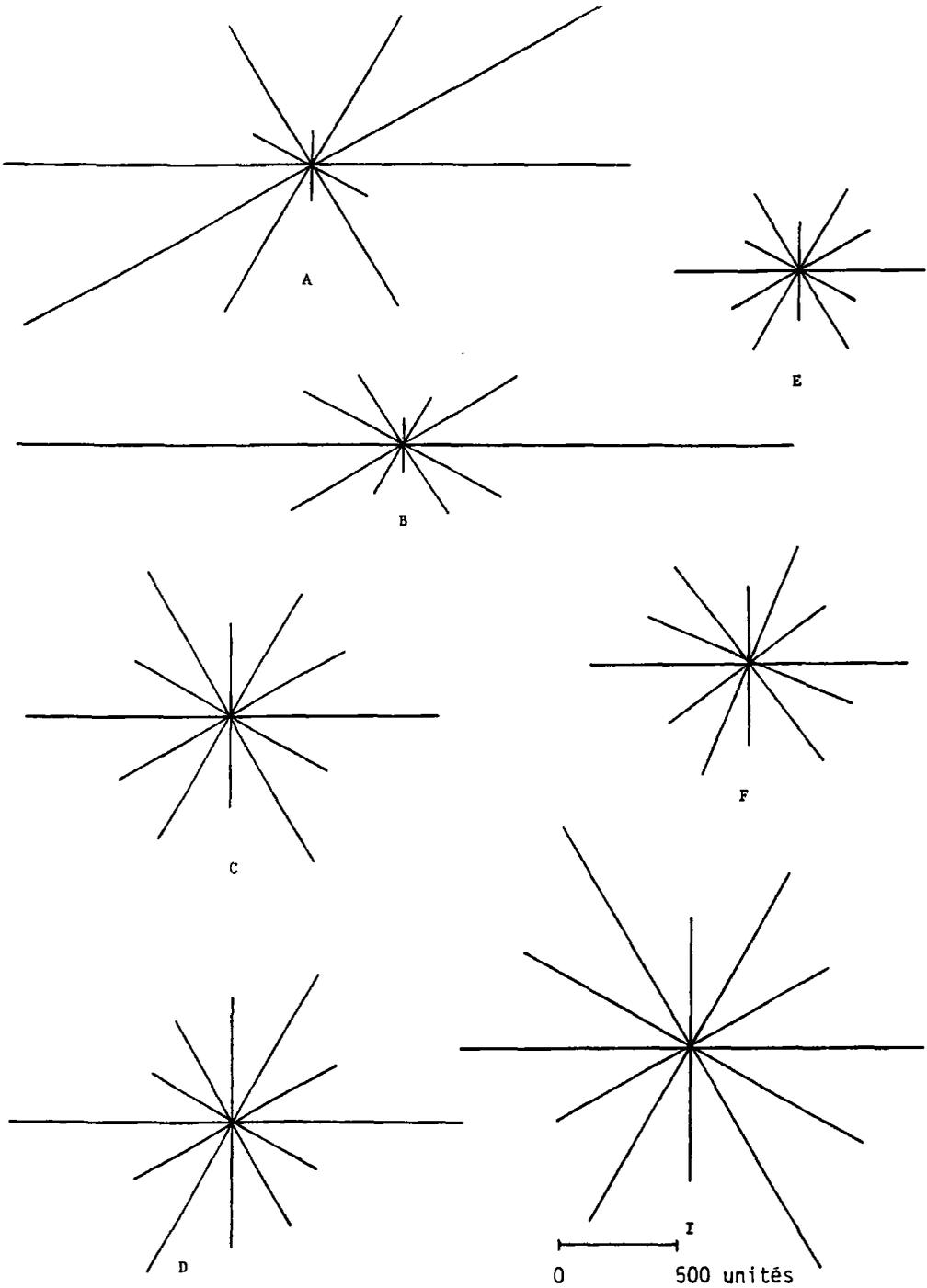
Quatre types d'organisation spatiale ou de texture des aires de ligneux ont été distingués sur l'image SPOT (fig. 9).

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

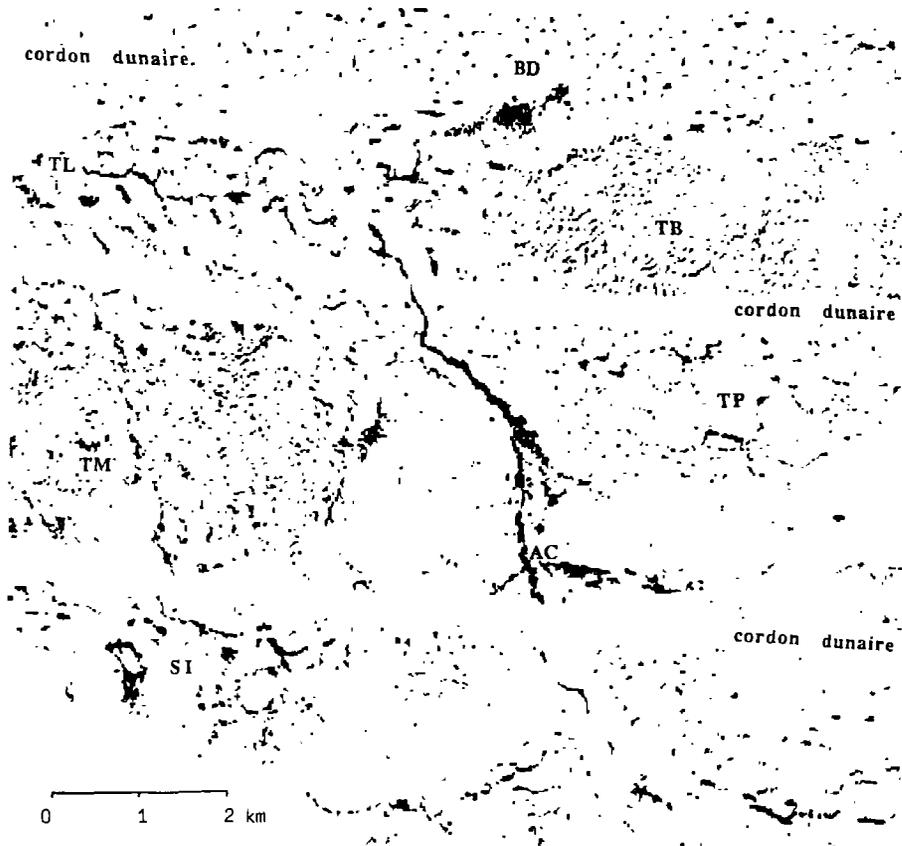
- Dans les plaines interdunaires, les sols cuirassés sont colonisés par la brousse tigrée. Cette formation végétale s'organise en bandes successives de végétation dense et de sol dénudé. Actuellement, les mécanismes de sa genèse sont encore mal connus, mais la largeur relative des bandes est un bon indicateur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

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

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



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

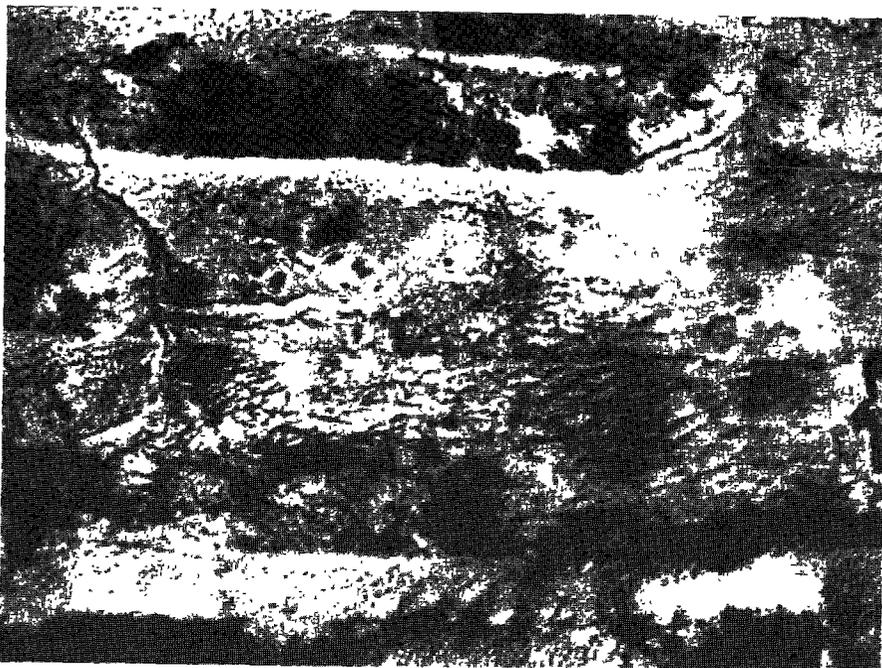


**Figure 9.** Les textures végétales sur l'image de la classe «végétation ligneuse» (BD: bosquets sur cordons dunaires, TB: brousse tigrée à lanières, TL: brousse tigrée à lanières, TM: brousse tigrée mouchetée, TP: brousse tigrée piquetée, SI: steppe des espaces interdunaires, AC: agrégats sur chenaux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

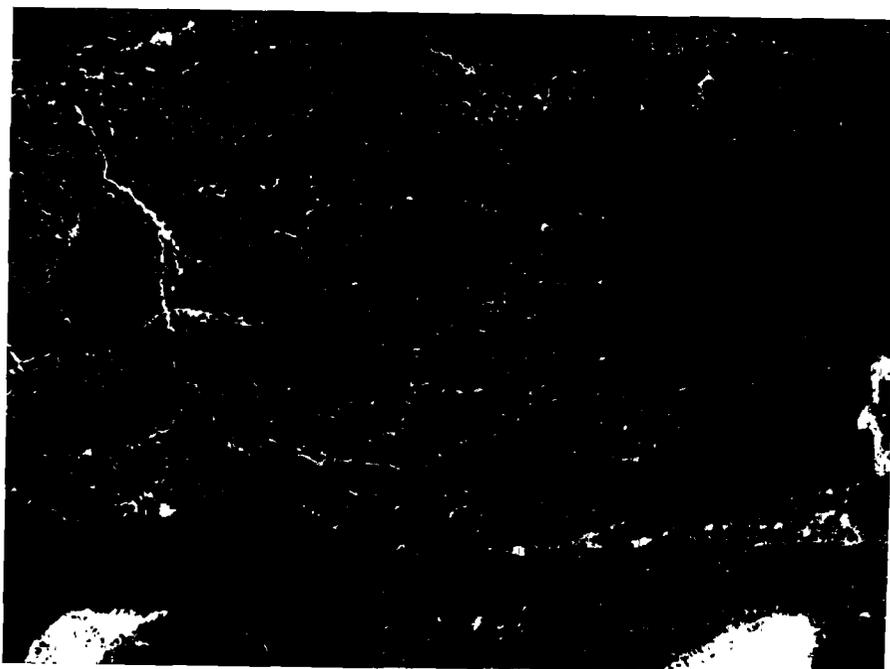
topographiques, selon une orientation sud-nord. Dans l'espace interdunaire situé au nord du premier cordon, des petits bois plus ou moins épais de formes variées (AM) se sont développés sur des mares temporaires.

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

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



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



**Figure 11.** La classe «végétation ligneuse»

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

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

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

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

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

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

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

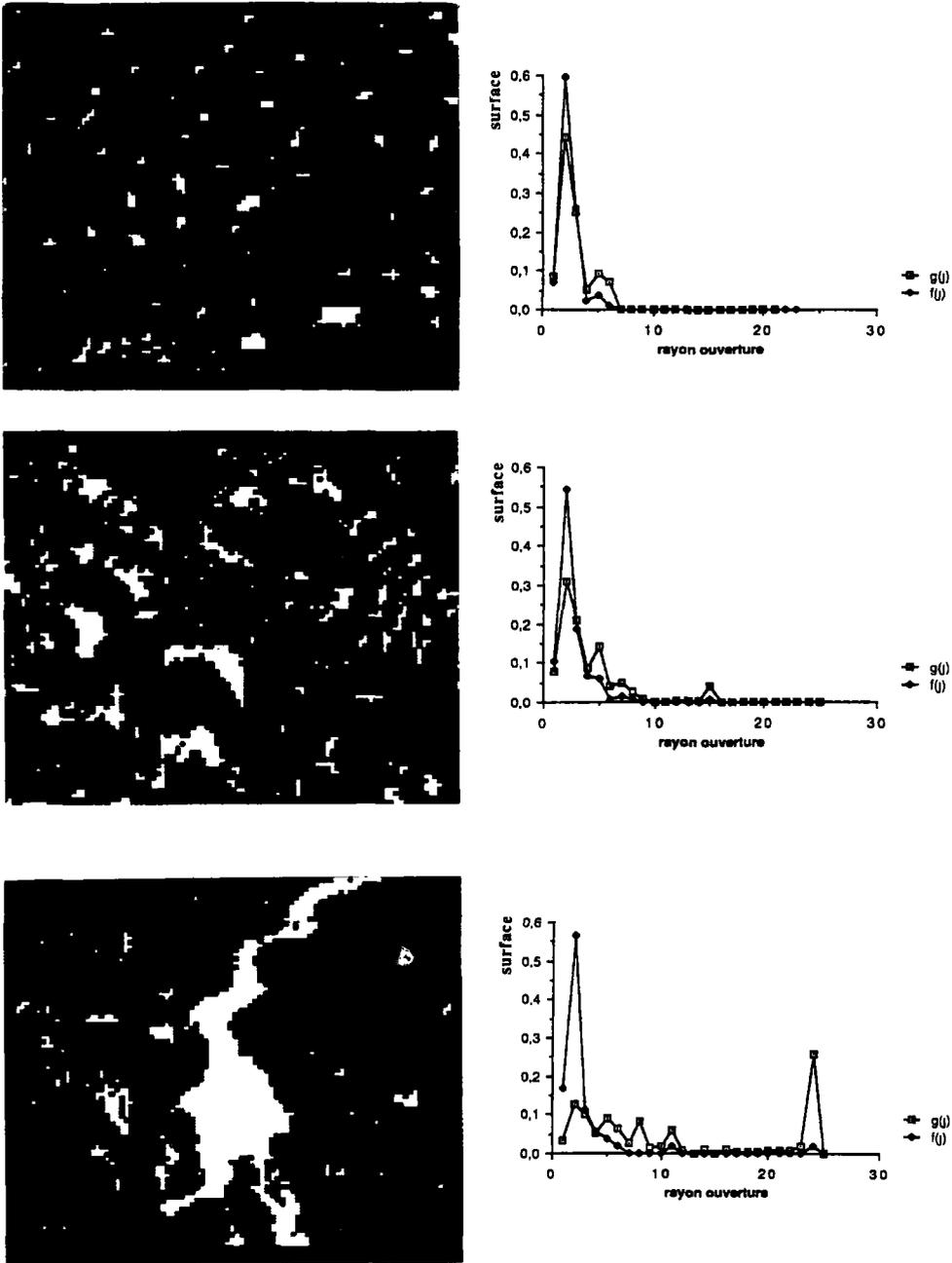


Figure 12. Les courbes de densité granulométrique en surface  $g(n)$  et de densité granulométrique en nombre  $f(n)$  calculées sur trois quadrats (en haut : bosquets sur cordon dunaire; au centre : brousse tigrée mouchetée; en bas : agrégats sur chenal d'écoulement temporaire)

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

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

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

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

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

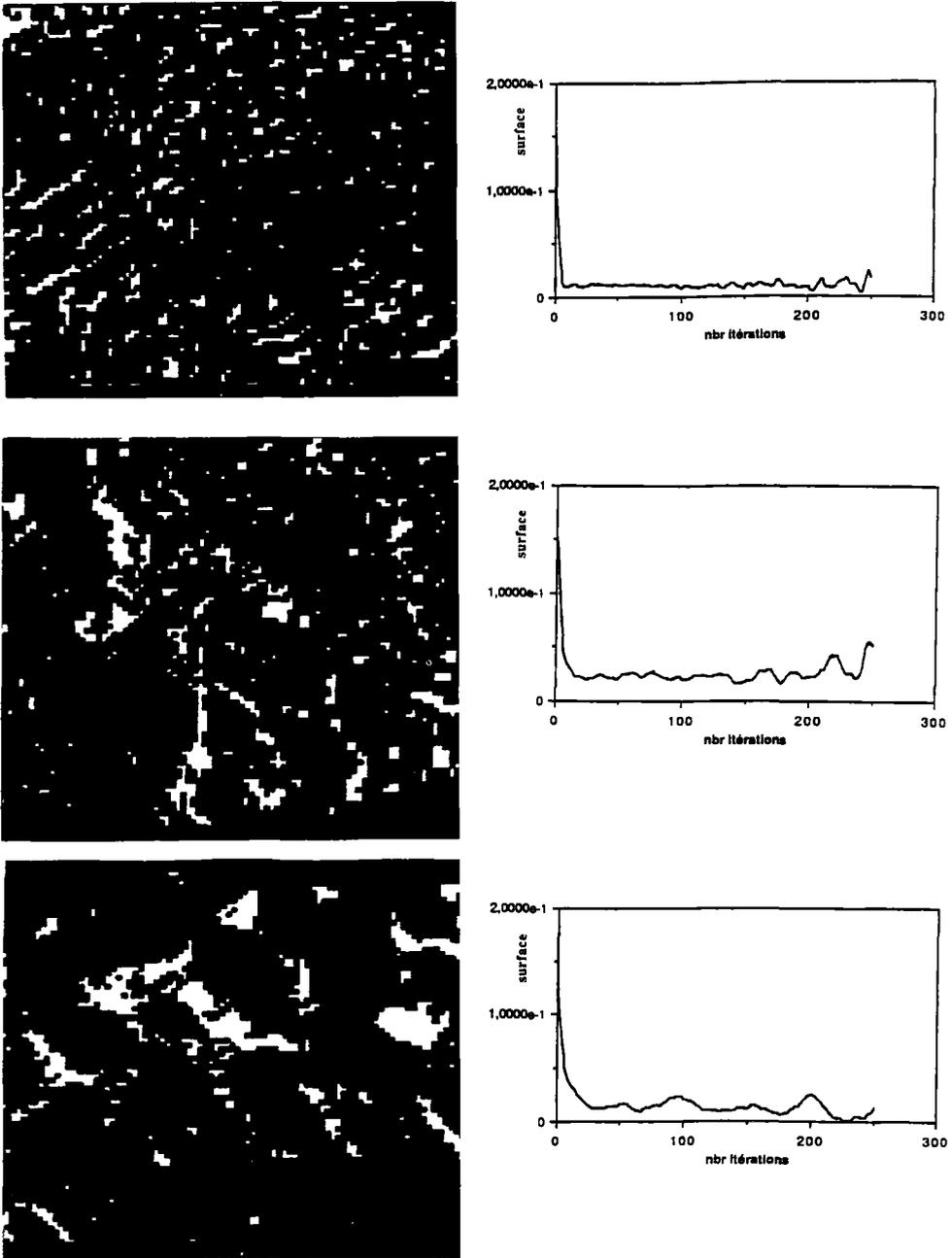
1) Les quadrats des agrégats de ligneux sur aires de ramifications des chenaux d'écoulement temporaire et sur mares, caractérisés par la présence d'une très grosse particule ou par une hétérogénéité des tailles de grains: ils contiennent à la fois une ou deux grosses particules et des petites particules.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

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

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

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

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



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



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

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

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

## **4 Conclusion**

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

## **5 Références**

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

*C. Jacqueminet*

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

# 14

## **Les modelés éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphologie, note préliminaire**

SALIFOU KARIMOUNE\*, ANDRÉ OZER\*\* et MICHEL ERPICUM\*\*\*

*\*Faculté de pédagogie, Université de Niamey, B. P. 10963, Niamey, Niger*

*\*\*Laboratoire de géomorphologie et géologie du Quaternaire, Université de Liège, place du 20-Août, 7, 4000 Liège, Belgique*

*\*\*\*Laboratoire de géographie physique, Université de Liège, place du 20-Août, 7, 4000 Liège, Belgique*

### **Résumé**

L'analyse de photographies aériennes de la région de Zinder (Niger méridional) a permis de relever plusieurs problèmes géomorphologiques, géologiques et hydrographiques. Tout d'abord, les reliefs résiduels et la structure tectonique ont pu être cartographiés. Le repérage de nombreux linéaments interprétés soit comme failles soit comme diaclases est du plus haut intérêt pour la recherche d'aquifères. Ensuite, deux systèmes dunaires ont été distingués, l'un transversal, l'autre longitudinal par rapport aux alizés du NE. Reliefs résiduels et systèmes dunaires jouent un rôle important dans la localisation des lacs et mares temporaires et dans le tracé du réseau hydrographique. Les lacs et mares sont localisés en position sous le vent des reliefs résiduels ou au pied des dunes longitudinales.

L'étude de la genèse des systèmes dunaires et des dépressions lacustres associées devrait permettre une meilleure compréhension des phases de désertification depuis le Pléistocène supérieur et ainsi de mieux cerner l'évolution actuelle.

## **1 Introduction**

L'étude de photogéomorphologie ci-après constitue la première étape d'une recherche de plus grande envergure dont le but est de mieux saisir la progression de la désertification dans le sud du Niger. Le secteur présenté ici (fig. 1) s'étend entre 13° 20' et 14° 30' de latitude N et 9° et 10° 20' de longitude E. Il est situé entre les localités de Zinder à l'ouest et de Gouré à l'est. Cette région, appelée le Damagaram-Mounio, présente du point de vue morphologique un intérêt certain pour comprendre le phénomène de désertification. En effet, située sur les marges sud du désert du Tenéré, elle a enregistré des fluctuations climatiques quaternaires dont certaines sont responsables d'épandages éoliens variés. La sécheresse, qui depuis les années 70 affecte cette région, engendre à nouveau une remobilisation des sables notamment au nord et à l'est dans les régions limitrophes du Damergou et du Manga. Mais le Damagaram connaît aussi, depuis une vingtaine d'années, de profondes transformations écologiques. On y constate une grave dégradation du couvert végétal qui entraîne localement une remise en mouvement des sables jusqu'ici fixés par la végétation.

Ces phénomènes récents peuvent être appréhendés par l'analyse de photographies aériennes et d'images satellitaires. La prochaine étape de cette recherche concernera le traitement d'images SPOT de ce secteur.

La télédétection permet aussi de saisir, grâce à l'étude morphologique, le rôle des apports éoliens, mis en place au cours des phases arides quaternaires, dans la modification du réseau hydrographique et dans la localisation des lacs et mares temporaires. Elle permet, par ailleurs, de repérer la structure dans les zones d'affleurement du socle, entre autres les failles et linéaments, en vue d'avoir des éléments significatifs pour une prospection hydrogéologique.

Cette note préliminaire vise donc à présenter les premiers résultats de l'analyse photogéomorphologique d'un petit secteur de la zone envisagée. Aussi, avons-nous émis un certain nombre d'hypothèses de travail qui ne demandent qu'à être confirmées par des analyses photogéologiques de l'ensemble de la région et confrontées à des examens d'autres photographies aériennes et d'images satellitaires prises à d'autres périodes ainsi qu'à la vérité terrain.

## **2 Cadre géologique**

La région du Damagaram-Mounio constitue un seuil où le cristallin affleure en boutonnière (Greigert et Pougnet, 1967) entre les bassins des Iullemeden à l'ouest et du Tchad à l'est.

Il faut distinguer trois grands ensembles géologiques : le socle cristallin, le continental hamadien (crétacé) et la couverture sableuse quaternaire (fig. 2).

### **2.1 Le socle**

Il apparaît par plages plus ou moins étendues à travers la couverture sableuse. Il est constitué de séries métamorphiques : micaschistes, schistes, cipolins, gneiss et quartzite d'âge suggarien (Greigert et Pougnet, 1967). Ces séries fortement plissées suivant des directions variables ont été recoupées par des intrusions granitoïdes syn- à tardi-tectoniques (Joo' et Franconi, 1983) appelées granites anciens. Parmi les séries métamorphiques, les quartzites sont les roches les plus représentées. Ils forment l'armature du relief.

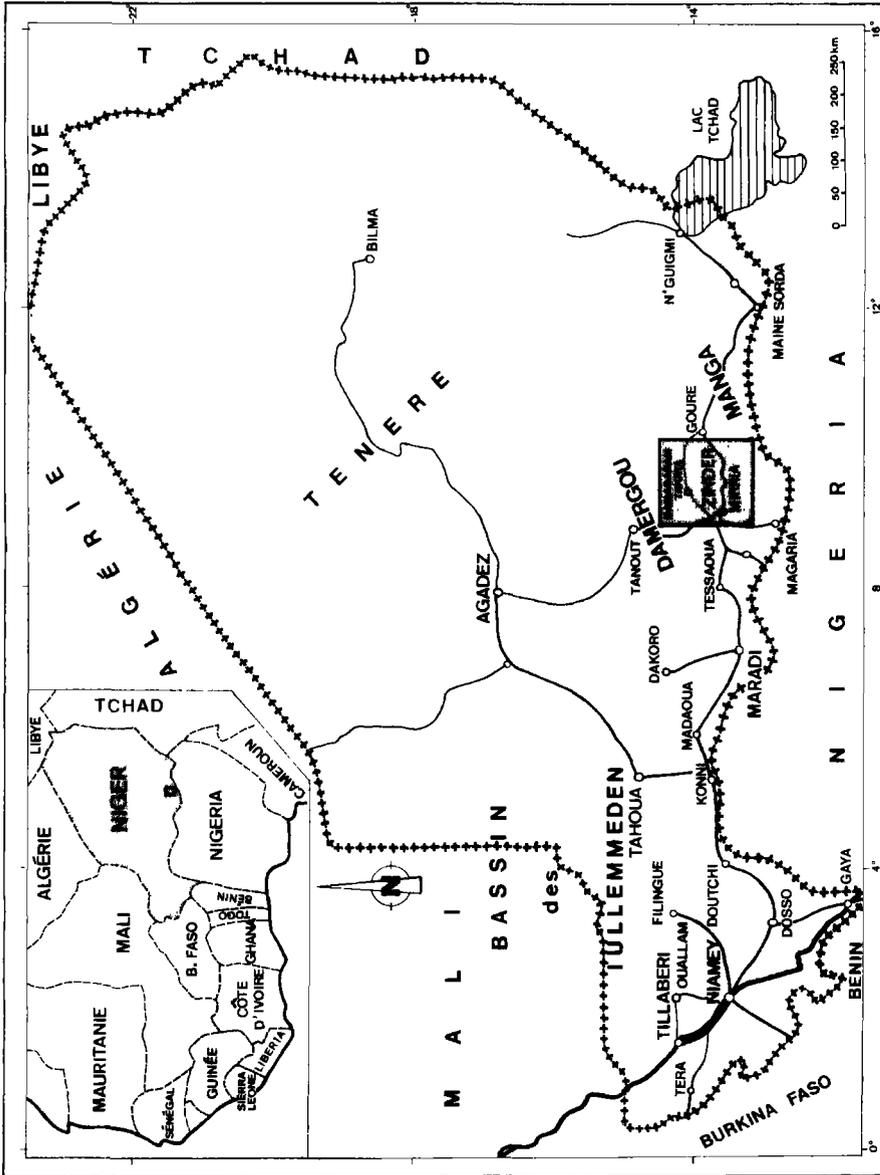


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

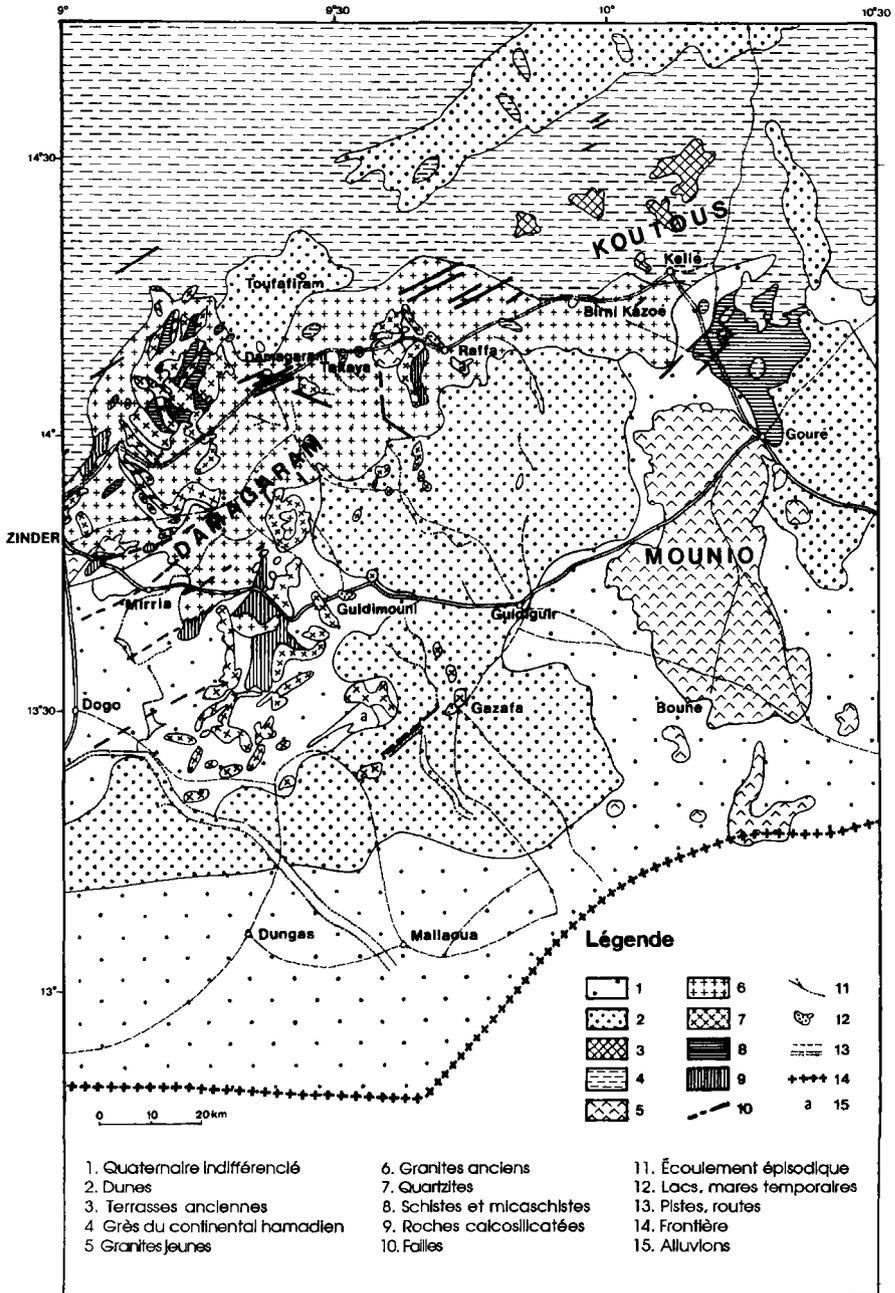


Figure 2. Carte géologique d'après H. Faure (1966)

Les granites anciens prennent en écharpe tout le secteur d'étude apparaissant entre les localités de Zinder et Birni Kazoé.

Des intrusions alcalines plus tardives (310 à 295 millions d'années AA, Bowden *et al.*, 1976, cité par Joo' et Franconi, 1983) granitiques associées à un volcanisme rhyolitique forment deux massifs dans le Damagaram (est de Zinder et région de Zarnouski, non loin de Raffa) et la totalité du massif du Mounio. Ces granites jeunes donnent aussi des collines, surtout autour de la ville de Gouré.

## **2.2 Le continental hamadien**

Il est formé par un ensemble de dépôts fluviatiles d'âge crétacé supérieur constitués de grès fins à grossiers. Ces grès à ciment argileux de couleur blanche, brune et violette présentent des stratifications entrecroisées et de fréquentes variations latérales de faciès (Mignon, 1970, cité par Ousmane, 1978). Le continental hamadien forme le massif du Koutous au nord du Damagaram-Mounio et les buttes qui en constituent le prolongement à l'ouest et au sud.

## **2.3 Les sables quaternaires**

Les dépôts sableux recouvrent de façon irrégulière toute la région ne laissant affleurer qu'assez rarement le socle. Parfois, ils ne constituent qu'un nappage de quelques centimètres à quelques décimètres d'épaisseur ou bien ils sont agencés en dunes importantes. Celles-ci se localisent surtout au nord, à l'est et au sud du secteur d'étude. Elles sont les témoins de phases arides qui, au Quaternaire, ont affecté cette région. L'étude de leur genèse devrait permettre de mieux cerner les variations climatiques qui ont marqué la région et de mieux comprendre l'évolution actuelle de la désertification.

## **2.4 Tectonique**

Sur le plan tectonique, au moins deux phases de déformation ont affecté le Damagaram. La première, la plus souple, a intéressé les séries métamorphiques donnant des plis orientés NO-SE et NE-SO. Cette tectonique contemporaine de la mise en place des granites syntectoniques a donné des anticlinaux et des synclinaux à axes obliques par rapport à l'horizontale (Greigert et Pougnet, 1967).

À cette tectonique souple a succédé une tectonique cassante produisant des cassures orthogonales (N 150° et N 60°) à remplissage quartzeux.

Les accidents N 150° sont les plus fréquents. Les fractures N 60° affectent aussi le massif du Mounio et ont donc dû rejouer plus récemment (Greigert et Pougnet, 1967).

# **3 Climat**

La région de Zinder est caractérisée par un climat sahélien avec une pluviométrie annuelle de 472 mm (moyenne 1905-1987, station de Zinder aéroport).

Cette pluviométrie se dégrade du sud au nord (Magaria : 575,5 mm, Zinder : 472 mm, Tanout : 260,6 mm) et d'ouest en est (Zinder : 472 mm, Gouré : 350 mm). Les précipitations sont centrées sur les mois de juin, juillet, août et septembre avec une période humide allant de la fin juin à la mi-septembre (fig. 3).

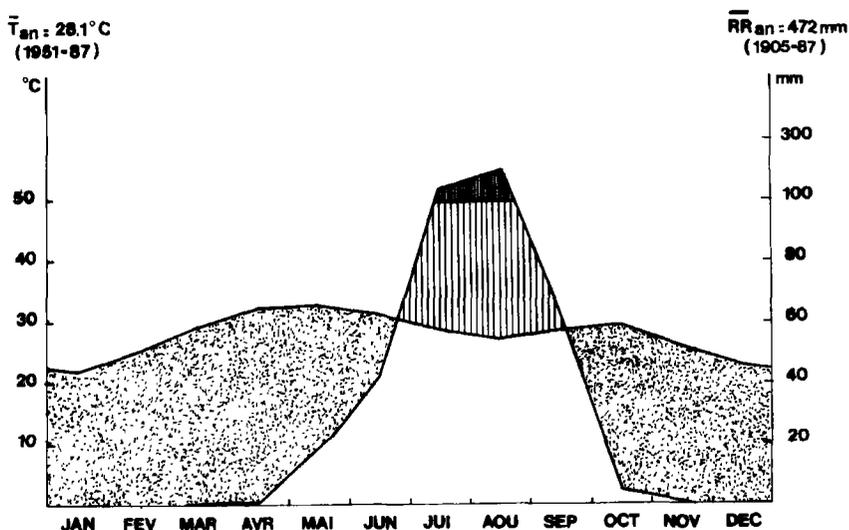


Figure 3. Diagramme ombrothermique de la station de Zinder

Le diagramme de l'évolution des précipitations annuelles (1905-1987)(fig. 4) fait ressortir une nette détérioration de la pluviosité depuis 1966. Hormis les années excédentaires de 1974, 1976, 1978 et 1980, les précipitations annuelles sont nettement en-dessous de la moyenne pluviométrique. De 1908 à 1916, un net déficit pluviométrique était observé. De 1925 à 1965, les précipitations étaient généralement excédentaires. La dégradation de la pluviosité entraîne une dégradation de la couverture végétale, celle-ci est accentuée par l'action anthropique (bois de chauffe, d'ouvrage, surpâturage, travail des champs).

L'affaiblissement de la protection du sol par la végétation facilite l'érosion éolienne et la remobilisation des sables.

La figure 5 a l'avantage de montrer la très grande variabilité des caractéristiques de la saison des pluies en région sahélienne. Cette variabilité est marquée non seulement par des dates de début et de fin de la saison des pluies très variables d'une année à l'autre mais également par des interruptions plus ou moins longues. Le critère retenu pour la caractérisation de la saison des pluies est très sévère et lié à l'exploitation agricole selon des critères de précipitation proposés par la FAO. Ercicum *et al.* (1988) ont proposé une méthode originale d'étude des variations spatio-temporelles de la saison des pluies en région sahélienne à partir d'un transect N-S appliqué au Sénégal. Daouda (1989) a analysé les aspects climatiques du début de la saison des pluies au Niger selon divers critères appliqués à la culture du mil. Ces considérations d'ordre agroclimatologique doivent être prises en compte pour l'analyse des processus géomorphologiques actuels et l'analyse des documents satellitaires.

Avant d'aborder l'étude des tendances actuelles de la désertification sont analysés le modelé imprimé par les phases arides passées et son rôle dans l'organisation du réseau hydrographique de la région.

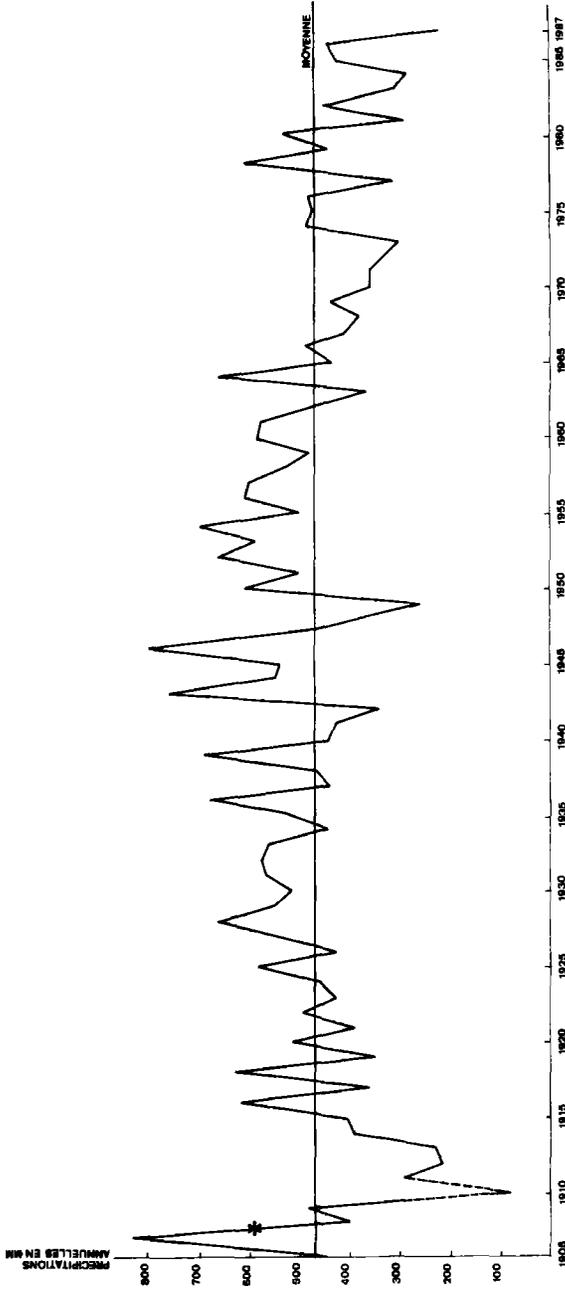


Figure 4. Évolution des précipitations annuelles à Zinder pour la période 1905-1987

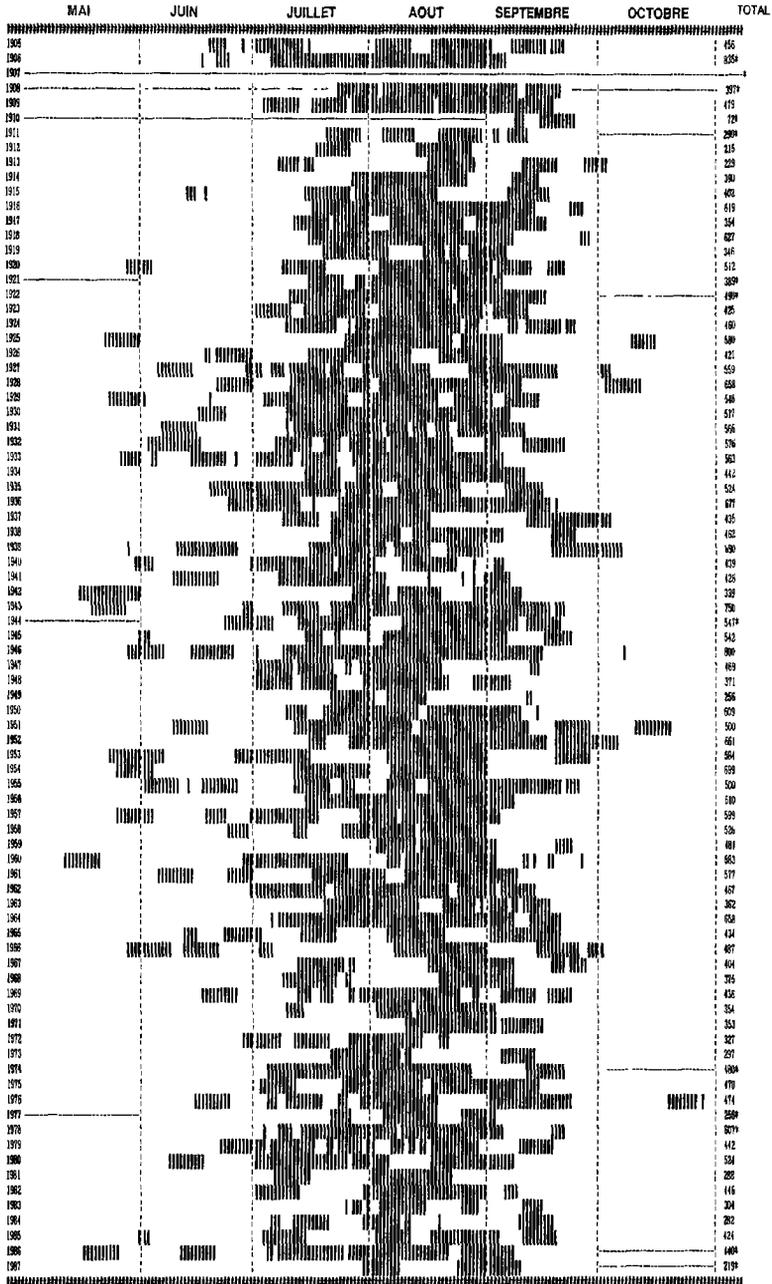


Figure 5. Évolution des précipitations à Zinder pendant la période 1905-1987 (- : pas de mesure de précipitation pour la journée, l : jour de la saison des pluies pour lequel le total des pluies des dix derniers jours est supérieur ou égal à 30 mm)

## **4 Étude photogéomorphologique**

Cette étude a été réalisée à partir de photographies aériennes panchromatiques au 1:60 000 (vol NIG 1975 40/600) prises en mars et avril 1975. Elle a permis de distinguer des reliefs résiduels et des systèmes dunaires et leur influence dans l'organisation du réseau hydrographique.

### **4.1 Les reliefs résiduels**

Ils se présentent comme des collines allongées (fig. 6 et 7) ou comme des alignements de petits massifs d'orientation NE-SO ou NNO-SSE. Ces collines et massifs forment aussi des arcs ou se disposent localement en structure circulaire. Ils sont, dans le secteur étudié, quartzitiques. Les autres types de roches n'affleurent que très rarement et sur des étendues très limitées. Ils émergent à peine des sables et apparaissent toujours très déprimés par rapport aux reliefs quartzitiques. L'organisation du modelé en bandes allongées, faisant alterner collines quartzitiques culminant à même hauteur et zones déprimées, laisse supposer l'existence d'une ancienne surface de pénéplanation. À partir de celle-ci, une profonde altération développée, soit dans des roches plus sensibles, soit dans des roches plus fracturées, suivie du déblaiement par les agents météoriques des altérites auraient dégagé les collines de quartzite non altéré. Les zones déprimées ont été, par la suite, le siège de dépôts et de remaniements éoliens.

De fait, les reliefs quartzitiques sont eux-mêmes très fracturés. Les accidents repérés ont deux orientations principales NO-SE à NNO-SSE (les plus fréquents) et NE-SO. Ces accidents ont quelquefois engendré d'importants décrochements. Ils sont actuellement exploités par les écoulements lors des précipitations, ce qui contribue à la désagrégation des reliefs quartzitiques.

On note aussi, dans les dépressions allongées et sur les affleurements non quartzitiques, l'existence de nombreux linéaments ayant les mêmes orientations que les cassures précitées. Ces linéaments pourraient correspondre à des fractures du socle, ce qui renforcerait l'idée d'une altération profonde d'un socle très fracturé lors d'une phase humide. Mais la médiocrité des affleurements ne permet que d'émettre des hypothèses. Cependant, l'analyse d'images satellitaires pourrait amener des informations précieuses sur la structure du socle subaffleurant.

### **4.2 La morphologie dunaire**

Deux grandes familles de dunes ont pu être distinguées dans le secteur étudié.

#### **4.2.1 Les dunes transversales**

La première famille de dunes est constituée d'éléments orientés NNO-SSE dont la longueur n'excède pas 5 km et dont la largeur est généralement inférieure à 0,5 km (fig. 8 et 9). Ces dunes jointives dans le sens NNO-SSE déterminent des couloirs interdunaires plus ou moins longs, plus ou moins profonds. Elles sont émoussées, leur sommet est souvent aplani. Lorsqu'elles sont suffisamment vigoureuses, on note une dissymétrie entre le versant oriental plus doux et le versant occidental en pente forte. Mais il est des secteurs où elles sont si érodées qu'elles sont très peu marquées dans la topographie. On devine alors leur

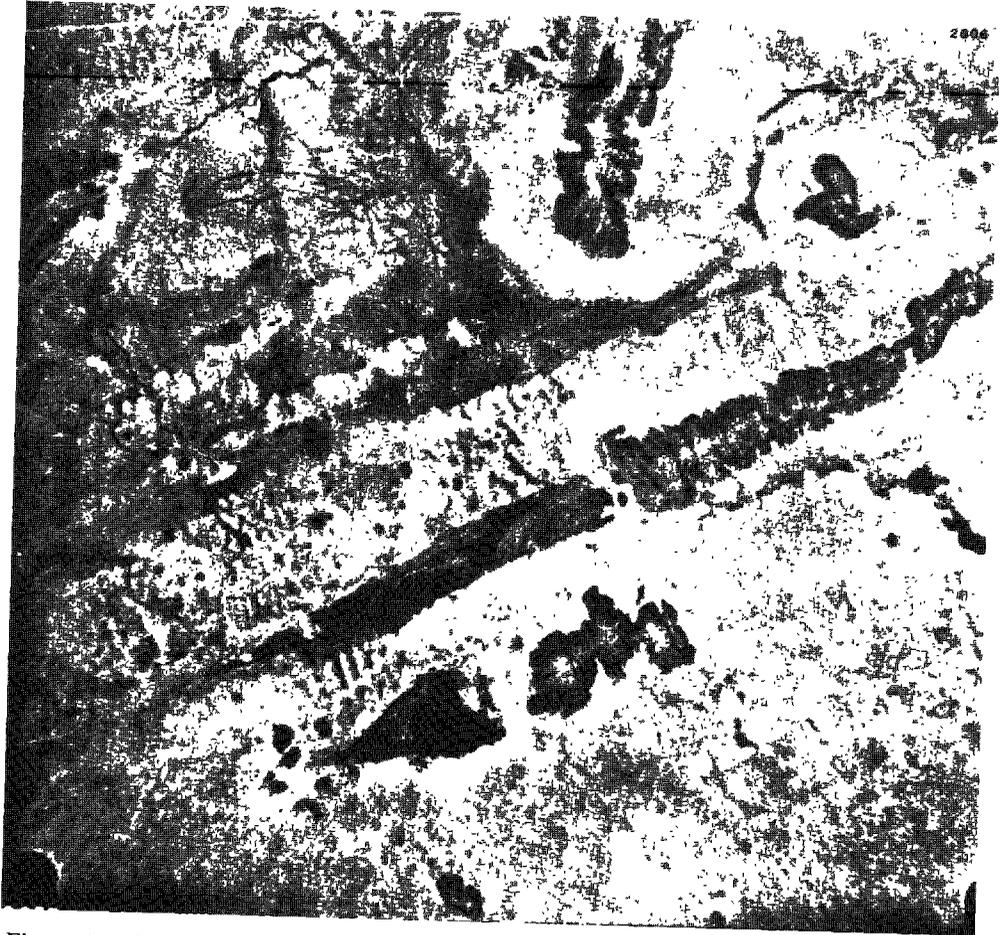


Figure 6. Illustration des reliefs résiduels (photo 2006)

morphologie en suivant les dépressions interdunaires qui se réduisent à une succession de petites taches noires sur les photographies aériennes.

#### 4.2.2 Les dunes longitudinales

La deuxième famille de dunes est constituée par de longues dunes beaucoup plus vigoureuses que les premières (fig. 10 et 11 et fig. 6 et 7). Elles peuvent avoir 8 à 12 km de long et 0,5 à 1 km de large. Elles sont souvent isolées et d'orientation NE-SO. Elles s'appuient fréquemment sur des éminences rocheuses et prennent naissance dans les couloirs entre les massifs. Elles ont, contrairement aux dunes transversales, des crêtes assez vives. Cependant, il arrive que leur sommet soit modelé par de petites dunes transversales mises en place ultérieurement.

Les dunes longitudinales perturbent le réseau hydrographique et entraînent la création de mares temporaires sur leurs flancs.

L'examen photogéomorphologique et la comparaison avec la littérature nous font envisager l'existence de deux générations de dunes, l'une contemporaine de la période

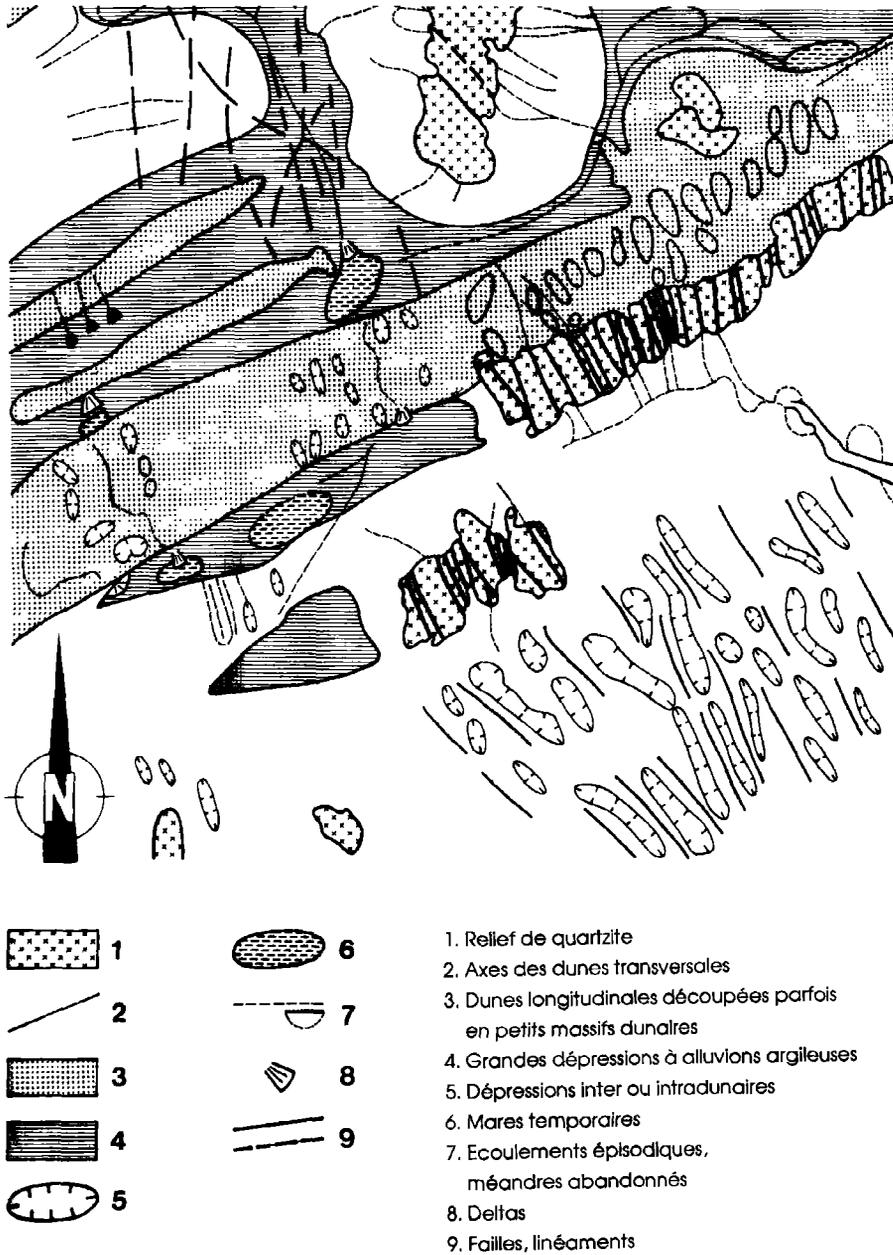
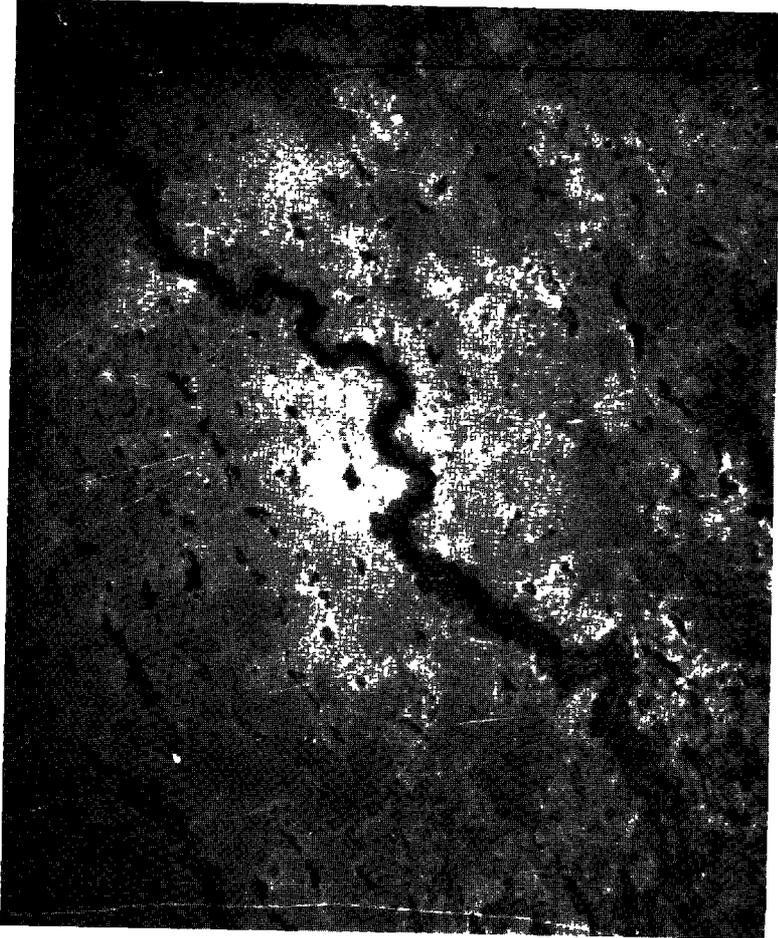


Figure 7. Illustration des reliefs résiduels (interprétation de la photo 2006)

antéghazalienne (65 000 à 40 000 ans AA) et l'autre de la période kaménienne (20 000 à 12 000 ans AA) (Durant et Mathieu, 1980 et 1981). Cependant, le façonnement des crêtes des dunes longitudinales nous laisse penser à une troisième génération de dunes vraisemblablement d'âge Holocène.



**Figure 8.** Illustration des dunes transversales (photo 1867)

Des compléments de recherches, entre autres sédimentologiques, seraient nécessaires pour l'étude de la genèse de ces systèmes dunaires, genèse qui pourrait aider à comprendre les conditions anciennes de désertification.

### **4.3 Modelé éolien et réseau hydrographique**

Les reliefs résiduels et la morphologie dunaire présentent donc deux orientations préférentielles NE-SO et NNO-SSE. Ces orientations sont aussi celles du réseau hydrographique.

#### **4.3.1 Les dépressions allongées à alluvions argileuses**

La première direction (NE-SO) est aussi celle des dépressions allongées à alluvions argileuses. Celles-ci sont des zones de stagnation d'eau localisées en des sites privilégiés :

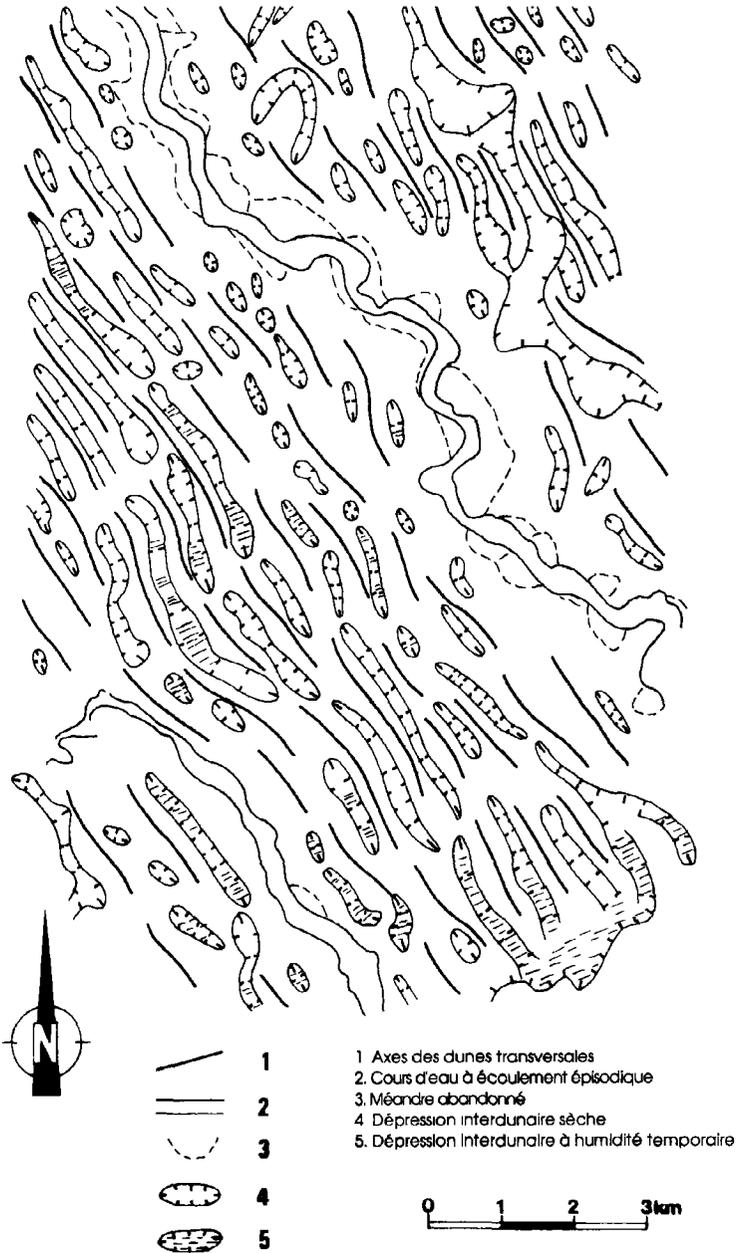
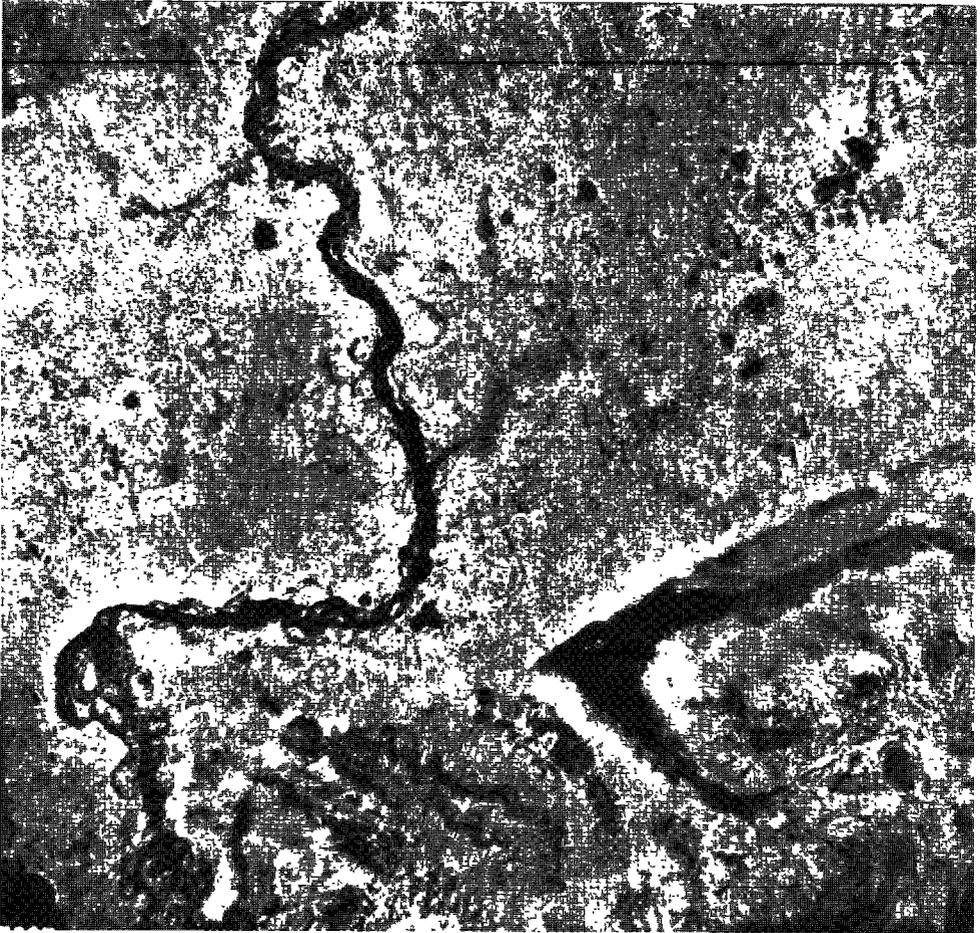


Figure 9. Illustration des dunes transversales (interprétation de la photo 1867)

en position sous le vent des reliefs résiduels. Malgré leur altitude modeste (entre 100 et 200 m d'altitude relative), ces reliefs constituent des obstacles qui provoquent la diffuence et l'élévation des courants éoliens transporteurs de sable. Dans les deux cas, la zone située en aval du relief est protégée des dépôts éoliens. Au contraire, le versant au vent, du fait de l'effet



**Figure 10.** Illustration des dunes longitudinales (photo 2002)

d'obstacle, est une zone de dépôts, d'où l'accumulation de sable observée sur les versants NE des reliefs résiduels. La diffluence entraîne la déviation latérale des courants éoliens; aussi, les dépôts s'effectuent-ils parallèlement à la zone protégée par les reliefs résiduels. Ainsi, sous le vent de ces reliefs existe une zone de déflation plus ou moins importante (fonction de l'envergure du relief lui-même) et de part et d'autre des dépôts longitudinaux de sable, ce qui explique la localisation, d'une part, de certaines dunes longitudinales (dans les couloirs entre les massifs et prenant appui sur des éminences rocheuses) et, d'autre part, des dépressions argileuses. Ces dernières se trouvent aussi au pied des dunes longitudinales en l'absence de tout relief résiduel. Ces dépressions collectent les eaux de ruissellement et forment ainsi des mares temporaires et même des lacs. L'étude de la variation de l'extension ainsi que des niveaux de ces lacs devrait permettre une approche des fluctuations climatiques qu'a connues la région en plus de permettre d'établir, par l'examen des sédiments lacustres, une stratigraphie du Quaternaire récent. La connaissance du comportement subactuel de ces points d'eau pourrait aider à mieux les exploiter dans le cadre d'aménagements visant à donner aux paysans des productions d'appoint.

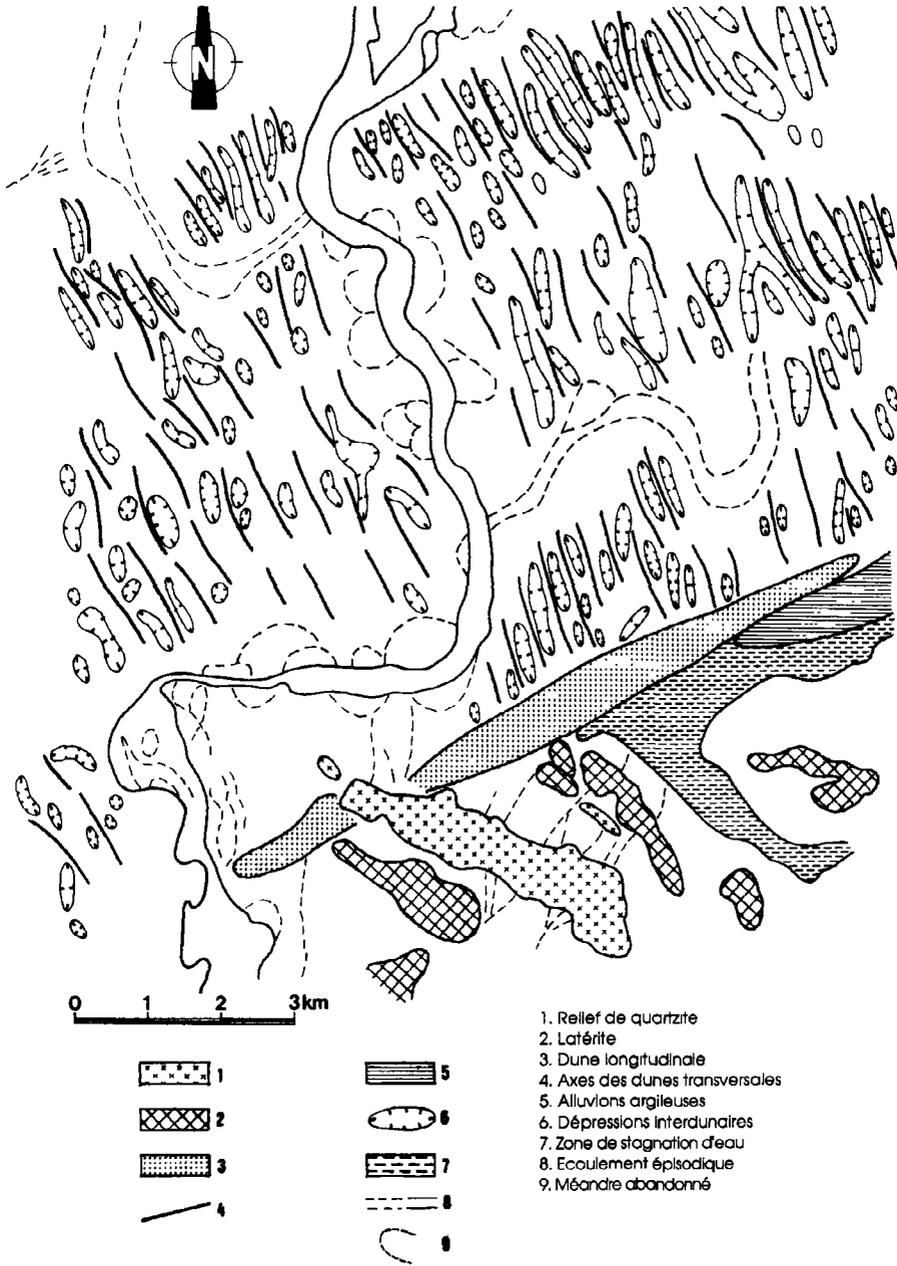


Figure 11. Illustration des dunes longitudinales (interprétation de la photo 2002)

### 4.3.2 *Modèle éolien et tracé des cours d'eau*

La deuxième orientation (NNO-SSE) est celle des dunes transversales et des dépressions interdunaires. Elle correspond aussi aux principaux axes de drainage.

Les dépressions sont plus ou moins allongées et plus ou moins profondes en fonction de la vigueur du système dunaire transversal. Elles peuvent être sèches ou à humidité temporaire. En général, l'humidité devient de plus en plus importante du NNO vers le SSE (sens de drainage), mais aussi des zones où les dépôts sableux sont importants vers celles où ces dépôts sont peu épais (fig. 8), ce qui fait supposer l'existence d'un sous-écoulement actif qui n'apparaît que dans les points suffisamment bas de la topographie. Lorsque le niveau de la nappe monte, les dépressions peuvent avoir une humidité importante. La coalescence de ces fonds humides peut donner alors naissance à un véritable chenal où l'écoulement peut être plus ou moins important et durable en fonction de l'alimentation. Ainsi (fig. 8), ce sont les dépressions interdunaires qui se transforment en chenaux. Certains chenaux apparaissent et disparaissent sans aboutir à un collecteur plus important. Mais, si le modèle éolien se prête à la formation de chenaux, il constitue aussi parfois un barrage pour l'écoulement. En effet, les cours d'eau ont souvent des coudes à angles vifs. Ces coudes sont le résultat de l'oblitération (fig. 10) du réseau hydrographique par les systèmes dunaires, notamment longitudinaux. Ces barrages à l'écoulement peuvent s'être édifiés antérieurement ou postérieurement à l'établissement du chenal. Dans tous les cas l'écoulement souterrain permet la communication des eaux de part et d'autre de l'obstacle.

## 5 Conclusion

Cette note a tenté de montrer l'intérêt d'une étude approfondie de la région de Zinder. De nombreux problèmes ont été soulevés pour lesquels une ébauche de réponse a été proposée tant du point de vue morphologique qu'hydrographique. Sur ce dernier point, l'intérêt est double : scientifique et pratique. L'étude des points d'eau pourrait servir à l'aménagement de cette région. On peut déjà dire que si les linéaments repérés dans les dépressions argileuses sont des fractures du socle, ils présentent un intérêt certain pour des sondages pour la recherche d'aquifères profonds. Des puits creusés dans ces sites seraient non seulement protégés de l'ensablement mais aussi localisés dans des zones où l'alimentation en eau, même lors de précipitations médiocres, serait mieux assurée. En outre, la présence des lacs est un autre atout pour les objectifs d'aménagement, mais aussi pour l'établissement d'une stratigraphie du Quaternaire.

Nous pensons donc qu'il est important d'entreprendre d'autres approches afin de mieux préciser les éléments de réponse aux différents problèmes posés.

En particulier, l'analyse d'une image SPOT pourrait apporter un éclairage nouveau pour la compréhension des problèmes morphologiques, hydrographiques et des phénomènes de désertification :

- réalisée à une période différente des photographies aériennes, elle permettra par comparaison avec celles-ci, le suivi des modifications morphologiques consécutives à l'évolution récente de la désertification;

- on peut s'attendre en outre qu'une image SPOT qui date de la fin de la saison humide (alors que les photos ont été réalisées en fin de saison sèche : mars-avril) mettra en évidence les linéaments et autres structures géologiques favorables à la concentration d'humidité;

- enfin, par la vue synoptique qu'elle offre, l'image satellitaire positionnera les éléments du modèle dans un ensemble plus vaste et aidera ainsi à mieux comprendre leur agencement.

## 6 Remerciements

Nous remercions le Service de la météorologie du Niger et tout particulièrement Monsieur Mamadou Daouda, chef de la section de climatologie, d'avoir accepté de nous livrer les données météorologiques.

## 7 Références

- BOWDEN, P., O. VAN BREEMEN, J. HUTCHINSON et D. C. TURNER, 1976. Paleozoic and mesozoic age trends for some ring complexes in Niger and Nigeria. —*Nature*, 259, n° 5541, p. 297-299.
- DAOUDA, M., 1989. Les dates favorables des semis au Niger : exemple de la culture du mil. — Mémoire inédit de maîtrise en Sciences de l'environnement, option agroclimatologie, Fondation universitaire luxembourgeoise, Arlon, Belgique, 90 p.
- DURAND, A. et P. MATHIEU, 1980. Le Quaternaire supérieur sur la rive droite du lac Tchad. — Cahiers de l'ORSTOM, série Géologie, vol. XI, n° 2, p. 189-203.
- DURAND, A. et P. MATHIEU, 1981. Évolution paléogéographique du bassin tchadien au Pléistocène supérieur. —*Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, vol. XXII, fasc. 4-5, p. 329-341.
- ERPICUM, M., M. BINARD, J. P. PETERS et J. ALEXANDRE, 1988. Une méthode d'analyse des caractéristiques de la saison des pluies en région sahélienne (exemples pris au Sénégal). —in M. Erpicum (Réd.). Actes des Journées de climatologie. 5-7 novembre 87, Presses universitaires de Liège, p. 43-56.
- FAURE, H., 1966. Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger oriental. —Mémoire du Bureau de recherches géologiques et minières, n° 47, et Publication de la Direction des mines et de la géologie du Niger, n° 1, 630 p.
- GREIGERT, J. et R. POUUNET, 1967. Notice explicative sur la carte géologique de la République du Niger à l'échelle 1:2 000 000. —Éditions du Bureau de recherches géologiques et minières, 62 p.
- JOO', J. et A. FRANCONI, 1983. Plan minéral de la République du Niger. État actuel des connaissances sur la géologie du Niger. 2<sup>e</sup> partie. —Ministère des mines et des industries, 314 p.
- MIGNON, R., 1970. Carte géologique au 1:200 000 du Damagaram-Mounio et du Sud Maradi. — Bureau de recherches géologiques et minières, République du Niger, Ministère des travaux publics, des transports, des mines et de l'urbanisme, Direction des mines et de la géologie, rapport 70 AB1 001 NIA.
- OUSMANE, B., 1978. Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle du Sahel : l'hydrogéologie du Damagaram occidental (environs de Zinder - Niger). —Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> cycle, Université de Montpellier, 66 p.



# 15

## **Essai méthodologique de classement et cartographie des terres en vue de la conservation des sols et des eaux en zones semi-arides : apport de la télédétection**

ABDELAZIZ MERZOUK\*, MOHAMMED BADRAOUI\*, DRISS FASSI\*,  
HASSAN AKESKOUSS\*, FERDINAND BONN\*\*, MARIO HINSE\*\* et  
HUGH GWYN\*\*

*\*Département des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II,  
B. P. 6202, Rabat, Maroc*

*\*\*Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de  
Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1*

### **Résumé**

Jusqu'à présent, le classement des terres au Maroc, en vue de la conservation des eaux et des sols en zones arides et semi-arides, n'a pas été au-delà de quelques essais d'application des systèmes établis ailleurs. De ce fait, il s'avère nécessaire et même urgent d'orienter les recherches vers la conception d'une méthodologie pour la classification des terres qui s'adapte aux réalités marocaines. C'est dans ce cadre que s'inscrit cet essai de méthodologie à travers l'exemple de la région de Ben Ahmed qui est située dans la partie nord du plateau des phosphates. Les facteurs géomorphologiques qui jouent le rôle primordial, essentiellement la valeur du substrat géologique et des formations superficielles liées à la pente, ont constitué pour l'essentiel la base de la classification proposée. Il a été aussi tenu compte d'autres facteurs importants (profondeur du sol, texture, pierrosité, capacité de rétention d'eau) mais qui interviennent de façon complémentaire. L'approche pédogéomorphologique constitue donc la base du système proposé pour cette région. Les premiers essais d'application de la télédétection (Landsat 5 TM) à la cartographie des sols de la région de la Chaouia offrent la possibilité d'évaluation rapide et précise des paramètres utilisés dans

ce système de classification. Ce dernier, tout en permettant la cartographie des capacités agrologiques des terres, apporte aux décideurs, aux techniciens et aux agriculteurs un ensemble de recommandations concrètes relatives aux itinéraires techniques visant la conservation des sols et des eaux en zones arides telles la zone étudiée.

## 1 Introduction

Les problèmes de la dégradation de l'environnement et de la désertification sont principalement le résultat d'une utilisation inadéquate et inefficace des ressources en eau et en sol. Cet état de fait est particulièrement grave dans les zones arides et semi-arides où l'eau est le principal facteur limitant de la production agricole. L'objectif de la conservation de l'eau et du sol dans ces zones vulnérables vise une production agricole optimale et durable. Ceci implique l'utilisation sans aucun gaspillage des deux ressources naturelles fondamentales de la production : l'eau et le sol. Dans l'analyse du problème de la conservation des eaux et du sol pour l'élaboration des schémas d'aménagement, le classement des terres constitue la base essentielle.

Jusqu'à présent, le classement des terres au Maroc, en vue de la conservation des eaux et des sols en zones arides et semi-arides, n'a pas été au-delà de quelques essais d'application de systèmes établis ailleurs avec quelques modifications (Viertmann, 1978; Debazac et Thirion, 1978; Oshiri, 1982; MARA, 1985). Toute la problématique de l'adaptabilité des différents systèmes étrangers (Land Capability, FAO, etc.) découle des réalités socioéconomiques, géologiques, géomorphologiques, pédologiques et climatiques spécifiques au Maroc.

Il s'avère nécessaire et même urgent d'orienter les recherches vers la conception d'une méthode pour le classement et la cartographie des terres qui s'adapte aux conditions marocaines.

En zones méditerranéennes arides et semi-arides, l'approche pédo-géomorphologique pourrait constituer une bonne base pour y parvenir (Bock *et al.*, 1981). En outre, les premiers essais d'application de la télédétection (Landsat 5 TM) à la cartographie des sols de la région de la Chaouia (Hinse *et al.*, 1989) offrent la possibilité d'utilisation de cette nouvelle technique dans l'établissement d'un système de classement et de cartographie des terres.

C'est dans le cadre d'un effort de réflexion sur les possibilités d'application de la télédétection en cartographie et classement des terres que s'inscrit ce travail à travers l'exemple de la région de Ben Ahmed qui est située dans la partie nord du plateau des phosphates.

## 2 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude fait partie d'un projet d'aménagement intégré dans la province de Settat au nord-ouest du Maroc (fig. 1). Elle est située dans une zone de contact entre : 1) le plateau central, au nord-est, qui est un massif ancien avec principalement les schistes et les quartzites; 2) le plateau des phosphates, au sud et au sud-est, qui est un bassin sédimentaire éocène et crétacé et 3) la plaine de Berrechid au nord qui constitue une plaine de subsidence. La zone d'étude couvre une superficie d'environ 60 000 hectares et est représentée sur la carte topographique au 1:50 000 de la feuille de Ben Ahmed.

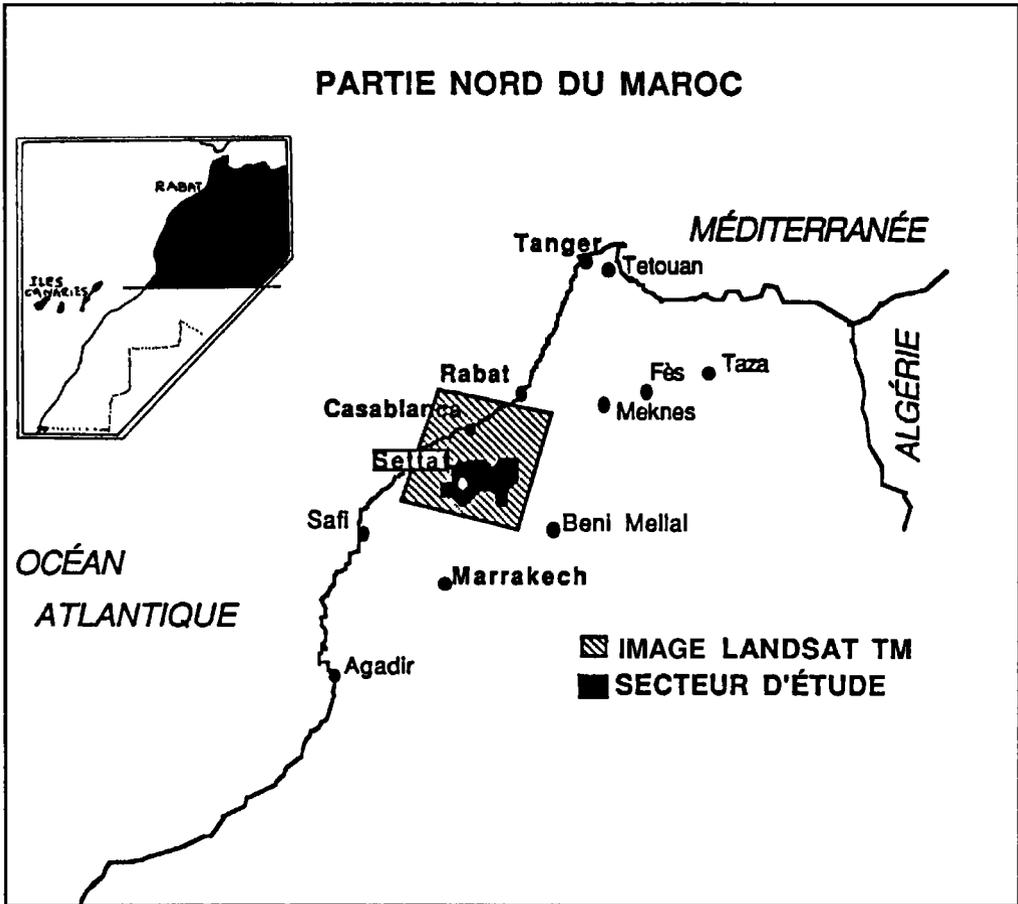


Figure 1. Carte de la partie nord du Maroc montrant la zone couverte par l'image satellitaire ainsi que le secteur d'étude

L'ensemble des reliefs observés sous le rapport de leur forme et de leur organisation s'est élaboré à partir d'une structure simple et d'une érosion différentielle. Une carte morphostructurale dressée à cet effet met en évidence les caractères de la structure et du modelé qui expliquent la diversité topographique. Il ressort que la nature lithologique très variée est le facteur principal de différenciation morphologique.

Le climat régional est du type semi-aride mésothermique à influence océanique (Akeskouss, 1985). La pluviométrie moyenne annuelle varie de 390 à 410 mm et est concentrée surtout en hiver entre novembre et mars. Les variations inter- et intra-annuelles des précipitations sont très importantes.

Du point de vue pédologique, les sols calcimagnésiques (Xérocchrepts) et les sols isohumiques à croûtes et à encroûtements calcaires (Calcixerolls) sont les plus représentés dans le plateau de Ben Ahmed sur marno-calcaires et dans la plaine de Berrechid et les vallées du plateau respectivement (MARA, 1985).

Comme il se produit fréquemment en Afrique du Nord, les grands groupes de sols présentent un lien évident avec le relief, le matériel géologique dont ils sont issus ainsi que

le facteur climatique. L'accumulation du calcaire, l'isohumisme et la vertisolisation sont les principaux processus pédogénétiques dominants.

Les cultures annuelles (céréales d'hiver et de printemps (53%), légumineuses alimentaires (14%), cultures maraîchères (4%), cultures fourragères (3%), et jachères (13%)) occupent la totalité de la surface agricole utile (SAU). Treize pour cent de la superficie totale est inculte ou utilisée comme parcours (Akeskouss, 1985).

### **3 Méthode**

L'objectif poursuivi est le classement des terres sur la base des données recueillies au cours des analyses topographiques, morphostructurales et pédologiques et sur la base des éléments socio-économiques. Pour atteindre cet objectif, nous avons conduit le travail à différents niveaux, sur le terrain et par télédétection, comme suit :

- Inventaire des processus morphogénétiques à travers la reconnaissance des formes d'érosion et la détermination de la valeur de la pente et de la profondeur du sol. Une carte des formes de l'érosion a été établie. Une attention particulière a été donnée à la description des croûtes et encroûtements calcaires dans le profil pédologique et à la charge caillouteuse de surface.

- Nous avons établi une carte des pentes à partir de la carte topographique au 1:50 000 avec une équidistance de 10 m.

- Des enquêtes réalisées sur le terrain sous forme d'interviews auprès des agriculteurs ont porté sur la dénomination vernaculaire des sols, les difficultés de travail du sol, les problèmes de ressuyage et de rétention d'eau dans les sols et les potentialités de production des terres.

- L'image Thematic Mapper du satellite Landsat 5 de la région a été utilisée après corrections radiométrique et géométrique (cadre 202-37 du 2 octobre 1986). La démarche a reposé sur une analyse visuelle des différentes bandes à partir de critères de description prédéfinis. Une attention particulière a été consacrée à l'extériorisation des formes de relief et à la discrimination entre les différents types de sol.

### **4 Résultats et discussions**

L'ensemble des données recueillies et de leurs analyses nous a permis d'éprouver une méthode et de fixer les critères à prendre en considération.

Il nous semble que le facteur géomorphologique doit être utilisé comme une somme de variables primordiales pour le classement. En effet, ce facteur comprend un grand nombre de variables dont l'énumération fait apparaître les principaux facteurs de pédogenèse et de morphogénèse de la région. Par conséquent, si nous voulons formuler ou indiquer les grandes lignes d'une méthode, il nous faut isoler les plus importantes de ces variables.

#### **4.1 Les variables du classement**

La variable la plus importante est la nature lithologique des couches géologiques. Dans le plateau créacé de BebAhmed, les sols sont si peu profonds que partout l'influence de la roche se fait sentir le plus souvent directement. Dès que les pentes deviennent sensibles, non

seulement la profondeur des sols devient insignifiante, mais leur évolution s'avère également limitée. Ils sont alors constamment rajeunis par dégradation en amont et par recouvrement en aval. Ceci suggère la nécessité de prendre comme repères de base pour cet essai de classement à la fois le substrat géologique, les pentes et aussi la situation dans le paysage en précisant s'il s'agit d'un milieu d'ablation ou d'un milieu de réception. Ceci nous amène donc à enrichir la notion de substrat lithologique par la prise en compte des formations superficielles.

La méthode de classement proposée ici s'appuie donc essentiellement sur la valeur des substrats lithologiques et des caractères morphologiques liés à la pente. Nous avons distingué les faciès suivants : les roches dures, les roches tendres et les formations superficielles.

#### 4.1.1 Roches tendres

Nous avons préparé un tableau à double entrée (fig. 2) afin de rendre compte des principales subdivisions : 1) quant à leurs comportement vis-à-vis de l'érosion en forte pente et 2) en ce qu'elles ont d'important pour les possibilités de mise en valeur sous le rapport de la profondeur des sols en pente. Nous avons affecté un chiffre indiquant les possibilités d'intervention et d'amélioration comme suit : 0 ou 1 : pratiquement aucune possibilité d'aménagement; 2 : mesures très sévères d'intervention; 3 : mesures sévères d'intervention; 4 : mesures peu sévères d'intervention; 5 : aucune mesure d'intervention. La figure 2 présente les principales subdivisions des surfaces en roches tendres dans la zone de Ben Ahmed.

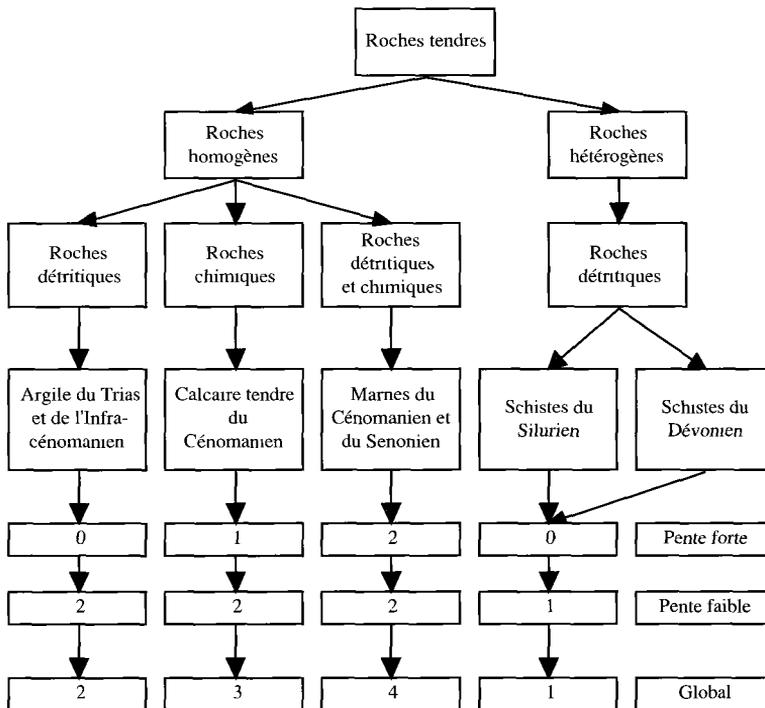


Figure 2. Principales subdivisions des surfaces en roches tendres dans la zone d'étude de Ben Ahmed et classement des possibilités d'intervention ou d'amélioration (0 : nulles, 5 : grandes)

#### 4.1.2 Roches dures

Leurs subdivisions doivent être fondées sur le faciès. C'est ce facteur qui commande leur degré de cohésion, et par conséquent les modalités d'action des processus morphogénétiques (fig. 3).

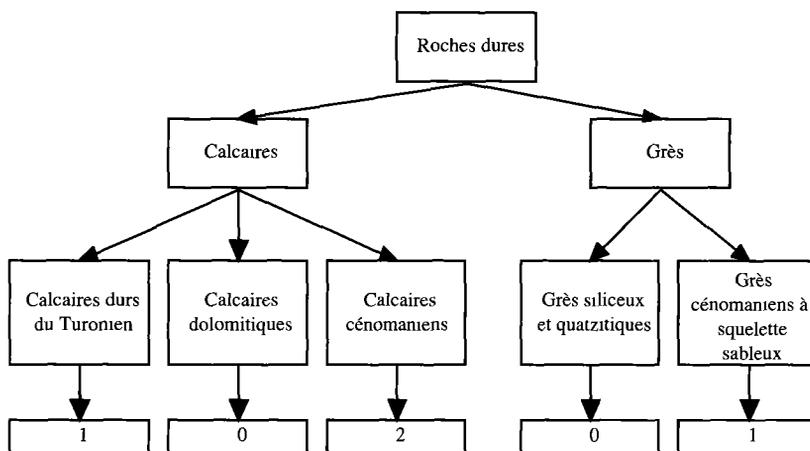


Figure 3. Principales subdivisions des roches dures trouvées dans la zone de Ben Ahmed et classement des possibilités d'intervention ou d'amélioration (0 : nulles, 5 : grandes)

#### 4.1.3 Formations superficielles

Pour ces formations, nous avons précisé leur nature et leur situation géographique (fig. 4).

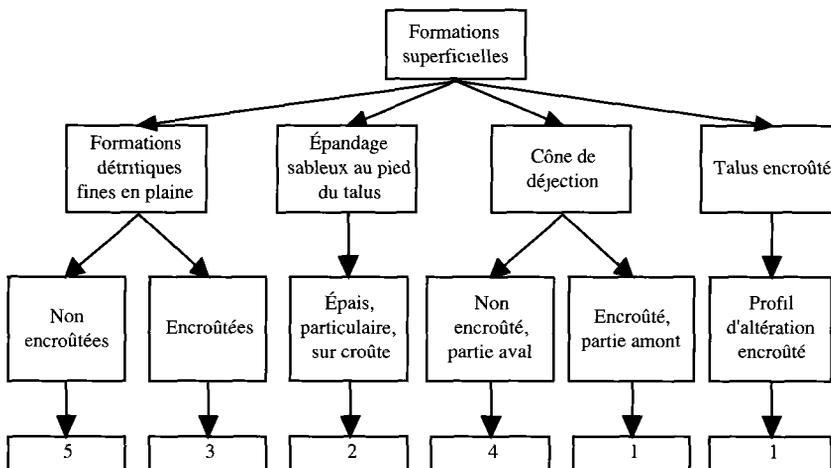


Figure 4. Principales subdivisions des formations superficielles trouvées dans la zone de Ben Ahmed et classement des possibilités d'intervention ou d'amélioration (0 : nulles, 5 : grandes)

- Dans la plaine de Berrechid et la dépression de Mdakra sont situées des formations détritiques fines et encroûtées. En direction du talus, nous avons un champs d'épandage sableux non encroûté.

- En bordure du talus de flexure, nous trouvons des cônes de déjections et des profils d'altération encroûtés.

Sur les figures 2, 3 et 4, l'ordre croissant des chiffres indique des situations de plus en plus avantageuses du point de vue capacité agrologique et de moins en moins sévères d'intervention.

Les autres facteurs importants mais complémentaires qui ont été utilisés dans ce système de classement sont : la profondeur, la texture et la charge caillouteuse. Ces trois variables déterminent la capacité de stockage de l'eau par les sols et donc la réussite d'une agriculture pluviale. Comme les zones arides et semi-arides méditerranéennes sont caractérisées par un excès d'eau en hiver et un déficit d'eau en été, il est nécessaire de stocker le maximum d'humidité pour la fin du cycle des cultures.

## **4.2 Les catégories retenues**

Nous avons créé six catégories ou classes de terres désignées par les lettres A, B, C, D, E et F en potentialités décroissantes.

Catégorie A : Ce sont des terres portées par des formations superficielles non encroûtées de la plaine de Berrechid. Sur ces terres de textures équilibrées à fines, des systèmes de culture intensifs dans le but d'augmenter leur productivité sont possibles sans aucune mesure de conservation. Cette catégorie couvre 21% de la superficie totale.

Catégorie B : Ce sont des terres portées par des formations superficielles fines encroûtées de la plaine de Berrechid, par les formations sableuses du pied de talus et par la formation du Sénonien moyennement profonde du plateau de Ben Ahmed. Dans ce cas, la croûte calcaire est défonçable car au-dessous, il y a un profil d'altération argileux ou des éléments détritiques d'épandage. Elle couvre 13,9% de la superficie totale.

Catégorie C : Ce sont des terres fortement encroûtées reposant sur des cône de déjection ou sur des profils d'altération à dalle compacte coiffée d'une pellicule rubanée. La mise en oeuvre de moyens assez importants pour briser la croûte calcaire, là où la pente le permet, est à recommander. Cette catégorie ne couvre que 0,7 % de la superficie totale.

Catégorie D : Ce sont des terres moyennement érodées ou de stabilité moyenne. Elles sont limitées par la proximité d'un substrat calcaire dur ou par une croûte non défonçable mais en pente modérée ou faible. L'apport de matières organiques associé à des méthodes culturales adéquates (cultures en courbe de niveau ou en bandes alternées) sont seuls garantis d'une bonne conservation du sol et de l'eau. Ces terres sont très répandues dans le plateau de Ben Ahmad sur les calcaires du crétacé et couvrent 24,6 % de la superficie totale.

Catégorie E : Ce sont des terres faiblement évoluées ou érodées ou discontinues. Elles se trouvent sur des pentes modérées à substrat difficile. Leur situation géomorphologique ne leur assure ni la commodité de l'exploitation ni les facilités d'amélioration et d'enrichissement (35,3%).

Catégorie F : Ce sont des terres extrêmement dégradées et improductives sur des affleurements rocheux durs quelle que soit la pente ou bien sur des affleurements rocheux tendres avec une forte pente. Seule la végétation naturelle (reboisement) permet de protéger ces terres (4,6%).

Chaque catégorie ainsi définie a été subdivisée en sous-catégories en fonction de la texture de l'horizon de surface, de la nature de la roche mère, de la perméabilité et de la charge caillouteuse de surface et dans le profil pédologique.

### **4.3 Apport de la télédétection**

La télédétection satellitaire constitue une source d'information très importante en sciences de la Terre. Elle porte sur la distinction spatiale et spectrale des caractéristiques structurales et lithologiques (Gwyn, 1989). La vue synoptique que permet cette technique est un atout important pour l'interprétation à l'échelle régionale.

Au niveau de l'interprétation des images satellitaires (TM) de la zone d'étude, l'attention a été dirigée vers la reconnaissance des formes de relief et leurs relations avec les substrats géologiques, la localisation des affleurements rocheux et des cônes de déjections au niveau du talus de flexure, l'utilisation des terres et la discrimination entre les différents types de sols. D'autres variables importantes pour le classement, telles que la profondeur du sol et la présence ou l'absence de croûtes calcaires, ne sont pas déterminées directement par télédétection. Cependant les indications de l'état de surface (texture et pierrosité surtout) extraites par télédétection et le raisonnement géomorphologique associés à des vérifications de terrain nous ont permis d'avoir suffisamment d'informations sur ces variables.

Le rehaussement de l'image par une analyse en composantes principales des bandes infrarouges (TM4, TM5 et TM7) a permis la meilleure discrimination entre les types de sol et a fait ressortir de façon très claire la topographie. Les bandes TM5 et TM7 ont présenté les meilleures caractéristiques spectrales pour la différenciation des grands types de sol de la région selon la texture de l'horizon de surface et la position dans le paysage.

Des essais de classification numérique supervisée de l'image sur différentes bandes et combinaisons de bandes infrarouges ont montré que l'utilisation de cette technique est très prometteuse pour l'établissement des cartes géomorphologiques et pédologiques, et par voie de conséquence, pour avoir les données nécessaires pour le classement. La distinction entre les catégories extrêmes du classement proposé (A et B vs E et F), puisqu'elles sont localisées dans des topographies différentes et des substrats différents, a été facile à faire par télédétection. Le recours aux travaux de terrain et aux cartes pédologiques a été nécessaire pour différencier entre les catégories voisines. Ceci est particulièrement le cas des catégories B, C et D dont la distribution est surtout basée sur la présence d'une croûte calcaire défonçable ou non défonçable et sur la profondeur du sol au niveau du plateau de Ben Ahmed.

La superposition des éléments cartographiques (pentes, unités pédo-géomorphologiques issues de l'image classifiée, carte de profondeur du sol, carte de texture, etc.) pour la délimitation des zones «homogènes» correspondant à chaque classe ou sous-classe de terre a été faite manuellement. Cette tâche sera prochainement facilitée par l'utilisation d'un système d'information géographique qui intégrera, sous forme numérique, toutes les données nécessaires au classement proposé. Un tel système de synthèse permettra l'utilisation facile et la vulgarisation du produit du classement des terres (transfert de technologie).

## **5 Conclusion**

Les facteurs géomorphologiques qui jouent le rôle primordial, essentiellement la valeur du substrat géologique et des formations superficielles liées à la pente, ont constitué pour l'essentiel la base du classement proposé. Les éléments de l'analyse pédo-géomorphologique ont permis de regrouper les terres en six catégories (A, B, C, D, E et F) qui présentent des possibilités d'aménagement comparables vis-à-vis de la conservation de l'eau et du sol.

La vue synoptique de l'image satellitaire (TM) classifiée en utilisant soit des combinaisons de bandes infrarouges, soit l'analyse en composantes principales de ces bandes, a permis une

visualisation très nette des différentes unités topographiques qui sont liées aux substrats géologiques. L'interprétation des images infrarouges a permis également une bonne discrimination entre les grands types de sol.

Le présent travail n'est qu'une esquisse donnant les grandes lignes d'une méthode de classement des terres en vue d'une meilleure utilisation des eaux et des sols en zones arides et semi-arides. Il serait possible d'intégrer les images satellitaires aux autres données pédogéomorphologiques et socio-économiques numérisées pour obtenir des cartes de classement facilement utilisables par les aménagistes et les décideurs. L'utilisation d'un système d'information géographique est nécessaire à cet égard.

## **6 Remerciements**

Nous remercions Monsieur le Gouverneur de Sa Majesté et la Direction provinciale de l'agriculture de Settat pour leurs facilités accordées sur le terrain.

Nous remercions aussi le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) du Canada qui a subventionné en partie ce projet (contrat de recherche 3-P-87-1023). Nous remercions enfin M. Houssain Korkot du Département des sciences du sol de l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II pour sa contribution à la préparation du document.

## **7 Références**

- AKESKOUSS, H., 1985. Classement des terres en vue de la conservation de l'eau et du sol dans une zone semi-aride, application dans la région de Ben Ahmed. —Mémoire de fin d'études, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, 160 p.
- BOCK, L., J. CALEMBERT et L. MATHIEU, 1981. Réflexion sur les aptitudes des terres en milieu méditerranéen. —Pédologie, XXXI, p. 47-64.
- DEBAZAC, E. F. et J. THIRION, 1978. Méthodologie d'élaboration des schémas directeurs d'aménagements antiérosifs et de conservation des sols au Maroc. —Rapport technique n° 2. Projet AG : DP/MOR/71/536, FAO, Rome, 88 p.
- GWYN, Q. H. J., 1989. Télédétection appliquée à la prospection minière et hydrogéologique, socle précambrien et ceinture plissée. —Actes du premier colloque maroco-canadien sur les applications de la télédétection aux sciences de la Terre, 20-21 juin 1989, IAV Hassan II, Rabat, p. 29-31.
- HINSE, M., M. BADRAOUI, Q. H. J. GWYN, A. MERZOUK et F. BONN, 1989. Interprétation visuelle de l'image satellitaire Landsat 5 Thematic Mapper de la province de Settat. —Actes du premier colloque maroco-canadien sur les applications de la télédétection aux sciences de la Terre, 20-21 juin 1989, IAV Hassan II, Rabat, p. 25-26.
- MARA (Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire), 1985. Étude pédologique au 1:100 000 de la région de Settat-Ben Ahmed. —Rapport, marché n° 46/82 DPA/42, Rabat, 239 p.
- OSRHIRI, A., 1982. Classement des terres en fonction de l'érosion hydrique dans un but d'aménagement, exemple du bassin versant du Tleta, Rif Occidental. —Revue de l'Association marocaine des sciences du sol, ATTORBA, vol. IX, n° 5, p. 27-47.
- VIERTMANN, W., 1978. Programmation et réalisation des travaux dans les bassins versants des montagnes du nord du Maroc. —Rapport technique n° 3, Projet AG : DP/MOR/71/536, FAO, Rome, 194 p.

