

21

Essai de caractérisation géométrique des différentes unités d'un erg actif à l'aide des données satellitaires panchromatiques SPOT, application à l'erg Akchar (Mauritanie occidentale)

JEAN-CLAUDE PION*, YVES BESNUS**, HERVÉ YESOU** et MAX
DEYNOUX***

*ORSTOM/GSTS, **CNRS/GSTS, ***CNRS, *Institut de géologie, 1, rue Blessig,
67084 Strasbourg cedex, France*

Résumé

L'étude de la terminaison nord-est de l'erg Akchar (Mauritanie) s'intègre dans un vaste programme international de recherches sur les migrations d'ergs. La finalité des recherches est l'étude dynamique des formations dunaires pour l'application à la sédimentologie des formations éoliennes anciennes et pour l'aide au développement routier du pays.

L'erg Akchar a été sélectionné à partir de l'inventaire des déserts réalisé grâce aux images Landsat MSS et aux photographies Skylab. Une esquisse cartographique de plusieurs zones-tests a été dressée au 1:10 000 à l'aide d'une image SPOT panchromatique, puis vérifiée sur le terrain en 1989.

Les thèmes caractéristiques du paysage dunaire de l'erg Akchar sont mis en évidence par télédétection à haute résolution. D'une part, les unités thématiques ont une géométrie particulière accessible par une résolution spatiale de 10 mètres. D'autre part, l'étalement dynamique des luminances apparentes est suffisant pour permettre une distinction de la plupart des principaux thèmes. La forme bimodale des histogrammes des fréquences des zones-tests a permis de traiter les images en deux groupes, séparant les thèmes de haute et de basse luminance apparente.

Un seuillage de chacun des groupes de luminance a été réalisé, soit à l'aide du logiciel «ERDAS», soit du logiciel «Planètes». Des images fausses couleurs ont été produites. Chaque teinte, représentant un thème particulier, correspond à une faible variation de luminance, de 1 à 2 niveaux de quantification tout au plus.

Une étude des données spectrales des mêmes zones est en cours à l'aide d'une image Landsat TM. La cartographie est confirmée, mais de nouvelles distinctions apparaissent dans les formations dunaires et interdunaires.

1 Cadre géomorphologique et évolution de l'erg Akchar

L'erg Akchar est l'erg actif le plus au sud du Sahara occidental. Il se situe au nord-ouest de la Mauritanie dans la zone de transition entre le Sahara où les dunes sont actives, et le Sahel mauritanien, où elles sont fixées (fig. 1). L'erg Akchar s'étend depuis les falaises de l'Adrar jusqu'à l'océan Atlantique sur une distance de 400 km. Il est orienté N 55 E, parallèlement aux ergs sahéliens situés plus au sud. Atteignant plus de 60 km de large dans sa partie septentrionale, il se rétrécit vers la mer. La terminaison nord de l'erg est marquée au vent par une séparation en bras multiples. Ceux-ci sont posés sur le socle cristallin qui apparaît ainsi masqué par des voiles sableux s'étendant jusqu'au pied de la falaise de l'Adrar. Les formations dunaires de l'erg Akchar sont constituées de dunes linéaires en cordons complexes avec très souvent des barkhanes, ou dunes en croissant, surimposées.

La plupart des formations dunaires mauritaniennes se sont constituées durant l'Ogolien, 20 000 à 13 000 ans AA, lors de la dernière glaciation. Le développement maximal a eu lieu vers 18 000 ans AA, alors que le niveau marin était très bas, entre -200 m et -100 m par rapport au niveau actuel. Le climat était froid, très venteux, avec de faibles précipitations (Fryberger, 1980; Talbot, 1980; Hebrard, 1983; Sarthein *et al.*, 1981).

Au cours du Tchadien, 12 000 à 8000 ans AA, les conditions climatiques changent. Le niveau des mers remonte, atteignant -15 m à la fin du Tchadien. Cette période humide est marquée par la formation de lacs interdunaires et de bassins endoreïques, et par le développement de terrasses alluviales (Servant, 1983). Les édifices dunaires vont être partiellement décapés et découpés par la mise en place d'un réseau hydrographique. Ces conditions climatiques permettent le développement d'un couvert végétal contribuant ainsi à la stabilisation des dunes. Elles provoquent également la formation d'un sol rouge-brun correspondant à une pédogenèse plus humide (Hebrard, 1973; Michel, 1980). À la fin du Tchadien, à un court épisode régressif, correspond une réactivation du système dunaire et un changement de sédimentation dans les lacs.

Pendant le Nouakchottien, 6 000 à 4 000 ans AA, la mer envahit localement les zones basses interdunaires. Sous ces conditions humides, la végétation est fortement développée sur les dunes, et la pédogenèse commencée au Tchadien se poursuit (Faure et Hebrard, 1977; Elouard, 1968).

Le Tafolien, 4000 à 2000 ans AA, est marqué par le retour à un climat aride, provoquant l'isolement en lagunes des baies ennoyées. Les sebkhas se forment alors par assèchement des zones humides. Les derniers dépôts lacustres nord-mauritaniens sont datés de 3 000 ans AA (Delibrias *et al.*, 1976). Depuis cette époque, les conditions climatiques sont hyper-arides. La réactivation des dunes est alors liée à des conditions de sécheresse amplifiées localement par l'action anthropogénique.

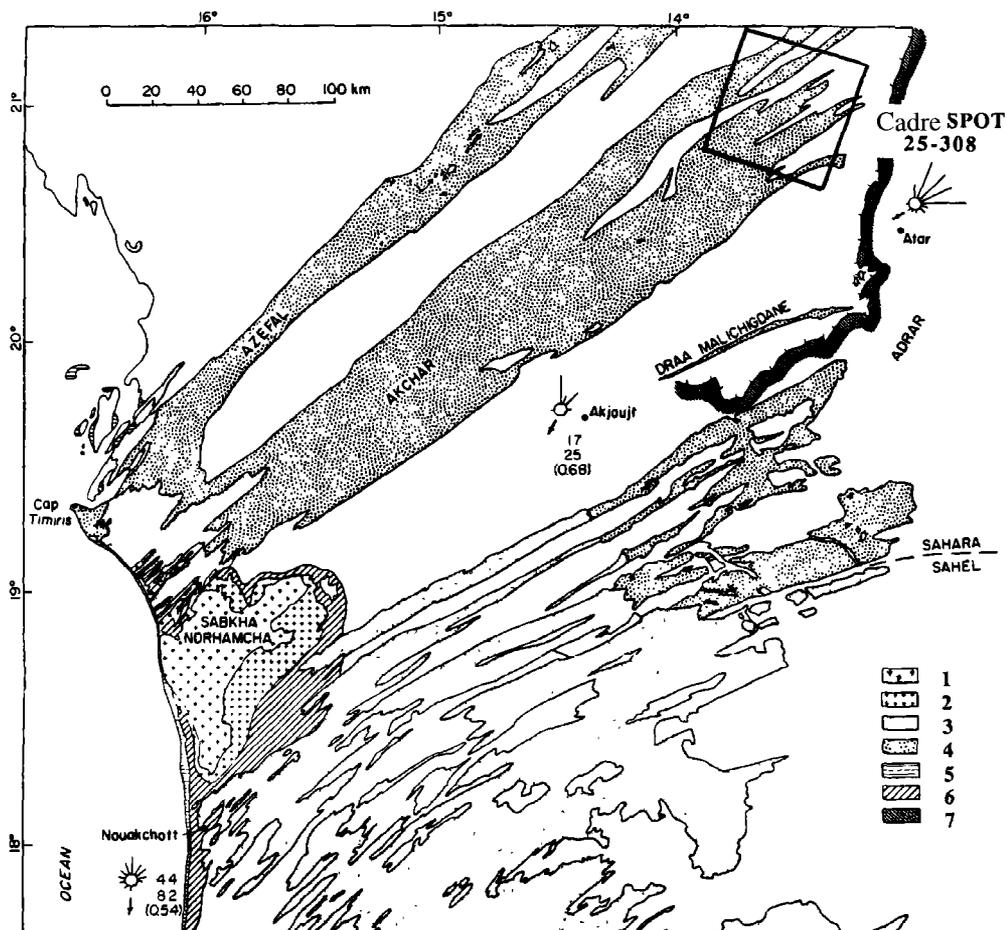


Figure 1. Carte de situation de l'erg Akchar (d'après Breed *et al.*, 1979); (1) sebkha active, (2) sebkha relictuelle, (3) dunes ogoliennes stabilisées, (4) dunes ogoliennes réactivées, (5) dunes côtières et littorales actives, (6) sédiments littoraux nouakchottiens, (7) escarpement

2 Analyse des images

2.1 Image du cadre SPOT 25-308

Pour réaliser cette étude, nous disposons d'une bande magnétique de l'image SPOT 25-308. Il s'agit d'une image de niveau 1B en mode panchromatique, ayant donc une résolution spatiale de 10 m par 10 m. L'acquisition a été réalisée à l'aide du capteur HRV1, le 11 janvier 1988 à 11h35, avec un angle d'incidence R de $2^\circ 3'$. Cette image couvre une zone de 60 km par 60 km au nord-ouest d'Atar correspondant à la terminaison de l'erg Akchar. Plus précisément, le centre de l'image se situe à $21^\circ 00' 47''$ de latitude nord et $13^\circ 31' 08''$ de longitude ouest (fig. 1).

Les luminances apparentes ont des valeurs comprises entre les niveaux de quantification 29 et 200. L'histogramme des fréquences (fig. 2) montre une répartition quadrimodale des pixels avec trois modes principaux. Les luminances apparentes les plus élevées correspondent aux cordons dunaires, les plus faibles aux interdunaires et aux affleurements isolés ou guelbs. Les modes sont centrés sur les niveaux de quantification 101, 107, 124 et 135. L'écart type est de 17,49.

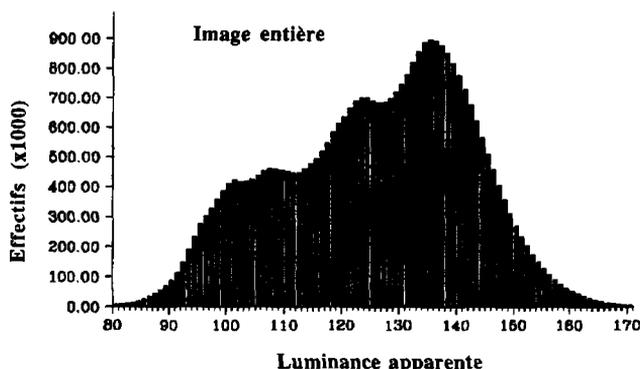


Figure 2. Histogramme des fréquences de l'image 25-308 du 11/01/88

Sur l'image totale (fig. 3), le contraste est bien marqué entre les formations dunaires et les dépressions interdunaires. Les affleurements de socle apparaissent également, soulignés par une jupe sableuse située sous leurs vents. L'orientation NE-SO des cordons dunaires est générale avec parfois des directions flexueuses et obliques des alignements, signalant ainsi les reprises et remises en mouvement de l'erg Akchar. Les zones interdunaires sombres apparaissent en gris. Très souvent, des structures linéaires correspondant au socle sont visibles à travers un mince recouvrement sableux ou à travers les regs, surface plus ou moins plane recouverte de cailloutis. Les guelbs, marqués par la patine désertique très sombre, apparaissent en noir. On distingue nettement, dans le coin nord-ouest de l'image, la trace de la voie ferrée servant à l'évacuation du minerai de fer de Zouérate.

2.2 Analyse de la zone 1

La zone 1, d'une superficie de 4,8 km par 4 km, se situe au nord du cordon central de l'erg Akchar, derrière un guelb en fer à cheval nommé «Touama ez Zeghlane». Il s'agit d'une cuvette interdunaire ayant contenu un petit lac quaternaire. Une formation calcaire croûteuse apparaît de façon discontinue au centre de la dépression.

Les luminances apparentes (fig. 4) ont des valeurs comprises entre les niveaux de quantification 42 et 175. L'histogramme des fréquences est bimodal avec des modes centrés respectivement sur 113 et 131 correspondant aux zones sombres et aux cordons dunaires environnants.

L'image réalisée à partir du seuillage des luminances basses permet de mettre en évidence les différents thèmes de la cuvette interdunaire (fig. 4). On distingue au NE le guelb en fer à cheval (1) et sa jupe de sable vif très allongée (2) avec une crête acérée et une zone d'ombre. La partie alluviale, sous le vent, est très peu marquée (3) et l'on passe rapidement au socle cristallin dans lequel des directions structurales sont visibles (4). Au centre de la cuvette, on

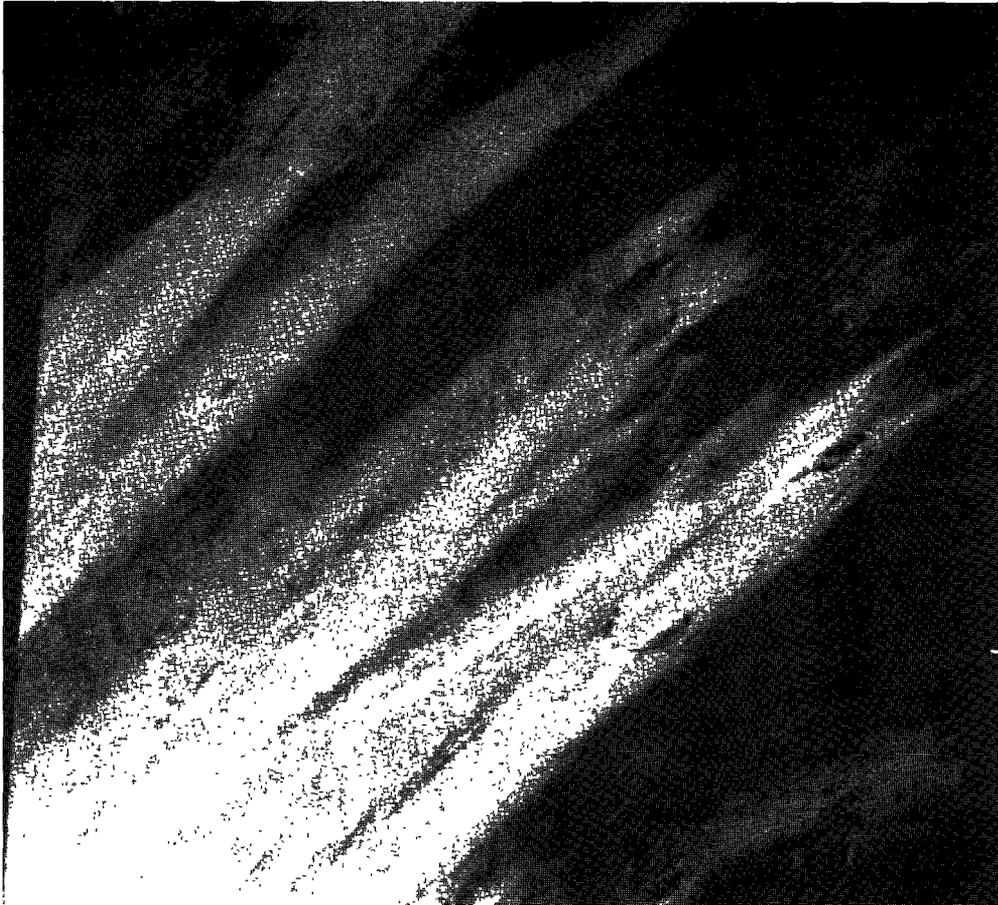


Figure 3. Terminaison nord-est de l'erg Akchar sur l'image 25-308 du 11/01/88

distingue une dalle calcaire lacustre discontinue qui marque une bordure parallèle au paléorivage d'un lac nouakchottien (5). Le flanc sud de la cuvette, plus sombre, est formé de regs noirs et d'affleurements du socle non séparables par seuillage (6). Des sols gris argileux marquent la terminaison sud de la cuvette (7). On remarque très bien une barkhane isolée sur le versant nord de la cuvette (8).

2.3 Analyse de la zone 2

La zone 2, d'une superficie de 4,8 par 4 km, se situe dans l'axe du cordon central de l'erg Akchar, dans une région à gros guelbs nommée «Ez Zeghalâne el Akhdar». La proportion de cuvettes interdunaires est grande et les cordons dunaires actifs sont peu nombreux, avec quelques alignements de barkhanes isolées et quelques traînées sableuses sous le vent des affleurements.

Les luminances apparentes sont comprises entre les niveaux de quantification 38 et 170. L'histogramme des fréquences montre une répartition à tendance bimodale dissymétrique,

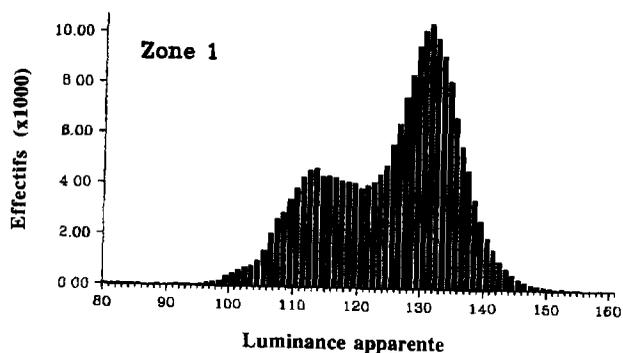


Figure 4. Histogramme des fréquences et image de la zone 1; (1) guelb en fer à cheval, (2) jupe de sable vif très allongée et zone d'ombre, (3) auréole alluviale peu marquée, (4) socle cristallin dans lequel des directions structurales sont visibles, (5) dalle calcaire lacustre discontinue, (6) regs noirs, (7) sols gris argileux, (8) barkhane isolée

les faibles valeurs étant les plus nombreuses, avec un mode principal à 107 et un épaulement faiblement marqué à 121 (fig. 5). Les luminances les plus basses correspondent aux zones sombres des guelbs et des regs noirs.

L'image réalisée à partir du seuillage des luminances basses (fig. 5) permet de mettre en évidence une organisation circulaire autour du pied du guelb principal (1) et une organisation auréolaire centrée sur un reg principal noir (2). Une coupe réalisée sur le terrain entre les deux zones (ABC) a permis de différencier deux séquences (fig. 5). Une séquence ébouliteuse et

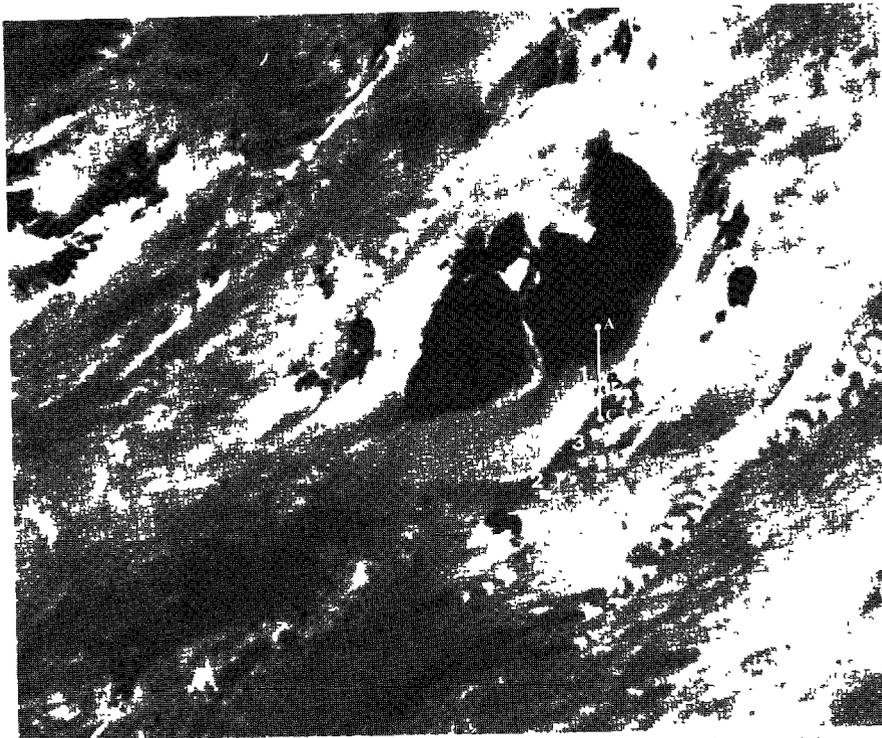
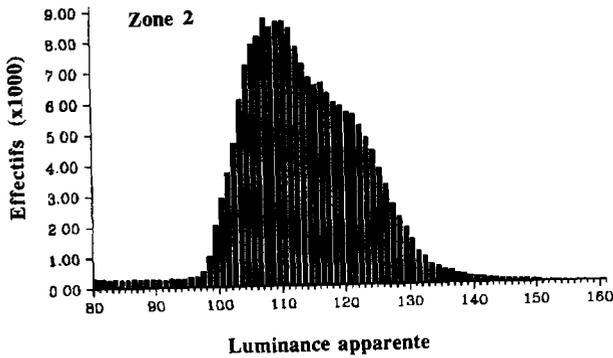


Figure 5. Histogramme des fréquences et image de la zone 2; (1) organisation circulaire autour du pied du guelb principal, (2) organisation auréolaire centrée sur un reg noir. (3) zone axiale sombre correspondant à une forte densité des grains à patine désertique, (4) éparpillement des grains et ensablement du reg, (ABC) coupe réalisée sur le terrain

alluviale depuis le flanc du guelb jusqu'au sable vif (AB). Les tons gris de plus en plus clairs indiquent un épandage de blocs et de débris de plus en plus fins lorsqu'on s'éloigne du guelb. Une seconde séquence (BC) montre que le reg noir allongé correspond en fait à un ancien cordon dunaire ogolien fortement aplani, légèrement bombé, recouvert d'une pellicule de grains millimétriques jointifs sombres. Cette pellicule donne à l'ensemble une luminance faible. Ce reg est formé sur le versant nord de l'ancien cordon ogolien. Une zone axiale sombre (3) correspond à la plus grande densité des grains à patine désertique, les bordures

plus claires, à un éparpillement des grains et à un ensablement du reg (4). On distingue, sur ce cordon aplani, quelques barkhanes isolées de sables vifs.

Il est difficile de séparer, uniquement par télédétection, les séquences ébouliteuses et alluviales les plus grossières et la séquence de recouvrement granuleuse du reg noir. La position morphologique, qui correspond à une topographie très caractéristique, permet de différencier ces deux thèmes. Les alluvions et colluvions auréolent les guelbs. Les regs noirs suivent la direction des cordons dunaires ogoliens orientés N 55 E.

2.4 Analyse de la zone 3

La zone 3, d'une superficie de 5 km par 4 km, se situe dans la partie sud du cordon principal de l'erg Akchar, au nord-est d'une zone de guelbs, nommée «Bou Aleika». Elle représente le démarrage du cordon dunaire avec des voiles sableux peu épais et des dépressions interdunaires légèrement ensablées.

Les luminances apparentes sont comprises entre les niveaux de quantification 45 et 179. L'histogramme des fréquences montre également une répartition bimodale, avec une dissymétrie inverse de celle de la zone 2, un épaulement faiblement marqué à 110 et un mode principal à 124 (fig. 6).

L'image de la figure 6 permet de mettre en évidence les thèmes principaux de la zone en déflation à l'amont du cordon dunaire. On distingue, au nord-est de l'image, les deux bordures calcaires (1 et 2) d'une formation lacustre interdunaire. Ces croûtes calcaires sont mieux individualisées que dans la zone 1. Elles marquent probablement des lignes parallèles aux paléo-rivages de l'ancien lac. Les sols argilo-sableux apparaissent en gris noir au centre de la dépression (3). Les voiles sableux représentent une mince pellicule et s'organisent en panaches suivant une direction proche d'est-ouest (4). Un début d'organisation en dunes transverses barkhanoïdes est visible sur le rebord nord de l'interdunaire (5). Ces reprises actives des cordons s'organisent en réticules complexes de faible épaisseur sous lesquels on peut distinguer des directions structurales du socle cristallin (6).

3 Discussion des résultats

Nous avons réalisé lors de cette étude des images fausses couleurs et noir et blanc à partir d'un simple seuillage des différents modes de l'histogramme des fréquences. Les résultats obtenus sont intéressants non seulement sur le plan géométrique, mais également sur le plan spectral.

3.1 Caractérisation géométrique des unités thématiques

La précision des données panchromatiques SPOT permet très facilement de dresser une esquisse cartographique au 1:10 000. Le pixel de 10 m par 10 m est alors visible, taille de 1 mm par 1mm, mais ne gêne absolument pas le repérage d'amers, ni la délimitation des principaux thèmes.

L'organisation spatiale des ergs et des interdunaires est très régulière. Les grands cordons ogoliens montrent une direction N 55 E. Ils sont recouverts par des faisceaux de dunes barkhanoïdes, orientés N 40 E. Cette direction, oblique sur l'Ogolien, se marque en début de cordons ou sur le flanc SE des formations dunaires. Les jupes de sables vifs, localisées en queue de guelbs, ont des directions variables comprises entre N 40 E et N 55 E. Ces

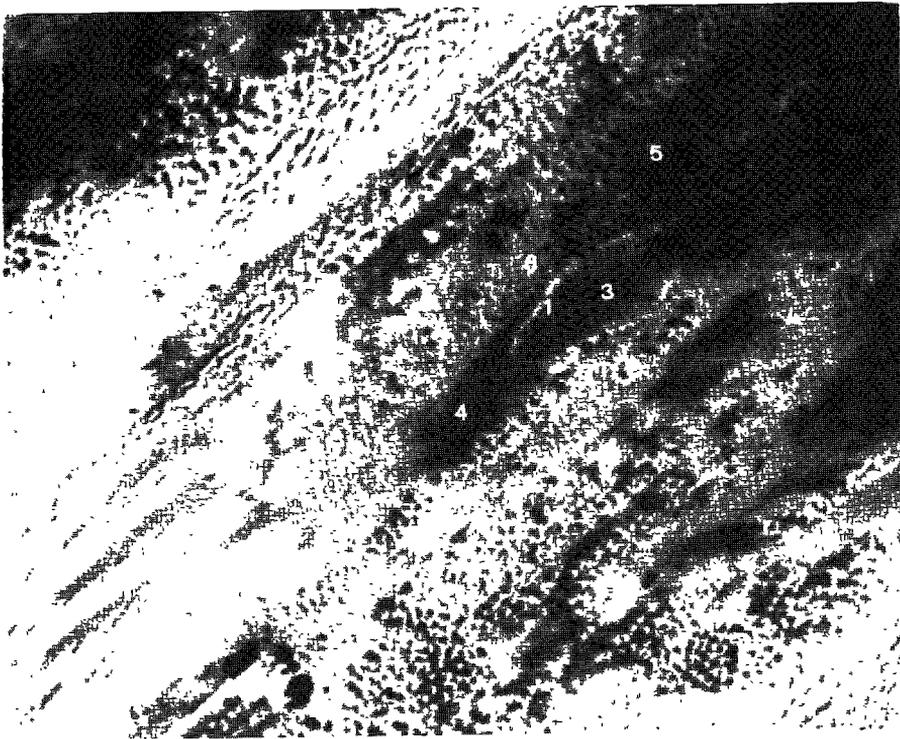
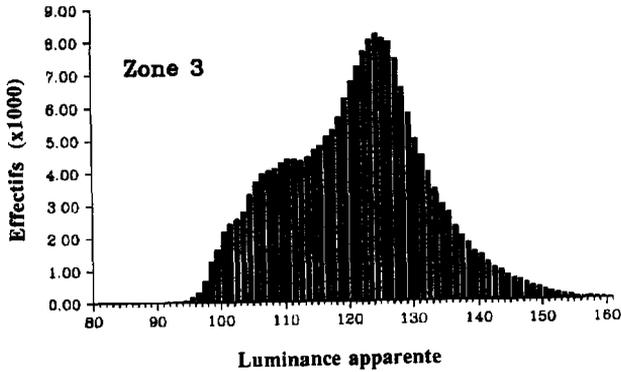


Figure 6. Histogramme des fréquences et image de la zone 3; (1) et (2) bordures calcaires, (3) sols argilo-sableux, (4) voiles sableux organisés en panaches, (5) début d'organisation en dunes transverses barkhanoides, (6) réticule complexe de barkhanes

orientations semblent fonction de la taille et de la forme du guelb. Pour les petits guelbs, la direction moyenne s'établit à N 45 E.

La limite des unités thématiques, définie à partir de l'imagerie SPOT, correspond sur le terrain à des variations topographiques. Les unités interdunaires sont en creux et les cordons dunaires en relief. Les guelbs forment des chicots, aussi bien dans les creux que sur les dunes. Pour les guelbs et les barkhanes à fort relief, des zones d'ombre sont mises en évidence.

Une comparaison des photographies aériennes au 1:50 000 (Mission IGN, AO-NF-28-XI, 1955) et de l'image SPOT de 1988 permet d'évaluer la dynamique actuelle des formations dunaires. Les positions des limites entre les principales unités, guelbs, dunes et interdunes, sont peu ou très peu déplacées à l'échelle d'observation du panchromatique. Sur l'image SPOT, en particulier, les creux interdunaires, les anciennes zones lacustres et les flancs NO des cordons ogoliens ne présentent pas d'ensablement actuel notable. Le sable remobilisé à forte luminance est surtout visible sur les sommets des cordons dunaires ogoliens et sur leurs flancs SE.

3.2 Caractérisation spectrale des unités thématiques

La définition spectrale des thèmes a été rendue possible grâce à la dynamique importante des luminances apparentes. L'histogramme des fréquences est bimodal ou quadrimodal ce qui permet de traiter l'image en groupes séparant les thèmes de faible et de forte luminance.

Le premier groupe comprend les thèmes dunaires très réfléchissants : barkhanes, dunes linéaires, jupes sableuses en queue de guelb et croûtes calcaires. Le second ensemble concerne les thèmes sombres. Il comprend : les sols argilo-sableux des zones interdunaires, les regs plus ou moins noirs, le substratum cristallin et les massifs rocheux des guelbs.

Certaines unités sont faciles à définir. Pour d'autres, en raison de l'utilisation d'une seule et large bande spectrale, 0,48 à 0,76 μm , l'identification s'avère difficile et même impossible. Il est nécessaire dans ce dernier cas d'utiliser des données multispectrales. Une image Landsat TM est actuellement en cours de traitement.

3.2.1 Thèmes d'identification aisée

On reconnaît facilement, pour le groupe à luminance élevée, les unités de dunes vives, les barkhanes et les jupes sableuses. Dans le groupe de basse luminance, les guelbs, le substratum et les zones interdunaires ne présentent pas de problème d'identification.

3.2.2 Thèmes d'identification délicate

Parmi les thèmes difficiles à cartographier, deux présentent une répartition spatiale qui facilite leur différenciation. Il s'agit des croûtes calcaires et des regs noirs.

Les regs noirs sont constitués d'une pellicule de grains millimétriques jointifs à patine noire. Ils correspondent à un résidu de déflation et marquent la position des dunes ogoliennes, 18 000 ans AA. Ils sont répartis sur les versants NO des cordons dunaires ogoliens. Les regs noirs se distinguent des zones alluviales et colluviales par leur orientation N 55 E.

Les croûtes calcaires correspondent à des dépôts lacustres dans certaines dépressions interdunaires. Leur luminance élevée est très voisine de celle des voiles sableux. Elles se distinguent de ces derniers par leur localisation interdunaire, ressortant en clair dans un environnement assez sombre.

3.2.3 Thèmes d'identification impossible

Plusieurs thèmes, identifiés sur le terrain, n'ont pas été reconnus sur l'image panchromatique SPOT. Il s'agit en particulier des différents sols gypseux et argilo-sableux clairs cartographiés dans les zones interdunaires. Une classification des sols effectuée à partir de données multispectrales devrait permettre leur mise en évidence.

De même, l'identification des différents regs de la région étudiée n'est possible que si la mince pellicule gravillonnaire qui les constitue est assez dense pour donner une luminance faible. Dans le cas de regs légèrement ensablés, il y a une indétermination totale sur la nature de l'unité. Il peut alors s'agir de regs ou de sols. Des données sur la granulométrie serait alors nécessaire pour permettre une identification fiable du thème.

4 Conclusion

L'utilisation des données SPOT panchromatiques est un excellent moyen de réaliser une étude préliminaire d'un erg actif, tel l'erg Akchar. Cette étude doit être poursuivie à l'aide de données multispectrales afin de définir et de cartographier l'ensemble des unités thématiques existantes.

Les enseignements principaux sont les suivants.

- Les interdunaires ogoliens et les dépôts lacustres nouakchottiens qui en occupent les zones médianes ne sont pas recouverts par des formations sableuses actuelles.

- Les regs noirs, marquant la surface de déflation d'une partie des anciens cordons ogoliens, ne sont pas recouverts sur les flancs NO au vent des formations dunaires.

- Les dépôts alluviaux-colluviaux sont très limités. Ils se localisent sous forme d'étroite auréole autour des grands guebels. Il n'y a pas de recouvrement sableux visible à l'amont NE de l'erg Akchar.

- Il existe une réactivation des édifices dunaires. Elle est marquée par le développement de barkhanes et de jupes sableuses au sommet des cordons ainsi que sur les flancs SE, correspondant au versant sous le vent.

On peut conclure qu'il existe bien une réactivation post-ogolienne de l'erg Akchar, à partir de la détérioration climatique vers 2000 à 3000 ans AA. Cette réactivation s'est accélérée depuis une quarantaine d'années comme le montre la comparaison avec les photographies aériennes. Cependant, elle est limitée et correspond à une remobilisation sur place des sables ogoliens. L'extension actuelle des sables vifs n'a ni remobilisé, ni réactivé l'ensemble des formations anciennes ogoliennes.

5 Références

- BREED, C. S., S. G. FRYBERGER, S. ANDREWS, C. MC CAULEY, F. LENNARTZ, D. GEBEL et K. HORSTMAN, 1979. Regional studies of sand seas using Landsat (ERTS) imagery. — *in* E.D. Mc Kee (éd.), *Global Sand Sea*. U. S. Geological Survey Prof. Pap. 1052, p. 305-397.
- DELIBRIAS, G., L. ORTLIEB et N. PETIT-MAIRE, 1976. New C14 dates for the Atlantic Sahara. Tentative interpretations. — *J. Human Evol.*, vol. 5, p. 535-546.
- ELOUARD, P., 1968. Le Nouakchottien, étage quaternaire de Mauritanie. — *Ann. Fac. Sci., Dakar*, vol. 22, p. 121-137.
- FAURE, H. et L. HEBRARD, 1977. Variations des lignes de rivage au Sénégal et en Mauritanie au cours de l'Holocène. — *Studia Geologica Polonica*, 52, p. 143-157.
- FRYBERGER, S. G., 1980. Dune forms and wind regime, Mauritania, West Africa : implications for past climate. — *in* M. Sarthein, E. Seibold et P. Rognon (éd.), *Palaeoecology of Africa*. Balkema, Rotterdam, p. 79-96.

- HEBRARD, L., 1973. Contribution à l'étude géologique du Quaternaire du littoral mauritanien entre Nouakchott et Nouadhibou, 18°-21° latitude nord. —Laboratoire de géologie, Université de Dakar, 483 p.
- HEBRARD, L., 1983. La synthèse stratigraphique du Quaternaire du littoral mauritanien entre Nouakchott et Nouadhibou. —*in* J. Fabre (éd.). Lexique stratigraphique international, Afrique de l'Ouest. Pergamon Press, 1, p. 158-170.
- MICHEL, P., 1980. The Southwestern Sahara margin : sediments and climatic changes during the recent Quaternary. —*in* M. Sarthein, E. Seibold et P. Rognon (éd.). Palaeoecology of Africa. Balkema, Rotterdam, vol. 12, p. 293-253.
- SARTHEIN, M., G. TETZLAFF, B. KOOPMANN, K. WOLTER et U. PFLAUMANN, 1981. Glacial and interglacial wind regimes over the eastern subtropical Atlantic and north-west Africa. — Nature, 293, p. 193-196.
- SERVANT, M., 1983. Séquences continentales et variations climatiques; évolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. —Travaux et documents, ORSTOM, Paris, vol. 159, 573 p.
- TALBOT, M. R., 1980. Environmental responses to climatic change in the West African Sahel over the past 20 000 years. —*in* M. A. J. Williams et H. Faure (éd.). The Sahara and the Nile. Balkema, Rotterdam, p. 37-62.

22

Analyse spatiale de la pression animale comme facteur de désertification dans le nord du Sénégal

YVES PRÉVOST

*Projet SEN/84/X09, Création d'un Centre de suivi écologique (CSE), B. P. 154, PNUD,
Dakar, Sénégal, téléphone : 221-32-54-94, télécopieur : 221-32-05-33*

Résumé

Le CSE a utilisé à la fois des données satellitaires et des décomptes de bétail effectués au moyen d'un avion léger pour évaluer la pression de pâture exercée sur le fourrage disponible.

Un indice de végétation pour les saisons de croissance 1987, 1988 et 1989 a été calculé en cumulant les images composées décennales NDVI NOAA/AVHRR. Une carte numérique de la production végétale sur l'ensemble du Sénégal a été produite à partir de la droite de régression entre l'indice de végétation cumulé et les biomasses herbacées et foliaires prélevées au niveau des sites de contrôle au sol implantés en zone pastorale.

Des décomptes du bétail ont été effectués au moyen de vols systématiques de reconnaissance (VSR) pendant les saisons sèches 1988 et 1989. Compte tenu de la grande variabilité des valeurs, il s'est avéré nécessaire de regrouper les observations à l'échelle des départements pour obtenir des résultats fiables.

La production végétale moyenne a été calculée pour chaque département et transformée en une capacité de charge potentielle à l'aide des paramètres zootechniques classiques. Un indice de la pression animale a été établi par le ratio entre la charge estimée par les enquêtes aériennes et la charge potentielle théorique pour chaque département. Cette démarche suppose une faible mobilité du bétail pendant la saison sèche.

Les résultats montrent qu'en année de pluviométrie moyenne, la zone pastorale serait généralement sous-pâturée, alors que la pression animale serait beaucoup plus élevée en zone agricole.

Ces résultats ne remettent pas en question les constats de modifications profondes dans la composition du couvert herbacé et de régression de la strate ligneuse aux abords immédiats des forages. Cependant, ils conduisent à nuancer certaines déclarations alarmistes concernant l'état de dégradation des écosystèmes pastoraux de la zone sahélienne sénégalaise.

1 Introduction

Cette présentation est un commentaire sur le rôle de l'élevage dans la dynamique des zones sahéliennes, à la lumière d'informations recueillies au Sénégal depuis 1980.

Les discussions concernant l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens sont centrées autour de l'idée d'une désertification progressive provoquée par l'action de l'homme, en particulier au travers de l'élevage extensif. Cette conception a été en premier avancée par Aubreville (1949); certains auteurs sont allés jusqu'à attribuer l'extension historique du Sahara, au cours des derniers millénaires, à son exploitation pastorale. Les travaux de Lamprey (1975) au Soudan ont établi l'existence d'un processus de désertification qui se traduirait par une avancée du désert de 5-6 km par an. Les recherches entreprises par Ibrahim (1984) ont explicitement lié la désertification dans le nord du Soudan à un surpâturage généralisé.

Le concept de désertification a été formalisé lors de la conférence de Nairobi en 1977. Depuis ce moment, la désertification du Sahel a été élevée au niveau d'un quasi-dogme qui a servi à justifier une part importante de l'industrie de l'aide internationale dans cette région où la lutte contre la désertification est désormais présentée comme un cadre de développement.

Sans nier son utilité, des travaux récents remettent en question l'étendue de son applicabilité au Sahel, compte tenu de l'insuffisance de données fiables (Warren et Agnew, 1988; Nelson, 1988). Les travaux effectués au Soudan par Hellden (1984) et Olsson (1984) avaient déjà sérieusement remis en question les conclusions de Lamprey mentionnées ci-dessus.

Les résultats présentés dans cette communication sont le fruit de travaux effectués par le projet de Création d'un Centre de suivi écologique (OPS/UNSO) et font suite à ceux du Projet pilote d'inventaire et de surveillance continue des écosystèmes pastoraux sahéliens (FAO [Food and Agriculture Organisation] : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture; PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement). Ils permettent d'apprécier, sur la base d'une évaluation de la production végétale et de la charge animale, l'importance de la pression animale et son impact sur l'évolution des écosystèmes pastoraux.

2 L'estimation de la production végétale

2.1 Que peut-on mesurer?

Avant d'aller plus loin, il convient de définir certains concepts pour éviter tout malentendu. Tout d'abord, il faut distinguer la production de végétation (en kg de matière sèche par hectare), expression conjoncturelle des potentialités d'un écosystème, du potentiel de production. Ainsi, l'augmentation de la production végétale dans le Sahel, paramètre hautement variable, ne signifie pas nécessairement l'augmentation des potentialités de la

terre : une forte production induite par une augmentation de la pluviométrie peut temporairement masquer un appauvrissement progressif des sols. L'étude de la dégradation des écosystèmes sahéliens exige que l'on détermine leur productivité en prenant en compte les principaux facteurs qui la déterminent, notamment la pluviométrie et le bilan hydrique effectif, le type et l'état des sols. Il importe également de considérer la qualité de la végétation produite, ce qui équivaut en grande partie à la composition floristique. On peut éventuellement imaginer un modèle de production primaire qui permette, à partir d'une connaissance d'un nombre limité de paramètres, de prévoir la production de la végétation en quantité et en qualité. Mais, à l'état actuel des connaissances, un tel objectif est utopique. Ceci dit, la mesure de la production des écosystèmes sahéliens constitue un indicateur utile de leur état.

2.2 L'indice de végétation par la différence normalisée (NDVI)

Le Centre évalue la production végétale en fin d'hivernage au Sénégal depuis 1987, selon la méthode élaborée par le groupe GIMMS du Goddard Space Flight Center de la NASA au début des années 1980. Les principes sont connus :

- images composées décennales d'indice de végétation par la différence normalisée (NDVI);
- calcul d'un indice de la production totale de matière verte par le cumul des indices décennales pendant la période de croissance (dans notre cas 11 décades de fin juin à début octobre);
- calibrage en fin de saison des pluies de l'indice cumulé par la biomasse sur pied, y compris la biomasse foliaire des arbres (Diarra et Hiernaux, 1987; Hiernaux et Justice, 1986), collectée de manière représentative au niveau d'un nombre limité de sites de contrôle au sol en zone pastorale (fig. 1).

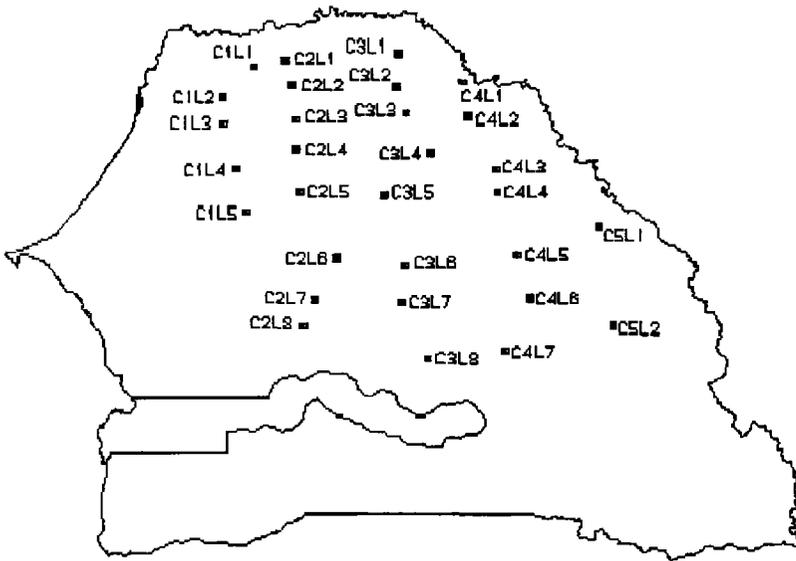


Figure 1. Carte du Sénégal avec l'emplacement des sites de contrôle au sol

Il faut noter que l'approximation de la production végétale totale par la mesure plus facile de la biomasse sur pied introduit une erreur due au dépérissement de la végétation ou à son utilisation. Il faut aussi signaler que l'extrapolation sur les zones agricoles (ouest du Sénégal) et forestières (sud du Sénégal) n'est pas rigoureusement correcte et que ces zones devraient faire l'objet de calibrage propre.

Les coefficients de corrélation obtenus pour 1987, 1988 et 1989 sont globalement satisfaisants, en particulier si la biomasse foliaire est prise en compte (tableau I). Cependant, les coefficients de régression sont significativement différents d'une année à l'autre. La relation biomasse au sol — indice de végétation est moins bonne pour les sites du nord du Ferlo où la production estimée est inférieure à 2 tonnes de matière sèche par hectare (fig. 2a, b et c). D'autres facteurs non encore maîtrisés influent donc sur la production végétale.

Tableau I. Coefficients de corrélation r^2 entre l'indice de végétation cumulé et la biomasse sur pied aux sites de contrôle au sol

Année	Zone	Degrés de liberté	Biomasse herbacée		Biomasse totale	
			r^2	P	r^2	P
1987	nord du Ferlo	15	0,65	<0,001	0,82	<0,001
1988	nord du Ferlo	15	0,03	ns	0,13	ns
1988	tous les sites	25	0,59	<0,001	0,66	<0,001
1989	nord du Ferlo	15	0,46	<0,01	0,40	<0,01
1989	tous les sites	27	0,75	<0,001	0,76	<0,001

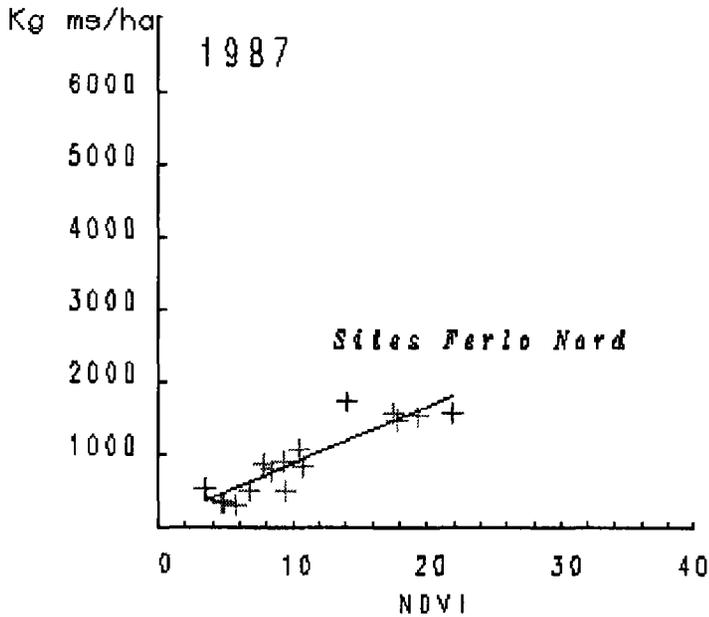


Figure 2a. Droites de régression entre l'indice de végétation cumulé sur 11 décades et la biomasse sur pied aux sites de contrôle au sol en 1987

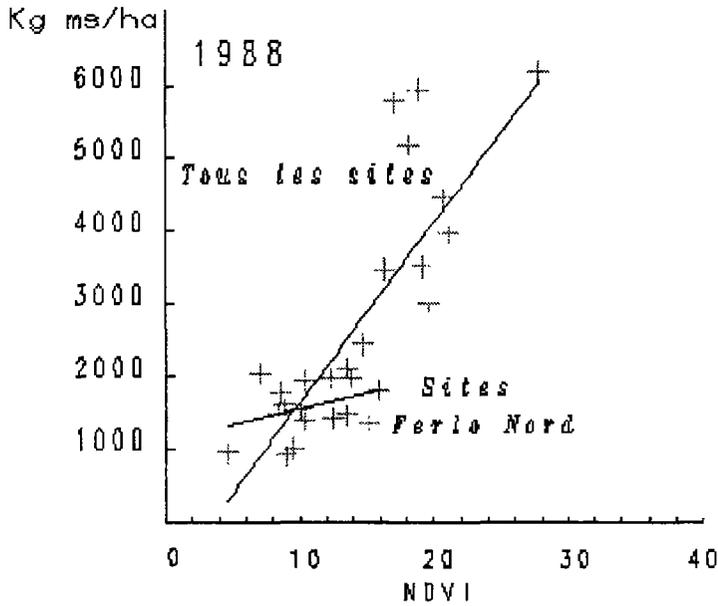


Figure 2b. Droites de régression entre l'indice de végétation cumulé sur 11 décades et la biomasse sur pied aux sites de contrôle au sol en 1988

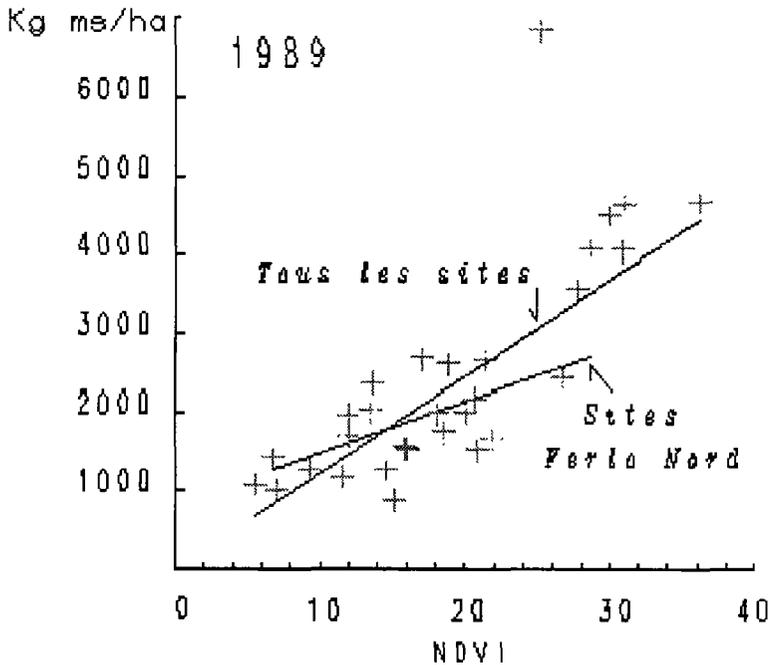


Figure 2c. Droites de régression entre l'indice de végétation cumulé sur 11 décades et la biomasse sur pied aux sites de contrôle au sol en 1989

La figure couleur 22-3 montre l'évolution de la production estimée depuis 1981. On constate une baisse marquée de 1981 à 1984 qui aboutit en 1984 à une production inférieure à 500 kg de matière sèche par hectare sur tout le nord du Ferlo. Le Centre ne dispose pas de données calibrées pour 1985 et 1986. Depuis 1987, on note une nette reprise de la production végétale, particulièrement en 1988 et 1989, mais la localisation des maxima de production ne coïncide pas pour ces deux dernières années.

Cette reprise de la production est rassurante parce qu'elle suppose une résilience de la brousse plus élevée que ce que l'on avait pensé en 1984. Ceci signifie que soit le stock semencier n'a pas été épuisé au cours des années de sécheresse, soit il s'est reconstitué rapidement à partir de 1985. Mais cette augmentation de la production végétale n'indique pas nécessairement une augmentation du potentiel, tout comme l'absence de production en 1984 ne traduisait pas nécessairement sa diminution de 1981 à 1984. Il faudra pour se prononcer que les chercheurs étudient plus en profondeur et en station les relations empiriques qui déterminent la production.

3 L'estimation des effectifs du bétail

L'estimation des effectifs du bétail est souvent difficile, compte tenu de la réticence des éleveurs à révéler leurs richesses et des moyens limités des services d'encadrement. Les chiffres officiels sont fréquemment douteux ou même erronés. Par ailleurs, les déplacements saisonniers ou exceptionnels du bétail rendent complexes sa localisation et son estimation.

Le Centre a estimé les effectifs du bétail au moyen d'enquêtes aériennes selon la méthode des vols systématiques de reconnaissance (VSR). Le principe de cette méthode est un échantillonnage systématique d'une proportion connue de la zone d'étude, dont les résultats sont ensuite extrapolés à l'ensemble de la zone. La figure 4 montre le principe des fenêtres d'observation au sol, dont la largeur est fonction de l'altitude de l'avion. L'échantillonnage est effectué selon des lignes de vol équidistantes (5 ou 10 km). Les données sont collectées selon des unités d'observation de 30 ou 60 secondes et ramenées pour chaque unité d'observation à une densité par km² qui est ensuite attribuée à un carré UTM de 1 km de côté (fig. 5).

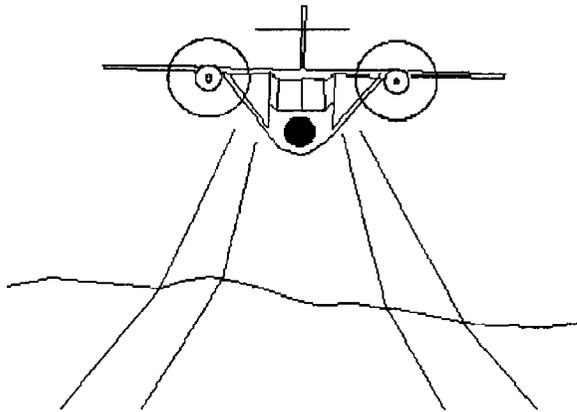


Figure 4. Principe des fenêtres d'observation de chaque côté de l'avion

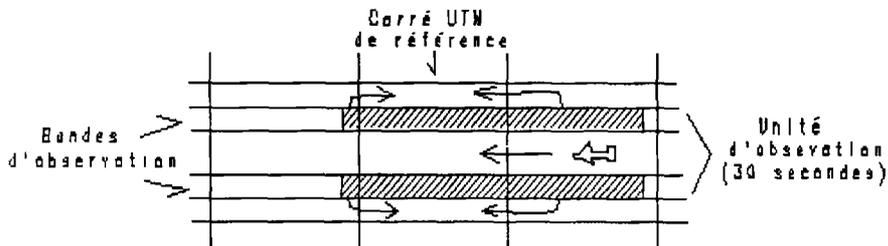


Figure 5. Principe des lignes de vol, des unités d'observation et de la localisation des unités d'observation par rapport à des carrés UTM de 1 km²

Nous avons utilisé comme indice de fiabilité des estimations le rapport entre l'intervalle de confiance à $P = 0,05$ et la moyenne estimée de la densité. Cet indice dépend de trois facteurs essentiels : le nombre d'unités d'observations (fonction du temps de vol et de la durée des unités), le nombre d'observations non nulles et la distribution des valeurs observées. La corrélation entre le nombre d'observations non nulles et l'indice est particulièrement élevée (fig. 6) et semblable pour les différentes espèces.

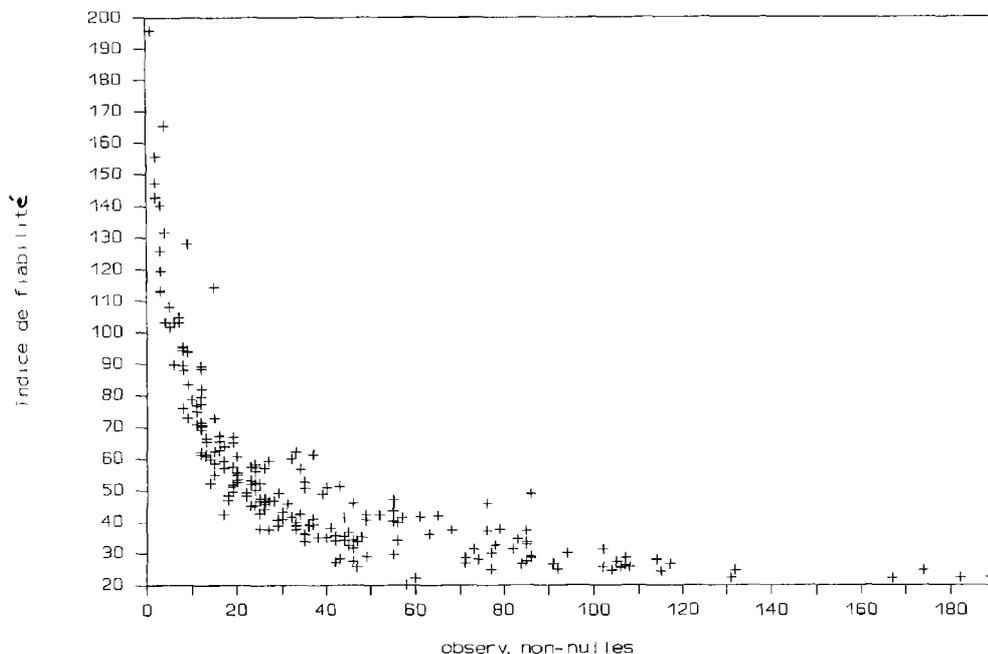


Figure 6. Indice de fiabilité (intervalle de confiance/valeur moyenne) en fonction du nombre d'observations non nulles pour le cheptel toutes espèces confondues (bovins, petits ruminants, chevaux et ânes)

La figure 7 montre comment l'indice de fiabilité varie pour les différentes espèces (bovins, petits ruminants et chevaux) en fonction de la superficie couverte (enquête aérienne de 1989). On constate que jusqu'à 5 000 km² environ, les marges d'erreur demeurent supérieures à 30%, seuil de fiabilité fixé par le Centre.

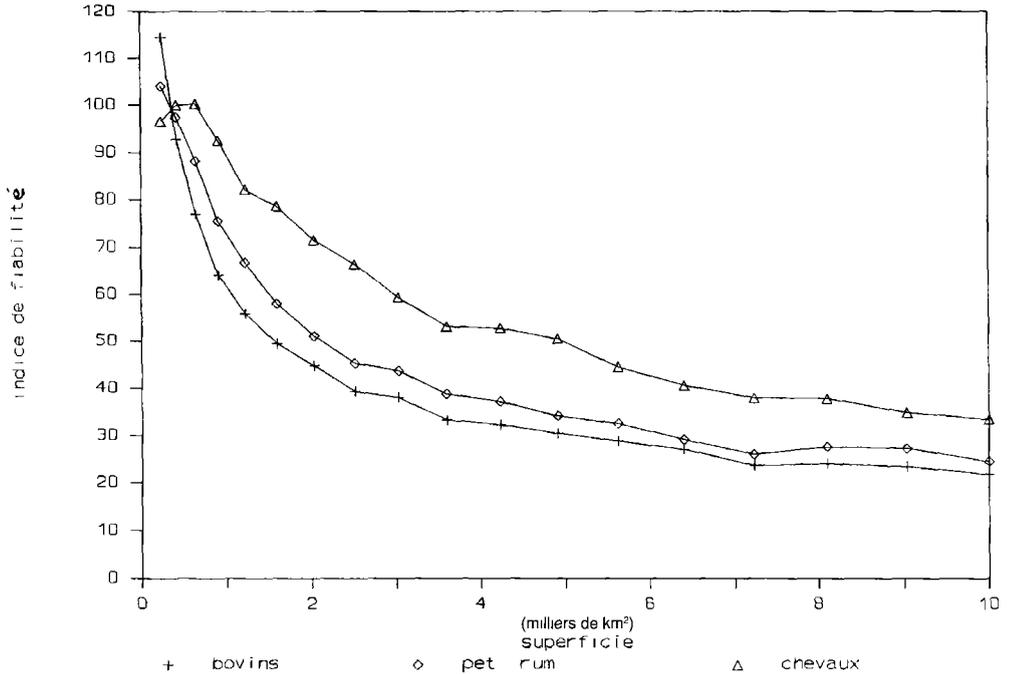


Figure 7. Relation entre l'indice de fiabilité et la superficie des unités du découpage pour les bovins, les petits ruminants et les chevaux (résultats de l'enquête aérienne de 1989)

Pour cette raison, il nous est apparu imprudent d'utiliser les données des enquêtes aériennes pour des découpages dont la superficie est inférieure à plusieurs milliers de km². Nous avons donc retenu le département comme unité de cartographie des densités du bétail. Heureuse coïncidence, la petite taille de certains départements est généralement compensée par une forte densité du bétail et par conséquent un nombre élevé d'observations non nulles, à cause précisément de leur forte densité humaine.

L'expérience du Centre montre que les enquêtes aériennes tendent à sous-estimer les effectifs des animaux dans les zones où ils s'attourent pour boire à des points d'eau comme les forages profonds. Cette sous-estimation serait de l'ordre de 15% dans le nord du Sénégal.

Le Centre a effectué quatre campagnes d'enquêtes aériennes depuis 1986. Nous n'évoquons ici que les campagnes de 1988 et 1989, les deux premières ayant eu comme objectif prioritaire la mise sur pied et la formation d'une équipe nationale d'observateurs.

L'enquête aérienne de 1989 a couvert la moitié nord du Sénégal, soit environ 109 000 km². Les résultats de cette enquête diffèrent de ceux de la Direction de l'élevage par exemple pour les bovins et pour les petits ruminants.

L'intérêt des enquêtes aériennes réside dans le fait qu'elles utilisent la même méthode pour l'ensemble des départements couverts d'une année à l'autre. Cette uniformité, plus que l'exactitude des estimations, est sans doute le principal avantage de ces enquêtes puisqu'elle permet de situer clairement les différences entre départements et d'identifier les tendances interannuelles.

L'écart constaté entre les résultats obtenus laisse supposer que des déplacements saisonniers importants du bétail ont lieu entre certains départements. Nous formulons ici l'hypothèse que des animaux originaires du bassin arachidier séjournent pendant l'hivernage

dans la région de Louga. L'importance et les circuits de ces déplacements peuvent être testés par des enquêtes aériennes plus fréquentes, mais couvrant des zones plus réduites.

4 L'estimation de la pression animale

La pression animale sur les ressources végétales a été calculée tout simplement en prenant le ratio entre la production végétale pendant l'hivernage et la charge animale, toutes espèces confondues, pendant la saison sèche suivante. Une densité pastorale par km² a été obtenue pour chaque département en additionnant la densité des différentes espèces en UBT (unité de bétail tropical) par km² sur la base des coefficients présentés au tableau II.

Tableau II. Coefficients servant à transformer la densité des différentes espèces en unité de bétail tropical

Espèce	Coefficient (UBT)
Bovin	0,7
Petit ruminant	0,12
Cheval	1,0
Âne	0,5
Dromadaire	1,0

Une carte de la production végétale en fin d'hivernage a été réalisée pour l'ensemble des départements en calculant la valeur moyenne de la production végétale pour les pixels compris dans chaque département.

La charge théorique par km², ou capacité de charge, a été calculée pour chaque département en divisant la production végétale estimée par les besoins théoriques en matière sèche de fourrage d'une UBT dans une année. L'estimation de ces besoins fait intervenir trois paramètres : la consommation quotidienne (6,25 kg MS), le nombre de jours (270 ou 365) et le pourcentage de la végétation accessible au bétail (20% ou 30%). En fonction des paramètres choisis, les résultats peuvent être très différents. Nous avons choisi une combinaison qui évite les extrêmes, 365 jours et 30% de la végétation accessible au bétail.

La pression animale a ensuite été estimée pour chaque département en divisant la charge réelle par la charge théorique. Nous avons envisagé trois cas : 270 jours et 30% de la végétation accessible; 365 jours et 30% de la végétation accessible; 365 jours et 20% de la végétation accessible.

Cette démarche est partiellement erronée pour deux raisons au moins. En premier lieu, elle suppose que le bétail ne se déplace pas entre les départements pendant la saison sèche, alors qu'il est bien connu qu'une partie du cheptel effectue d'importants mouvements saisonniers. En deuxième lieu, elle ramène tous les types de végétation à une même valeur fourragère. Or, il est établi que les pâturages du sud du Sahel sont de moins bonne qualité, bien que plus fournis, que ceux du nord du Sahel. Par ailleurs, la végétation agricole n'est pas distinguée de la végétation naturelle, alors qu'une grande partie des sous-produits ne sont pas accessibles au bétail ou sont d'une faible valeur fourragère, comme par exemple dans le cas du mil souba.

Il reste que les résultats obtenus ne confirment pas la thèse de la surcharge généralisée dans la zone sylvo-pastorale. Il est même étonnant de constater la faible utilisation de la végétation dans la partie est de cette zone (fig. coul. 22-8 : utilisation sur 365 jours, 30% de la végétation accessible). Cette sous-utilisation semble être liée à l'insuffisance des ressources en eau.

En evanche, la pression animale est beaucoup plus élevée en zone agricole, ce qui implique une pleine intégration agriculture-élevage.

Le constat de sous-charge n'est pas exceptionnel et rejoint celui observé dans de nombreuses autres régions semi-arides (par exemple Coughenour *et al.*, 1985).

5 Conclusions

On peut conclure qu'il y a un risque certain à réduire toute la problématique du pastoralisme à une politique d'adéquation, par ailleurs inapplicable, entre la charge animale et le fourrage disponible. La logique du système d'exploitation extensif ne porte pas les producteurs à attribuer une valeur à la brousse, encore moins à investir pour sa gestion. La seule chose qui intéresse les éleveurs, parce qu'elle est la seule qu'ils maîtrisent, c'est leur cheptel. Le décalage est tout à fait manifeste entre cette logique et celle des interventions extérieures centrées en priorité sur la valorisation de la brousse.

Il faut bien admettre que l'on ne saurait représenter correctement le système de production pastoral dans sa globalité et sa complexité par un modèle aussi simpliste que celui de la pression animale. En année normale, l'eau, les soins vétérinaires, le fonctionnement des forages, les structures de gestion, les questions de commercialisation et, de manière générale, les problèmes d'articulation de l'économie pastorale avec l'économie nationale sont beaucoup plus importants pour le pastoralisme dans le Sahel sénégalais que le problème de l'adéquation entre la charge animale et le fourrage disponible.

Le suivi des ressources présente peu d'intérêt pour un système qui ne se préoccupe que peu ou pas du tout de la gestion des ressources suivies et dans le cadre duquel la capacité d'intervention sur la base de l'information disponible est limitée. Dans la mesure où le système pastoral extensif ne fait presque jamais l'objet d'investissements significatifs, on peut penser qu'il se prête mal à un suivi utile. Son seul avantage est d'être facile à suivre.

Les programmes de suivi se conçoivent mieux dans les zones agricoles ou dans le cadre de projets d'aménagement importants pour lesquels, compte tenu des investissements réalisés, il existe une capacité d'intervention permettant d'agir sur la base des informations obtenues.

7 Références

- AUBREVILLE, A., 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. — Société d'éditions géographiques et coloniales, Paris, 351 p.
- COUGNENOUR, M. B., J. E. ELLIS, D. M. SWIFT, D. L. COPPOCK, K. GALVIN, J. T. MCCABE et T. C. HART, 1985. Energy extraction and use in a Nomadic Pastoral Ecosystem. — *Science*, 230 (4726), p. 619-625.
- DIARRA, L. et P. H. Y. HIERNAUX, 1987. Évolution de la végétation sahélienne après la sécheresse. Bilan du suivi des sites du Gourma en 1985. — Document programme AZ 168, ILCA, Bamako.
- HELLDEN, U., 1984. Drought impact monitoring, a remote sensing study of desertification in Kordofan, Sudan. — Lunds Universitets Naturgeografiska Institution in cooperation with the Institute of Environmental Studies, University of Khartoum.
- HIERNAUX, P. H. Y. et C. O. JUSTICE, 1986. Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel malien. — *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), p. 1515-1531.

Analyse spatiale de la pression animale comme facteur de désertification dans le nord du Sénégal

- IBRAHIM, F. N., 1984. Ecological imbalance in the Republic of the Sudan, with references to desertification in Darfur. —Bayreuther Geowissenschaftliche Arbeiten 6, Bayreuth, 215 p.
- LAMPREY, H. F., 1975. Report on the desert encroachment reconnaissance in Northern Sudan : 21 October to 10 November 1985. —UNESCO/UNEP Consultant Report, 16 p.
- NELSON, R., 1988. Dryland management : the «desertification» problem. —World Bank Environment Department Working Paper, n° 8, 42 p.
- OLSSON, K., 1984. Long term changes in the woody vegetation in Northern Kordofan, The Sudan, study with the emphasis on *Acacia senegal*. —Lunds Universitets Naturgeografiska Institution in cooperation with the Institute of Environmental Studies, University of Khartoum.
- WARREN, A. et C. AGNEW, 1988. Une analyse de la désertification et dégradation des terres des zones arides et semi-arides. —IIED Document, n° 2, 28 p.

23

Cartographie du couvert sédimentaire dans le chott Jerid et ses environs (Sud tunisien) par télédétection

MOHAMED CHÉDLY RABIA* et FOUED ZARGOUNI**

**Institut national de la recherche scientifique et technologique, Université de Tunis II, B. P. 95, Hamam Lif 2050, Tunisie*

***Faculté des sciences de Tunis, Université de Tunis II, Le Belvédère 1002, Tunis, Tunisie*

Résumé

Les contraintes imposées aux régions arides et semi-arides par les phénomènes de désertification intenses sont mieux illustrées par une cartographie de base du couvert sédimentaire et des effets éoliens. Dans le cas de la zone des chotts du Sud tunisien où pullulent les oasis, les données satellitaires sont d'un apport considérable. En effet, elles permettent de dégager les actions de la dynamique éolienne, les dépôts salins et leur extension, l'encroûtement des sols et les effets de l'évaporation très importante dans la région. Ainsi, l'interprétation des données MSS a permis d'établir une carte au 1:180 000 des affleurements de surface du chott Jerid lui-même et de ses bordures. La combinaison de ce résultat cartographique avec les phénomènes tectonique, hydrogéologique, géochimique et climatique permet de replacer les différents phénomènes de désertification dans leur contexte régional.

1 Introduction et présentation de la région d'étude

La Tunisie, malgré une position géographique plutôt méditerranéenne, est un pays dont la moitié du territoire est menacé par la sécheresse, la désertification et à long terme par un

déséquilibre désastreux de l'écosystème. En effet, les oasis de la Nefzaoua et du Jerid, limitrophes de la grande dépression du chott Jerid, sont actuellement constamment soumis à l'action du vent et à la contamination des eaux salines provoquant une dégradation du sol, un ensablement accru des points d'eau et un encroûtement gypseux néfaste à l'agriculture.

L'impact de ces phénomènes sur le plan vital et social est rude : usure du tapis végétal et dégradation de l'habitat amenant à des crises sociales très profondes.

1.1 Cadre géographique

Le grand chott Jerid (fig. 1) est une grande dépression saline couvrant une superficie de l'ordre de 5 000 km²; à sa pointe orientale se greffe, sous forme d'un mince appendice long de 95 km et large d'une trentaine de km, le chott Fejej. Dans le contexte maghrebin, ces deux chotts font partie d'un alignement de bassins évaporitiques, comportant le chott El Gharsa en Tunisie et le chott Melrhir en Algérie, qui sont tous bordés vers le nord par la grande flexure atlassique allant d'Aghadir (Maroc) jusqu'au golfe de Gabès (Tunisie). Le chott Jerid lui-même est entouré vers l'ouest par les oasis du Jerid (Nefta, Touzeur, Kriz, etc.) et vers l'est et le sud par les oasis de la Nefzaoua (Fatnassa, Kebill, Douz, etc.).

Plus au sud encore, on est en présence d'une partie du Grand Erg oriental : véritable zone de transfert, transport et dépôts éoliens.

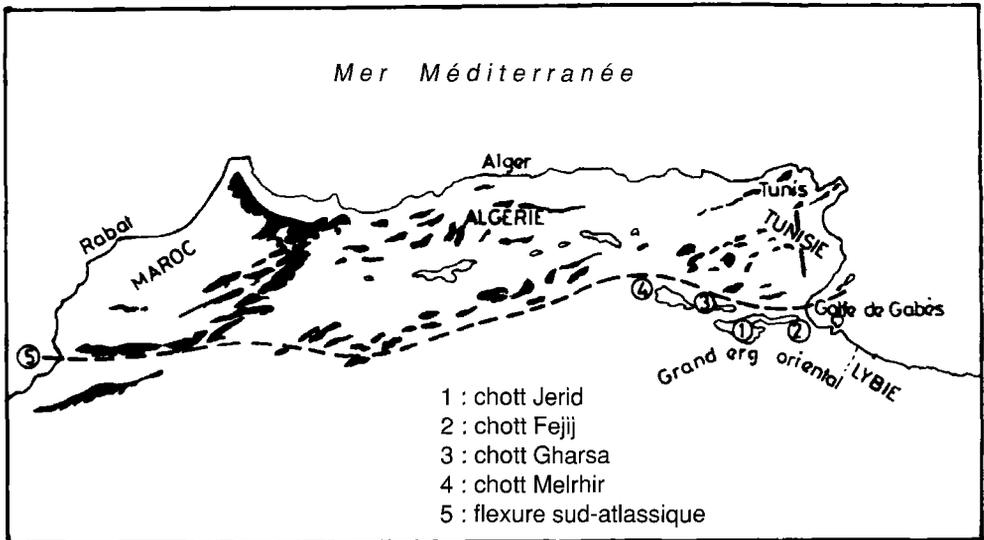


Figure 1. Carte de situation des chotts périatlassiques

1.2 Cadre géologique et géomorphologique

Du point de vue géologique et structural, la région des chotts à affleurements mio-pliocènes et quaternaires anciens et récents chevauche deux domaines différents par leur âge et leur style de déformation (Rabia, 1984) :

- au nord, l'Atlas tunisien à ossature surtout crétacée, témoin des derniers coups de l'orogène alpin;

- au sud, les affleurements d'une structure stable lâchement plissée appartenant à la plateforme saharienne.

La morphologie de la région du chott Jerid est caractérisée par les formes suivantes (Coque, 1962) :

- les retombées anticlinales de l'extrémité orientale de la chaîne du Cherb, appelée faisceau des plis de la chaîne nord des chotts (Rabia, 1984);

- les retombées monoclinales de la chaîne de Tébaga de Kebili, flanc sud du dôme de Fejej (Rabia, 1984);

- la grande dépression dépourvue de tout relief significatif du chott proprement dit;

- les glacis et terrasses au pied des reliefs entaillés par un réseau hydrographique aboutissant au chott lui-même.

1.3 Cadre climatique

Le climat dans la région du chott est très excessif (Mamou, 1976) avec une différence de température de 20° C entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid; les pluies sont rares mais réparties entre les saisons d'automne, d'hiver et du printemps. La pluviométrie ne dépasse guère 90 mm/an.

Il s'agit d'un climat plutôt continental, mettant en évidence l'influence du Sahara et du Grand Erg oriental. Cependant, deux facteurs essentiels sont présents dans l'édification actuelle de la sédimentation et le développement de l'écosystème; ce sont les vents multiples et violents et l'évapotranspiration dont les mécanismes sont contrôlés par la présence du Grand Erg oriental d'une part et par celle d'un bassin salin gorgé d'eau d'autre part.

2 Cartographie de la région d'étude

2.1 Les moyens utilisés

Les seules données utilisées lors de cette étude sont celles du Landsat MSS (tableau I).

2.2 Méthode

La méthode utilisée dans le présent travail a été dictée par :

- l'étendue de la région; en effet, il est incommode d'effectuer tous les travaux de cartographie en utilisant les seuls moyens classiques d'étude de terrain;

- l'absence quasi totale de relief dans la dépression du chott rendant très difficile la délimitation des contours des différentes classes du couvert sédimentaire: seule une vision à grande échelle, permettant une différenciation de classes par le contraste de réflectance, est crédible dans le cas présent;

- l'absence de moyens de traitements numériques des données satellitaires qui nous a poussé à exploiter un moyen plus conventionnel. Ainsi, la cartographie du chott a été tentée en se basant, en plus des données noir et blanc, sur un traitement au Digicol (fig. 2 et fig. coul. 23-3). Il s'agit là d'un simple étalonnage de l'échelle du gris permettant l'obtention d'images colorées à partir d'images noir et blanc. Le nouveau document ainsi obtenu permet

Tableau I. Données satellitaires utilisées lors de la présente étude

Satellite et capteur	Date	Canaux	Traitement	Échelle
Landsat 1 MSS	26/12/1975	6	Rehaussement des petits détails	1:200 000
Landsat 1 MSS	26/12/1975	4, 5, 7	Compositions colorées	1:250 000
Landsat 1 MSS	7/02/1973	6	Filtre passe haut (HPF)	1:250 000
Landsat 1 MSS	7/02/1973	4, 5, 7	Composition fausses couleurs	1:250 000
Landsat 1 MSS	21/03/1977	5	Sans traitement spécial	1:250 000
Landsat 1 MSS	21/03/1977	7	Filtre passe haut (HPF)	1:250 000
Landsat 1 MSS	21/03/1977	7	Dérivée horizontale	1:250 000
Landsat 1 MSS	21/03/1977	4, 5, 7	Étirement sinusoïdal des contrastes	1:250 000
Landsat 1 MSS	21/03/1977	7	Sans traitement spécial	1:500 000
Landsat 2 MSS	25/09/1980	4, 5, 7	Traitement au digicol	1:180 000
Landsat 5 MSS	15/03/1985	2, 4	Sans traitement	1:200 000

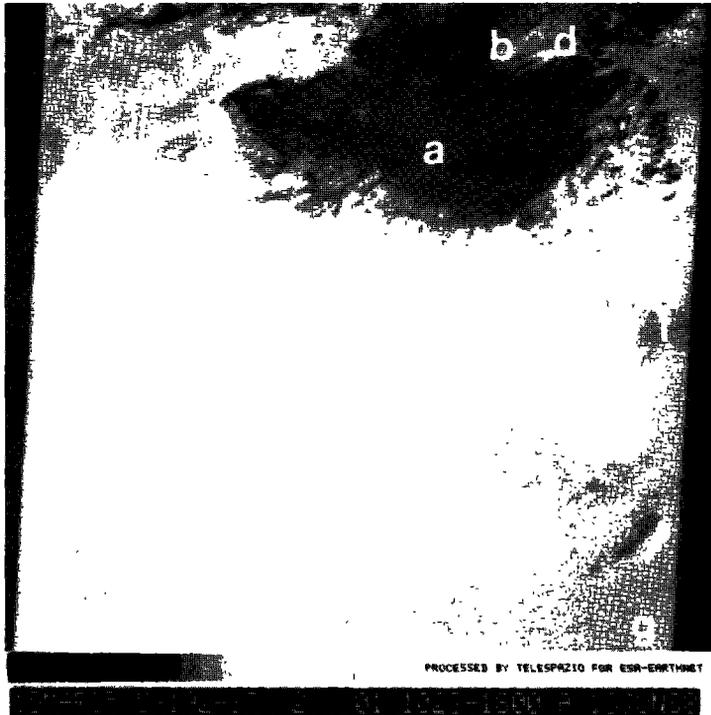


Figure 2. Image MSS5 192-37 (noir et blanc); a : chott Jerid, b : zone des aïouns, c : croûte gypseuse, d : incursions éoliennes, e : croûte calcaire, f : Hamada, g : traînées dunaires

d'améliorer l'impact de l'image sur l'observateur et de faciliter la détermination des limites des classes étudiées.

C'est une «classification manuelle supervisée», appuyée sur une confrontation avec les travaux antérieurs, la photo-interprétation et la vérité terrain, qui nous a permis de définir et de cartographier les différentes classes traduisant l'état de surface de la région aussi bien du point de vue couvert sédimentaire et végétal qu'hydrologique.

Par ailleurs, et faute d'une estimation plus directe de la radiométrie donc de la réflectance dans le domaine du visible et du proche infrarouge, nous avons utilisé une méthode plus pragmatique (empirique). Il s'agit de l'estimation de la réflexion au moyen du Digicol. Cette expérience a été illustrée par l'établissement d'un bloc diagramme. Enfin, une autre forme de télédétection, autoportée cette fois-ci en enregistrant le rayonnement gamma du radon ^{222}Rn , a été utilisée. Exploitant la forme gazeuse de l'élément détecté, cette méthode a pour mérite de nous indiquer les zones à grands indices de vide, c'est le cas du seuil hydrogéologique reliant Kriz à Kébili qui a révélé une forte activité (Rabia, 1984).

2.3 Résultats

Deux résultats fondamentaux ont été acquis lors de cette étude. Le premier est d'ordre purement cartographique permettant de contrôler la nature des dépôts et leur extension spatiale. Le second résultat est plutôt un essai d'interprétation de ces données en les conjuguant avec des données hydrogéochimiques et tectoniques approchant ainsi la compréhension de la dynamique de désertification dans la région d'étude.

2.3.1 Carte télé-analytique

Dans cette carte (fig. 4), deux grandes catégories de classes liées aux deux facteurs climatiques les plus influents dans la région (évapotranspiration et vent) ont été reconnues. À l'intérieur de ces deux catégories, ce sont surtout des critères de forme, d'induration, ou rarement de nature sédimentaire qui ont permis d'affirmer les subdivisions et de différencier ainsi une vingtaine de classes :

a) Des vases gorgées de saumures occupant le milieu du chott; ces vases sont le plus souvent formées d'un mélange d'argiles bleu-vert, de sables grisâtres et de gypse. Vers l'ouest, ces vases sont recouvertes par des «glacis» de sel.

b) Des zones à croûte de sel fragmentées en dalles bien visibles de part et d'autre de la route reliant Kébili à Kriz. Ces affleurements ont révélé une richesse relative en potassium avec des pics à 1,46 MeV caractéristiques du ^{40}K (Rabia, 1984). Il faut noter que, dans tous les cas, la croûte de sel à la surface ne dépasse guère les 0,50 cm.

c) Une mince croûte saline en cône avec parfois des silts et efflorescences de sel. Ces affleurements occupent surtout le centre du chott en liaison avec les zones vaseuses gorgées de saumures. À l'ouest du chott, elle passe à des zones meubles avec un couvert végétal rare.

d) Des sédiments silteux et salins formant une croûte occupent la plus grande surface du chott. Ces affleurements sont secs et le plus souvent à influence éolienne caractérisée surtout par des dunes mobiles. Il faut remarquer que ces formations occupent par rapport à celles déjà citées une position bordière. La faible quantité d'eau traduit là une position topographique plus haute et un écoulement vers les exutoires naturels (aiouns) déjà connus (Coque, 1962; UNESCO, 1972; Mamou, 1976).

e) Des plages réparties surtout en bordure orientale et sud orientale formant d'épaisses croûtes indurées de sel. Vers Nefta, ces croûtes sont parfois mélangées à des sables et silts friables, sèches et caractérisées par des recouvrements en sable éolien.

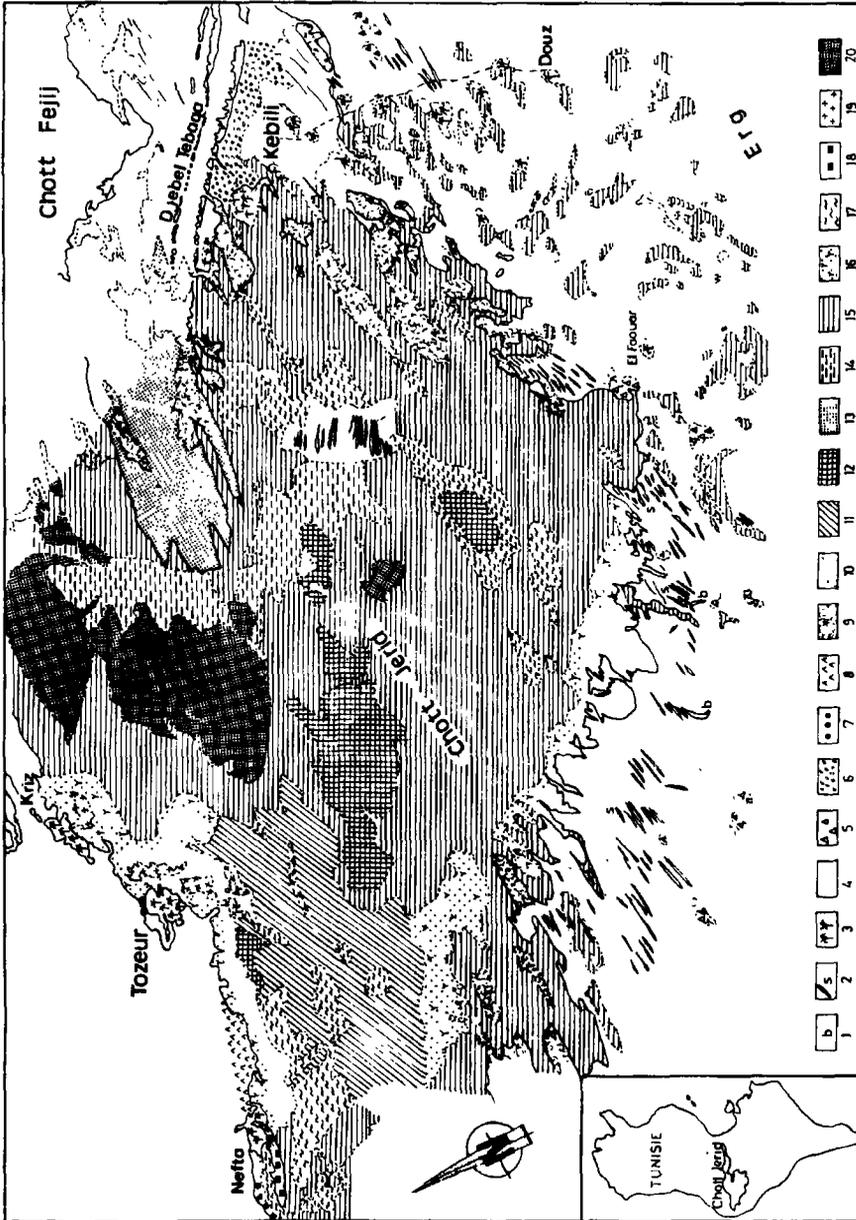


Figure 4. Carte télé-analytique des affleurements du chott Jerid, 1 : barkanes, 2 : sioufs, 3 : oasis, 4 : mer de sable, 5 : zone de déflation, 6 : terrasses alluvionnaires, 7 : étendue de galets, surfaces sableuses, 8 : dunes à encroûtements gypseux, 9 : dunes sableuses avec zone de transit et d'arrachement, 10 : eau stagnante, 11 : vases plus argiles à glaciés de sels, 12 : vases gorgées de saumures, 13 : dunes sableuses, 14 : atoums, 15 : croûtes silteuses et salines à fortes influence éolienne mince et sèche, 16 : mince croûte de sel en cône meuble avec couvert végétal rare, 17 : mince croûte saline en cône avec parfois des silts et efflorescences de sels, 18 : épaisse croûte de sel mélangé à des sables et silts avec des recouvrements éoliens, 19 : épaisse croûte de sel indurée, 20 : zone à croûte de sel fragmentée en dalles

f) Des surfaces d'eau stagnante changeant d'une image à une autre. Sur celles de Landsat 3 (mars 1985), l'eau est bien représentée sur deux surfaces sous forme de petits oueds. Les aiouns, exutoires naturels des différentes nappes du chott, s'alignent selon une direction nord-sud et occupent le centre du bassin. Cependant, et en raison de la fluctuation du niveau piézométrique de la nappe phréatique, les aiouns peuvent disparaître.

g) Vers la périphérie du chott, et surtout dans la région de Nefta-Tozeur, une croûte gypseuse assez dense recouvrant les dunes et les terrasses holocènes et pléistocènes. Ces gypses sont marqués par une réflectance importante due à une rugosité de surface très fine, une pauvreté en minéraux opaques et un indice de vide très faible.

h) Des dunes de sables, occupant des surfaces très importantes dans les environs du chott et formant par endroits des véritables couloirs. C'est le cas au nord de la presqu'île de Kebili et à l'ouest où les incursions sensibles au sein même du chott sont des véritables témoins de l'action éolienne. Leur pouvoir réfléchissant très appréciable les rend facilement repérables sur les images Landsat (fig. 2 et fig. coul. 23-3).

i) Quelques formes dunaires déchiffrables sur les images. Il s'agit surtout de sioufs, formes dunaires très allongées, le plus souvent bien orientées et occupant la majeure partie de la région méridionale du chott. Quelques formes en croissant (nebkhas) sont à signaler. Le reste des accumulations sableuses se présente sous forme de «mer de sable» sans forme particulière mais présentant des traînées rendant compte de la direction du vent.

j) Des zones d'arrachement à surface rugueuse visibles à l'ouest d'El Fouar situé au sud-est du chott.

k) Des accumulations alluvionnaires localisées aux pieds des reliefs et surtout vers le Jebel Tebaga, ainsi que des terrasses et glacis recouverts de galets provenant des terrains crétacés (barres calcaro-dolomitiques vraconienne et cénomanienne). Ces formations d'âge holocène et pléistocène viennent le plus souvent couvrir des dépôts mio-pliocènes limoneux et sableux.

2.3.2 Le comportement radiométrique des affleurements du chott Jerid

Le bloc diagramme de la figure 5 montre les faits suivants :

- Vers les bordures du chott, une nette augmentation de la transmission expliquée par un passage d'une zone très humide à une autre formée par des éléments quartziques très réfléchissants (sables éoliens).

- Le coeur du chott est en général très peu réfléchissant; la transmission est très faible sauf dans les endroits à influence éolienne. Ceci est le résultat d'une importante absorption, vers le proche infrarouge, par les milieux humides et l'eau.

- Un linéament orienté N 120-140 passant par Kriz et Kebili se traduit par un contraste net de transmission. L'origine tectonique de ce linéament a été confirmée par l'enregistrement du rayonnement gamma relatif au bismuth 214 (^{214}Bi), lui-même révélateur du radon 222. Il s'agit là du témoignage d'une direction tectonique très importante dans la région, à jeu essentiellement décrochant dextre, traduisant des cassures et failles profondes et anciennes ayant contrôlé la sédimentation depuis la fin du Jurassique et le comportement hydrogéologique du bassin.

2.3.3 Interprétation des résultats

La cartographie des affleurements du chott permet d'affirmer une présence très importante des saumures et des sels dans le couvert sédimentaire. Ces sels débordent largement le chott lui-même sous forme de croûtes épaisses de gypse et encore plus loin, essentiellement au nord de Tozeur, sous forme de croûtes calcaires (fig. 2) faisant du facteur hydrogéochimique et de l'évapotranspiration les premiers responsables de la dégradation des sols. Les zones ainsi encroûtées et devenant durcies perdent de plus en plus leur végétation.

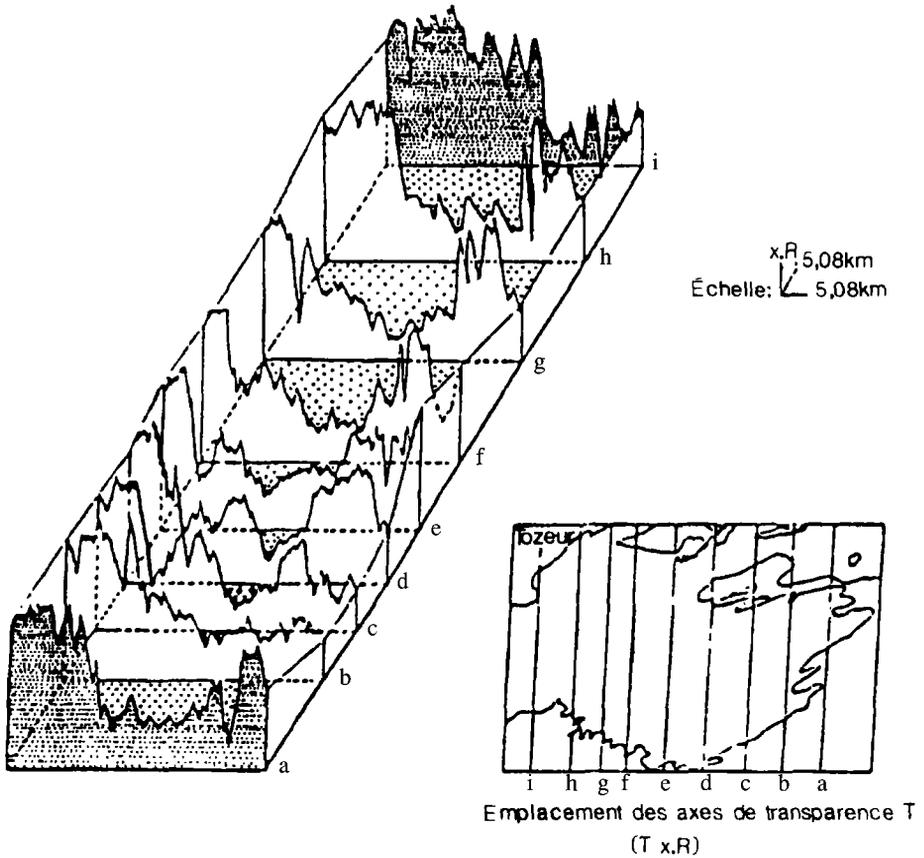


Figure 5. Traitement au Digicol : essai de cartographie sous forme de bloc diagramme de la transmission

Les apports au chott de quantités considérables de sels se font essentiellement selon deux mécanismes (tableau II). Ainsi le ruissellement contribue à un apport en sels en suspension et en solution non négligeable. Les séries crétacées fonctionnant comme zone d'alimentation sont bien représentées dans la région par le Wealdien (Barrémien) gypso-gréseux occupant le coeur du chott Fejej, par les gypses du Cenomanien moyen et ceux du Turono-Coniacien des chaînes du Cherb et de Tebaga de Kebili (Rabia, 1984).

Le tableau II montre l'importance de la contribution des nappes souterraines aux apports salins au chott Jerid. En effet, la tectonique profonde d'une part et la contamination par ascendum facilitée par une évapotranspiration d'autre part, sont à l'origine des dépôts de sel dans le chott. Ainsi, des accidents profonds, tel que celui révélé par la télédétection spatiale (image Landsat) et autoportée (rayonnement gamma) mettant en contact la nappe du continental intercalaire très chargée (2,8 à 5,3 g/l, Mamou, 1976) avec celle du complexe terminal, ont permis une migration verticale et latérale des sels en solution. Par ailleurs, il n'est pas exclu que des accidents de même nature se situent sous le couvert quaternaire du chott et aient fonctionné de la même façon.

À côté de ce mécanisme d'ordre tectonique et hydrodynamique, le climat excessif a joué en faveur d'une évaporation accrue estimée à 2500 mm/an; conjuguée à l'effet de la pression,

Tableau II. Bilan des apports de sels amenés par ruissellement et par les eaux souterraines au chott Jerid (10^4 tonnes/an) (Gueddari, 1980)

Sels reconstitués	NaCl	KCl	CaSO ₄ 2 H ₂ O	CaCO ₃	CaMg(CO ₃) ₂	MgSO ₄	MgCO ₃
Ruissellement en suspension			0,24	0,44	0,25		
Ruissellement en solution	3,53	0,11	1,46			0,07	0,87
Nappes souterraines	41,20	2,70	46,00	4,80		16,80	
Total	44,73	3,01	47,70	5,24	0,25	16,87	0,87

l'évaporation a rendu obligatoire un appel continu, vers la surface et les aïons, des eaux chargées. Les dépôts évaporitiques se continuent actuellement sous la double influence du vent et de l'évaporation, à une vitesse de sédimentation de 2 cm/an (Gueddari, 1980).

Au niveau des oasis, où la culture en trois étages est dominante, la relative faiblesse de l'évaporation n'exclut pas la contamination en sel dissous qui migre latéralement dans les couches loessiques très perméables. C'est ainsi que, dans les oasis de Nefta-Tozeur ou ceux de la presqu'île de Kébili, des couches de sel très minces sont souvent visibles sur les sols cultivés.

À côté de ces facteurs hydrogéologiques, le vent forme un agent majeur de désertification. En plus de sa contribution dans l'évaporation et dans le transport des particules de sel recristallisées, l'action éolienne est omniprésente. Les vents du secteur est et nord-est soufflent 120 jours par an au printemps et sont à l'origine de l'ensablement des points d'eau et des terres cultivées. Les vents de sables fréquents en automne et au printemps accompagnent en fait des courants de diverses directions avec une dominance du secteur est qui est traduite par l'orientation des barkanes et l'alignement en sioufs des édifices éoliens.

Les alignements de dunes en cordons ayant une direction SO-NE, repérés au nord de Jebel Tebaga et à l'extrémité ouest de Tebaga, concordent avec les espaces libres au sein des reliefs caractérisés par des Khanga sous forme de couloirs. Vers la proximité du Grand Erg oriental, au niveau d'El Fouar, l'importance de ces cordons devient de plus en plus spectaculaire offrant à la région un paysage franchement saharien.

Enfin, l'érosion hydrique favorisée par un réseau hydrographique ancien assez dense descendant les reliefs de Tebaga et de la chaîne nord des chotts est relativement active. Son action se matérialise par les différents dépôts de piedmont caractérisés par des alluvions à éléments assez grossiers et par des croûtes gypseuses; ces dernières constituent le revêtement imperméable qui serait formé par une évolution sur place. Cette érosion hydrique des formations géologiques carbonatées crétacées est aussi responsable, par endroits, de la formation de zones présentant une forme en dalles et blocs fissurés et dénudés (hamada).

3 Conclusion

L'une des principales conclusions à laquelle nous a conduit le présent travail est que les mécanismes les plus importants dans la dégradation du sol et la désertification de la région sont :

- La migration saline liée aux phénomènes hydrogéochimiques, tectoniques et d'évaporation rendant les eaux d'irrigation de plus en plus chargées. Ainsi, ces phénomènes

contribuent à la formation d'encroûtements gypseux et calcaires qui empêchent l'évolution normale des sols et introduisent un déséquilibre minéralogique sur ceux-ci. Les oasis, où l'évapotranspiration est moins importante, ne sont que momentanément à l'abri.

- L'existence de vents violents, sans véritables obstacles naturels et à côté d'une zone d'alimentation (Grand Erg oriental).

En plus de l'ampleur de leur action dévastatrice, ces deux phénomènes évoluent avec le temps et dans l'espace compliquant ainsi la prévision de leur manifestation future.

Enfin, nous pouvons conclure que l'utilisation de la télédétection spatiale, dans un but cartographique, couplée à une connaissance profonde des conditions hydrogéologiques, géochimiques et météorologiques a été d'un apport certain. Cependant, il faut remarquer que les renseignements recueillis par une interprétation visuelle des images pourraient être précisés par :

1) un traitement numérique des données satellitaires recueillies à différentes dates, cette démarche aura pour but l'affinement des classes et la recherche des critères permettant l'estimation du degré de désertification;

2) l'intégration des données de géochimie, d'hydrologie et de météorologie avec celles obtenues par télédétection.

C'est ainsi que nous suggérons des études thématiques, pluridisciplinaires et multitemporelles pour essayer de comprendre ces facteurs et donner des solutions adéquates contribuant à la lutte contre la désertification dans le sud de la Tunisie.

4 Références

- COQUE, R., 1962. La Tunisie présaharienne, étude géomorphologique. —Éditions Masson, Paris, 448 p.
- GROS, J. C., 1980. Reconnaissance des terrains alluvionnaires par télédétection infrarouge et levées radiométriques gamma. —Bulletin de l'Association internationale de la géologie de l'ingénieur, n° 22, p. 41-46.
- GUEDDARI, M., 1980. Géochimie des sels et des saumures du chott Jerid (Sud tunisien). —Université Paul-Sabatier, Toulouse, 126 p.
- MAINGUET, H., 1982. Indications des images satellitaires pour des recherches concernant la protection des oasis contre l'ensablement. —International society of photogrammetry, Commission VII, Toulouse 1982, p. 621-629.
- MAMOU, A., 1976. Contribution à l'étude hydrogéologique de la presqu'île de Kébili. —Thèse de troisième cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris
- PAGE, N. et B. SIMON, 1987. Télé-analyse diachronique de différents états du lac Nataron (rift est-africain, Tanzanie), mise en évidence de variations saisonnières et pluriannuelles de son remplissage. —Bulletin des sciences géologiques, Strasbourg, 40.1.2, p. 23-39.
- RABIA, M. C., 1984. Étude géologique de la région des chotts (Sud tunisien) par télédétection spatiale, détection de la radioactivité naturelle gamma et analyse hydrogéochimiques. —Thèse de troisième cycle, Université de Bordeaux I.
- RABIA, M. C. et F. ZARGOUNI, 1984. Étude multiscalaire de la structure de la chaîne des chotts, segment de la flexure sud-atlassique. —10^e Réunion annuelle des sciences de la Terre, Bordeaux.
- UNESCO, 1972. Étude des ressources en eau du Sahara septentrional. —Paris.

- ZARGOUNI, F., 1985. Tectonique de l'Atlas méridional de Tunisie, évolution de l'Atlas méridional de Tunisie, évolution géométrique et cinématique des structures en zone de cisaillement. —Thèse de doctorat es sciences, —Université Louis-Pasteur, Strasbourg.
- ZARGOUNI, F., M. C. RABIA et C. ABBES, 1985. Rôle des couloirs de cisaillement de Gafsa et de Negrine-Tozeur dans la structuration du faisceau des plis des chotts, éléments de l'accident sud-atlassique. —Comptes rendus de l'Académie des sciences, Paris, t. II, 301, n° 11, p. 831-834.

24

Apport d'une nouvelle hypothèse de base en classification d'images satellitaires pour la cartographie de la couverture végétale

JEAN-PAUL RASSON*, FRANÇOISE ORBAN-FERAUGE**, JEAN-MARIE DAWAGNE* et FRANÇOISE DELPÉRÉE*

**Département de Mathématique, **Département de géographie, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rempart de la Vierge, 8, 5000 Namur, Belgique*

Résumé

Les principales méthodes de classification existantes sont la classification automatique (agglomérative ou divisive) et l'analyse discriminante. En télédétection, la méthode d'analyse discriminante couramment utilisée est une méthode paramétrique qui suppose que les densités des pixels à classer sont normales multivariées; les critères d'agglomération s'expriment généralement en termes de distances. La nouvelle approche présentée ici repose sur une hypothèse de base différente selon laquelle les pixels à classer sont répartis de manière uniforme au sein d'ensembles disjoints résultant de la réalisation d'un processus de Poisson; l'approche est généralisée pour des classes non disjointes. La mesure de similarité proposée est la mesure de Lebesgue, mesure de la surface, du volume ou de l'hypervolume - selon la dimension de l'espace - de l'enveloppe convexe des points. Plusieurs classifications réalisées dans le but de discriminer l'affectation des sols seront présentées et discutées en termes de comparaison entre les résultats obtenus par la méthode classique paramétrique - dite du maximum de vraisemblance - et la méthode non paramétrique - dite méthode de Rasson. Dans le cadre d'une classification tout à fait automatique opérée au départ des seules réflectances des pixels dans les différents canaux du scanner utilisé, les tests montrent un avantage de la méthode Rasson des points de vue taux d'erreur, temps de calcul, hétérogénéité des parcelles, mise en évidence des régions naturelles. On peut espérer que cette méthode réduira le travail interactif nécessaire pour produire une cartographie de la couverture végétale.

1 Introduction

L'utilisation de l'imagerie satellitaire en cartographie nécessite un classement thématique précis des images. Les méthodes d'analyse discriminante permettent, à partir d'une réalité terrain, de réaliser ce classement.

Les méthodes classiques mesurent habituellement les similarités ou dissimilarités entre objets ou groupes d'objets en terme de distances ou semi-distances. La méthode présentée ci-dessous développe une nouvelle approche statistique du problème.

2 Modèle

Le modèle suppose que l'échantillon est la réalisation d'un processus de Poisson homogène dans l'union d'un nombre fini N de convexes disjoints.

Rappelons les trois propriétés fondamentales du processus de Poisson :

1) la variable aléatoire N_A qui compte le nombre de points dans le domaine A suit une distribution de Poisson dont le paramètre est la mesure de Lebesgue du domaine A ;

2) si deux domaines A, B sont disjoints, les variables aléatoires N_A et N_B sont indépendantes;

3) conditionnellement au fait que n points aléatoires engendrés par ce processus appartiennent au domaine A , ceux-ci sont distribués uniformément et indépendamment dans A .

Soient C_k , le domaine convexe compact et p_k la probabilité a priori qu'un individu appartienne à C_k ($k = 1, 2, \dots, N$).

La densité de la population $k, f_k(x)$, est égale à

$$f_k(x) = \frac{1}{m(C_k)} 1_{C_k}(x)$$

et la densité

$$f(x) = \frac{1}{m(C)} \sum_{k=1}^N 1_{C_k}(x)$$

où $1_C(x)$ est l'indicatrice du domaine C ; $C = \bigcup_{k=1}^N C_k$ et $m(C)$ = mesure de Lebesgue du domaine C .

La règle de décision associée est donnée par la règle bayésienne avec les paramètres inconnus - les ensembles convexes $C_k, k = 1, 2, \dots, N$ - remplacés par leur estimation du maximum de vraisemblance, les enveloppes convexes $H(X_k)$ de l'ensemble des points X_k appartenant aux convexes $C_k, k = 1, 2, \dots, N$.

Si l'individu à classer x_0 est affecté au $k^{\text{ième}}$ groupe alors l'estimation du domaine C_j est donnée par

$$\begin{aligned} \tilde{C}_j^X &= H(X_j) & J \neq K \\ \tilde{C}_j^X &= H(X_j \cup \{x_0\}) & J = K \end{aligned}$$

L'estimation du maximum de vraisemblance $p_k f_k$ est donc

$$p_k \hat{f}_k(x_0) = \frac{1}{\sum_{j=1}^k m(H(X_j)) + S_k(x_0)}$$

où $S_k(x_0) = m(H(x_k \cup \{x_0\})) - m(H(x_k))$ (mesure ajoutée à l'enveloppe convexe de X_k par le point x_0).

La règle d'allocation est donc : assigner x à la $k^{\text{ème}}$ population si et seulement si $S_k(x) < S_j(x)$, $k \neq j$.

On affecte donc un point à la population pour laquelle la mesure de Lebesgue ajoutée par ce point à l'enveloppe convexe est minimale (fig. 1).

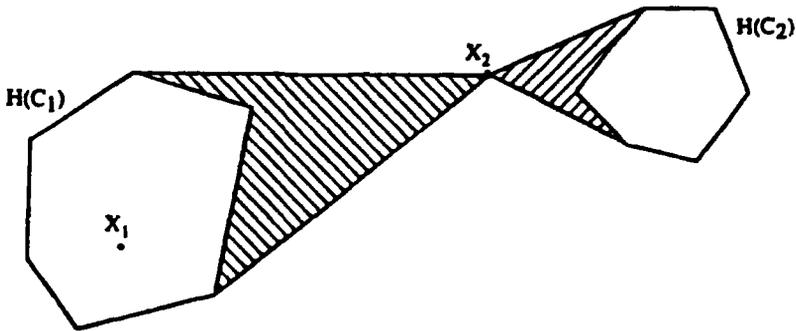


Figure 1. Illustration de la règle d'allocation (décision : X_1 est affecté à C_1 et X_2 à C_2)

En particulier, un point n'appartenant qu'à une seule enveloppe convexe est assigné à la population correspondant à celle-ci.

La frontière entre les deux classes est le lieu des points ajoutant la même mesure aux deux enveloppes convexas (fig. 2). On peut montrer (Baufays, 1985) que la frontière est linéaire par morceaux.

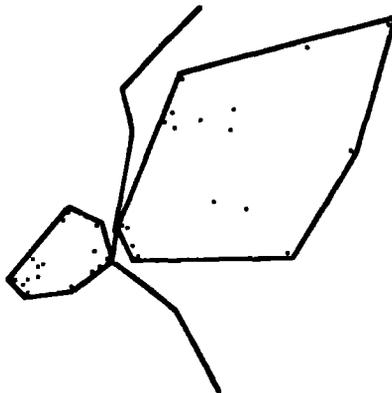


Figure 2. Frontière entre deux classes ajoutant la même mesure aux deux enveloppes convexas

L'originalité de cette méthode réside dans le fait que la similarité entre un point et une classe est mesurée non pas en terme de distance mais bien en terme de mesure de Lebesgue.

Dans le cas d'enveloppes convexes non disjointes, une première approche propose de laisser non classés les points appartenant à plusieurs enveloppes convexes. Cette méthode, appliquée à un classement fin d'une image satellitaire, laisse trop de points non classés, le recouvrement des enveloppes convexes étant trop important.

Une nouvelle approche (Dawagne et Delpérée, 1988) est de construire à l'intérieur de chaque intersection les enveloppes convexes des points de chaque population (fig. 3).

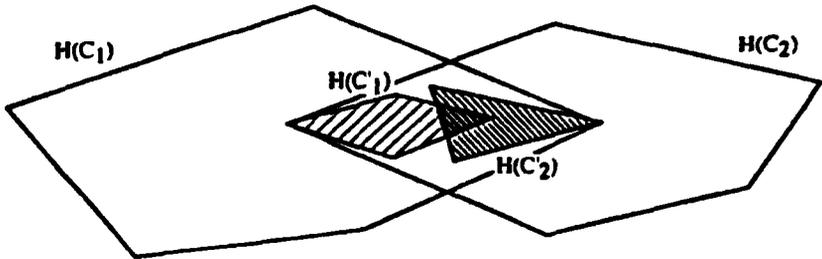


Figure 3. Construction des enveloppes convexes des points de chaque population à l'intérieur d'une intersection

Cette méthode permet toujours de disjointer les bases d'entraînement en un nombre fini d'étapes.

L'algorithme ainsi développé classe à chaque étape les points appartenant à une ou aucune enveloppe convexe et laisse les autres points à classer à l'étape (ou «niveau») suivante.

La classification automatique - ou clustering - associée au même modèle est développée par Hardy (1983). Elle est basée sur le fait que l'échantillon à classifier x^* est une réalisation d'un processus de Poisson dans l'union C de N domaines convexes compacts disjoints C_1, C_2, \dots, C_N . La densité de l'échantillon est donc égale à

$$f(x^*) = \left(\frac{1}{m(C)} \right)^N \prod_{i=1}^N 1_C(x_i)$$

Les paramètres inconnus (C_1, C_2, \dots, C_N) sont estimés par maximum de vraisemblance. La valeur de la fonction de vraisemblance associée à la partition de l'échantillon (X_1, X_2, \dots, X_k) est égale à

$$\left(\frac{1}{\sum_{i=1}^N m(H(X_i))} \right)^N$$

Dès lors, la méthode de classification vise à déterminer la partition de l'échantillon pour laquelle le critère

$$\sum_{i=1}^N m(H(X_i))$$

est minimal.

Cette méthode répond aux conditions d'admissibilité de Fisher et Van Ness (1971).

3 Application

Différents tests ont été exécutés dont un premier sur des données d'affectations fonctionnelles urbaines, dans un cas où nous étions en mesure de vérifier tous les résultats de manière exhaustive (Orban-Ferauge *et al.*, 1988). À titre d'exemple, trois résultats provenant de classification thématique d'images satellitaires SPOT sont ici sommairement présentés et discutés des points de vue temps de calcul, taux d'erreur estimé par «bootstrap» (Efron, 1979) et application cartographique.

3.1 Exemple 1

Une fraction d'image SPOT (proposée comme test par le Centre commun de recherche d'Ispra [Italie]) concernant la région des Vans (Ardèche/France) a été classée selon la méthode des enveloppes convexes proposée ci-dessus d'une part, et selon la méthode dite du maximum de vraisemblance, méthode classique basée sur la normale quadratique (IMSL, 1979) d'autre part. Le but est d'obtenir une classification des 65 536 pixels dans l'espace à 6 dimensions de 2 images multitemporelles (2 X HRV) en 21 classes, opération particulièrement délicate du fait d'un recouvrement des classes de distribution des pixels de 90% au sein de la réalité terrain.

Théoriquement, la méthode des enveloppes convexes résoud le problème de recouvrement des classes en créant un grand nombre de niveaux. Pour permettre un classement plus rapide, on applique un «pré-clustering» - c'est-à-dire une procédure descendante de classification - sur chaque classe de la réalité terrain : à partir des 21 classes initiales, on obtient 132 sous-classes. Le tableau I présente les taux d'erreur et les temps CPU des trois méthodes testées.

Tableau I. Résultats obtenus dans l'exemple 1

Méthode	Taux d'erreur (bootstrap)	Temps CPU
IMSL (21 classes)	38,4%	874 s
IMSL (132 sous-classes)	24,7%	5 549 s
Enveloppes convexes (132 sous-classes)	8,3%	2 157 s

Une comparaison des deux classifications obtenues avec la structure parcellaire reprise sur la carte IGN correspondante et une vérification sur le terrain de quelques zones critiques permettent d'accorder davantage de crédit à la classification par enveloppes convexes. Les principales différences consistent en une plus importante hétérogénéité interne des parcelles dans la méthode classique que dans la nouvelle méthode proposée, ainsi qu'en une surestimation des classes rares et une sous-estimation des classes abondantes par la méthode classique.

3.2 Exemple 2

Une seconde portion d'image SPOT (512 par 512 pixels) a été classée pour obtenir l'affectation du sol d'une région du sud-est de la Belgique dans l'espace à 3 dimensions de

XS1, XS2 et XS3. Les résultats confirment l'avantage de la méthode des enveloppes convexes du point de vue des taux d'erreur (tableau II).

Tableau II. Résultats obtenus dans l'exemple 2

Méthode	Taux d'erreur (bootstrap)	Temps CPU
IMSL (7 classes)	3,8%	1 149 s
Enveloppes convexes (42 sous-classes)	1,1%	3 198 s

Il n'a pas été possible d'utiliser la règle discriminante de la méthode classique au départ des 42 sous-classes; les temps de calcul ne sont donc pas rigoureusement comparables dans ce cas.

L'examen des images classées met en évidence une sérieuse difficulté dans la discrimination des feuillus par rapport aux friches, de l'urbain dense par rapport à un habitat lâche dans l'application de la méthode classique. Celle-ci surestime fortement les classes «urbain» et «champs» et les régions naturelles y sont plus difficiles à identifier; ce qui représente un sérieux handicap du point de vue de la réalisation d'une cartographie thématique à échelle régionale. De plus, lors de la vérification de terrain, il s'est révélé que les pixels mixtes sont majoritairement bien classés par la méthode des enveloppes convexes, contrairement à ce qu'obtient la méthode classique.

3.3 Exemple 3

Un test a également été effectué sur une région humide d'habitat dispersé dans l'est de la Belgique. Les pixels d'une fraction d'image SPOT (512 par 512 pixels) ont été classés en 17 rubriques selon les deux méthodes précitées. Le tableau III présente les taux d'erreur et les temps CPU des deux méthodes testées.

Tableau III. Résultats obtenus dans l'exemple 3

Méthode	Taux d'erreur (bootstrap)	Temps CPU
IMSL (17 classes)	6,5%	2 621 s
Enveloppes convexes (17 classes)	2,5%	2 059 s

Le calcul de sous-classes n'étant pas nécessaire dans ce cas, les temps de calcul sont ici tout à fait comparables et sont à l'avantage de la méthode des enveloppes convexes, tout comme le taux d'erreur obtenu.

Les classifications obtenues sont assez voisines à l'exception de quelques classes pour lesquelles une vérification de terrain n'a pas encore été effectuée. Cependant, d'après l'analyse des photographies aériennes, il apparaît que les pixels mixtes (notamment des classes «habitat lâche» et «routes») sont plus correctement affectés par la méthode des enveloppes convexes.

4 Discussion et conclusion

L'important recouvrement des classes, fréquent en télédétection, rend certainement difficile l'opération de discrimination des affectations. Les réflectances de classes différentes sont

souvent voisines en plus du fait qu'une même affectation peut envoyer un signal spectral très différent en fonction de nombreux facteurs tels les variations d'éclairement, de pente, de drainage, etc. Le pré-clustering effectué au sein de la base d'entraînement avant d'opérer l'analyse discriminante permet d'éliminer une bonne part de ce recouvrement mais ne l'élimine pas totalement. Les premiers résultats livrés par les tests réalisés jusqu'à présent sont encourageants tant du point de vue taux d'erreur (abaissement d'un facteur 3 à 4 par la méthode de calcul la plus sévère) que du point de vue temps de calcul (jusqu'à diminution d'un facteur 4 en présence d'un nombre identique de classes dans la zone d'entraînement) et du point de vue crédibilité des résultats (parcelles plus homogènes, vérification de points critiques sur le terrain, estimation de la répartition des pixels classés). La reformulation du modèle de base (distribution uniforme résultant d'un processus de Poisson au lieu de distribution normale quadratique) et de l'estimateur de mesure de similarité (hypervolume de l'enveloppe convexe des points à classer au lieu de distance euclidienne entre ces points) améliore sensiblement la qualité des résultats. Bien entendu, l'application entièrement automatique de tels algorithmes de classification sur les seules données spectrales d'une image satellitaire, sans prise en compte d'aucun indicateur de texture, de structure ou de segmentation d'image, ne peut actuellement prétendre mener directement à une cartographie thématique; cependant, l'application de la méthode des enveloppes convexes peut permettre de diminuer sensiblement le travail interactif - par ailleurs très coûteux - nécessaire à l'édition de cette cartographie. La relative homogénéité des parcelles obtenues permet d'envisager la mise au point d'une procédure qui modifierait favorablement le rapport entre le travail interactif et non interactif. Actuellement, l'algorithme de classification des enveloppes convexes tourne sur VAX 785; son adaptation sur mini-ordinateur (type MicroVAX) est en cours dans le cadre d'un contrat avec le secteur privé.

5 Références

- BAUFAYS, P., 1985. Une nouvelle règle géométrique discriminante. —Thèse de doctorat, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur.
- DAWAGNE, J.-M. et F. DELPÉRÉE, 1988. Une simplification des méthodes basées sur le critère de Rasson en classification automatique et analyse discriminante. Applications. —Mémoire de licence, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur.
- EFRON, B., 1979. Bootstrap Methods : Another Look at the Jackknife. —Annals of Statistics, 7, p. 1-26.
- FISHER, L. et J. W. VAN NESS, 1971. Admissible Clustering Procedures. —Biometrika, 58, p. 91-104.
- HARDY, A., 1983. Une nouvelle approche des problèmes de classification automatique : un modèle - un nouveau critère - des algorithmes - des applications. —Thèse de doctorat, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur.
- IMSL, 1979. International Mathematical Statistical Libraries. —Houston, Texas.
- ORBAN-FERAUGE, F., J.-M. DAWAGNE et F. DELPÉRÉE, 1988. Critical utilisation of a natural measure of proximities, based on the hypervolume of a multidimensional set, for a functional partition of space. —Proceedings of III meeting of the Euro working group on locational analysis, Sevilla.

25

Évaluation des images TM et SPOT pour le suivi de l'étalement du fleuve Niger (Mali) dans une perspective d'aménagement hydro-agricole

KEITH P. B. THOMSON*, PAUL GILBERT*, SOUMALIA SAMAKÉ** et
ANNICK JATON*

**Laboratoire de télédétection, Département des sciences géodésiques et télédétection,
Université Laval, Ste-Foy, Québec, Canada G1K 7P4*

***Direction nationale du génie rural, Ministère de l'agriculture, avenue Mohamed V,
B. P. 155, Bamako, Mali*

Résumé

L'objectif de ce projet est l'étude et la cartographie du comportement d'un bief du fleuve Niger en s'appuyant sur des techniques de télédétection de façon à sélectionner des sites propices aux aménagements hydro-agricoles.

De par le comportement discontinu du régime de submersion du fleuve, l'étape clé du projet consiste à délimiter les zones submergées au cours de son cycle annuel. Pour ce faire, la télédétection peut se révéler d'un grand secours vu les possibilités multitemporelles d'acquisition et la restitution multispectrale qu'elle permet. Ainsi, des images Landsat-TM et SPOT ont été traitées en vue d'évaluer leur potentiel dans le domaine et de comparer leurs possibilités. Une cartographie du bief Bourem-Gao (boucle du Niger) a résulté de ces traitements ainsi que les conclusions suivantes : les données Landsat-TM aident grandement à l'interprétation automatique de par leur résolution spectrale; par contre, la haute résolution spatiale des images panchromatiques de SPOT apporte un atout majeur lorsque l'on parle d'interprétation visuelle et d'occupation du sol.

1 Introduction

Dans les pays du Sahel, la gestion des ressources en eau est à la base de tout développement agricole. Cette gestion débute sainement à l'aide d'un bon suivi hydrologique. Au Mali, le fleuve Niger constitue la principale ressource en eau. Face à la sécheresse persistante depuis une quinzaine d'années et à la mauvaise répartition de la pluviométrie, la Direction nationale du génie rural (DNGR) a cherché à développer l'irrigation en maîtrise totale des eaux dans la vallée du Niger. La production agricole pourrait alors s'affranchir des aléas climatiques et hydrologiques. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des différents étages d'inondation puisqu'ils conditionnent l'aménagement agricole.

La démarche utilisée jusqu'à ce jour par la DNGR repose sur la photo-interprétation de clichés panchromatiques au 1:20 000 et 1:50 000. Or, les photographies peu récentes, le coût élevé des missions de prise de vues aériennes et le dur labeur de la photo-interprétation ne permettent pas un suivi annuel du cycle hydrologique et ont incité la DNGR à se tourner du côté des techniques de télédétection.

Dans ce sens, le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) subventionne un projet exécuté par la DNGR et le Centre de télédétection de l'Université Laval et dont l'objectif premier consiste à améliorer les compétences de la DNGR dans l'identification des sites potentiels d'aménagement agricole dans la vallée du Niger à l'aide des outils qu'offre la télédétection. Ce projet est d'ailleurs décrit de façon détaillée dans une publication antérieure (Thomson *et al.*, 1988).

Nous nous intéresserons ici plus particulièrement à un des sous-objectifs, soit : l'évaluation du potentiel des données Landsat et SPOT pour délimiter l'étalement du fleuve Niger et ainsi identifier les sites propices à l'aménagement hydro-agricole.

2 Contexte géographique

2.1 Secteur d'étude

Le présent projet prend place au sommet et en aval de la boucle du Niger sur le bief défini par les villes de Bourem et Gao entre les longitudes 0° 30' O et 0° 10' E et les latitudes 17° 10' N et 16° 10' N (fig. 1). Bien que l'on puisse facilement retrouver une description des éléments du contexte bio-physique (Bertrand et Bourgeon, 1984; Tams/USAID, 1983), mentionnons que le climat dans cette région est de type sahélo-saharien avec de faibles précipitations de l'ordre de 160 mm par an et que l'activité agricole y est très intense.

2.2 Le phénomène de submersion du fleuve Niger

Pour bien comprendre comment peut se développer l'agriculture dans le secteur étudié, il est nécessaire d'expliquer le comportement du fleuve Niger puisque ce dernier en conditionne l'aménagement. Le climat présent sous les tropiques engendre une onde de crue et de décrue au cours d'une même année. Ce phénomène quoique continu entraîne des submersions brusques suivies de phases de latence en raison du relief en terrasses tel que le présente la figure 2.

L'activité agricole est donc directement dépendante du niveau de submersion et de sa durée. On notera, par exemple, que le sorgho est semé au moment du retrait des eaux (avril) alors que le riz l'est en juillet afin que les pluies assurent sa germination et sa croissance.

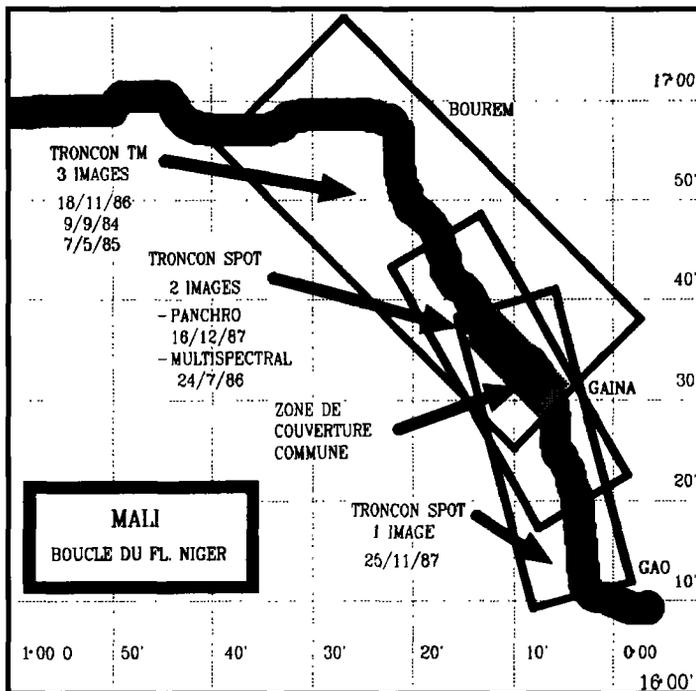


Figure 1. Zone à l'étude, images traitées et couverture fluviale

Le riz arrivera à maturité s'il n'a pas été noyé par des pluies trop abondantes ou précoces et s'il n'a pas séché à cause d'une crue tardive. Cet exemple nous montre l'importance d'une bonne connaissance de la morphologie du fleuve dans le temps pour la réussite des cultures.

3 Méthode

3.1 Choix des images

Réaliser nos objectifs implique nécessairement un choix judicieux des images satellitaires. Il fallait non seulement couvrir l'ensemble du bief à l'étude, choisir des dates appropriées pour le suivi de la submersion et s'accorder avec les relevés de hauteur d'eau, mais également tenir compte des images Landsat-TM et SPOT disponibles.

Ainsi, trois images TM et trois images SPOT ont été retenues pour couvrir l'ensemble du bief. Une zone de couverture commune sert à la comparaison entre les deux capteurs. On retrouve les régions couvertes et les dates d'acquisition sur la figure 1.

3.2 Traitements effectués

Le traitement numérique des images TM et SPOT a pour but d'identifier l'étalement du fleuve et de comparer les capacités des deux types d'images. Nous avons donc procédé aux étapes de traitement suivantes :

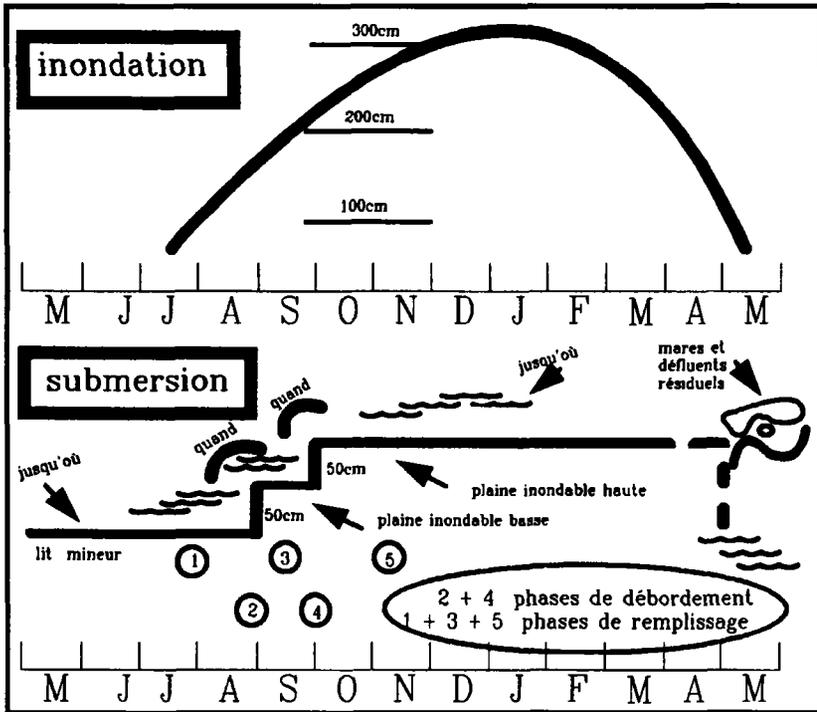


Figure 2. Schématisation des événements dans le temps; en haut : l'onde de crue, un phénomène continu; en bas : le régime de submersion, un phénomène discontinu (Bertrand et Bourgeon, 1984)

- Correction géométrique des images : il s'agit en fait d'une simple mise au registre puisque la non disponibilité de carte à petite échelle et le manque de repères cartographiés identifiables sur les images n'ont pu permettre une correction géométrique en coordonnées UTM.

- Calibrage radiométrique des images afin d'assurer la continuité de l'interprétation. La zone de calibrage a été choisie dans la partie commune aux deux types d'images après avoir masqué la zone de crue et la végétation chlorophyllienne peu stables dans le temps.

- Rééchantillonnage spatial lorsque les comparaisons entre les différents types d'images étaient nécessaires.

- Rehaussement linéaire de contraste visant à dégager les éléments de la plaine inondable.

- Rehaussement d'arrêtes dérivé du Laplacien 5A (Gilbert, 1986).

- Production de compositions colorées énumérées dans la section des résultats et réalisées afin de mettre en évidence le fleuve en état de crue, mi-crue et étiage, de déceler les avantages de certaines bandes spectrales et de comparer les images SPOT et TM.

- Classifications unidimensionnelles simples et recouvrements d'aires afin d'inventorier des superficies d'eau et de végétation. Ces compilations se font en se basant sur les propriétés des bandes spectrales disponibles. En effet, les bandes du moyen-infrarouge (TM-7 et TM-5) servent à départager d'une part les zones humides et les cours d'eau et d'autre part les zones sèches alors que les bandes TM-4 et SPOT-3 distinguent nettement les surfaces d'eau libre de la végétation dense.

De plus, une évaluation préliminaire du matériel image et des essais de cartographie à l'aide de l'appareil Procom-2 par l'expert malien a permis de compléter adéquatement l'analyse des résultats (Samaké, 1989).

4 Résultats et analyse

4.1 Évaluation des images Landsat-TM

Les images Landsat-TM ont servi à mettre en évidence les trois états du fleuve (crue, mi-crue et étiage) et les résultats se présentent sous la forme des composés couleur suivants :

- un composé couleur avec les trois bandes TM-7 (30 m);
- un composé couleur avec les bandes TM-7, TM-4 et TM-2 pour chacun des trois états du fleuve; rappelons que la bande TM-7 démarque la végétation (humidité), la TM-4 localise la végétation chlorophyllienne alors que la TM-2 texture le milieu exondé environnant (fig. 3).

La combinaison des trois bandes spectrales offre un moyen efficace de suivre le comportement de la crue. La résolution spectrale de TM permet non seulement une interprétation visuelle acceptable mais aussi une possibilité d'interprétation automatique. D'ailleurs, les classifications automatiques à partir des données TM nous ont permis d'évaluer les superficies de certains éléments du paysage, comme nous l'indique le tableau I. Dans le même ordre d'idée, la figure 4 indique la superficie de l'étalement du fleuve en fonction du temps. L'ajout sur ce même graphique des relevés de hauteur d'eau permet la comparaison avec la réalité. Du côté pratique, les bandes TM-7 mises au registre se sont avérées suffisantes pour une bonne cartographie des étages de submersion.

4.2 Évaluation des images SPOT

Suite aux traitements des images SPOT multibandes, nous avons pu générer deux composés couleur SPOT-3, SPOT-2 et SPOT-1 aux périodes correspondant à l'étiage et à la crue. La résolution spatiale (20 m) apparaît ici être un avantage appréciable en ce qui concerne l'évaluation de l'occupation du sol. Cette affirmation est renforcée lorsque les images SPOT panchromatiques (10 m) sont en jeu. Par ailleurs, pour mettre en valeur le rôle de données panchromatiques, nous avons créé les composés suivants :

- un composé couleur SPOT-3, SPOT-2 et SPOT-3 réduit à 10 m de résolution;
- un composé couleur SPOT-3, SPOT-2 et SPOT-Panchro.

La bande panchromatique permet de dégager de façon précise le milieu inondé du milieu exondé. Un rehaussement en pseudo-couleurs de cette bande confirme ce fait. Par ailleurs, le traitement unibande est avantageux en ce qui concerne la quantité et la complexité des opérations.

4.3 Comparaison entre les données Landsat et SPOT

Afin de bien comparer les qualités des capteurs TM et HRV en terme de résolution spatiale et face à la délimitation des niveaux de submersion du Niger, les images suivantes ont été produites :

- un composé couleur avec les bandes TM-4, TM-3 et TM-2 pour chacun des états du fleuve (crue, mi-crue et étiage) réduit à 20 m;

Tableau I. Planimétrie automatisée des thèmes sur le bief couvert par les images TM (surfaces en hectares calculées sur la plaine inondable; ajustement de 8% des données de septembre 1984 suite à la présence de nuages; les fonds des mares et marigots sont végétalisés à l'été mais remplis d'eau à la mi-crue)

Thèmes	Dates		
	Crue 18/11/86	Mi-crue 09/09/84	Étiage 07/05/85
Eau libre	23 220	9 035	4 374
Zones humides végétalisées ou non	8 779	2 354	1 145
Végétation dense	3 128	91	440
Végétation aquatique dense	3 128	80	136

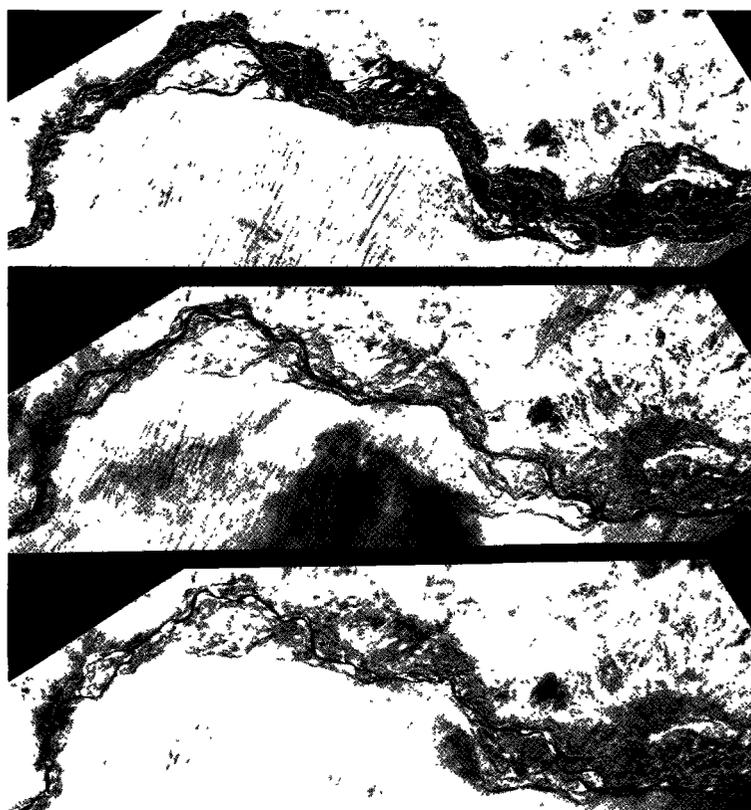


Figure 3. Trois états du fleuve vus par Landsat-TM (TM-7, TM-4, TM-2); en haut : crue, 18-11-86, hauteur d'eau à Tossaye : 443 cm; au centre : mi-crue, 09-09-84, hauteur d'eau à Tossaye : 335 cm; en bas : étiage, 07-05-85, hauteur d'eau à Tossaye : 103 cm

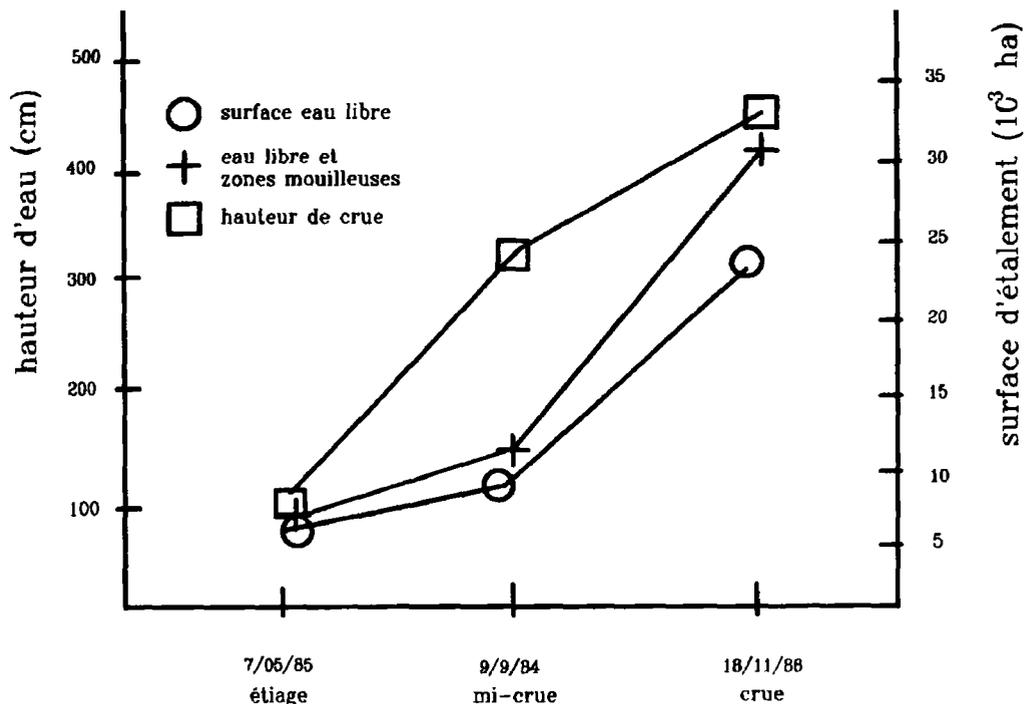


Figure 4. La crue et la submersion dans le temps; les superficies sont calculées à partir de TM-4

- un composé couleur avec les bandes SPOT-3, SPOT-2 et SPOT-1 pour l'état de crue et d'étiage à 20 m.

Ces images sont d'ailleurs regroupées à la figure 5 pour faciliter leur comparaison. Après analyse, il en ressort que les deux types de données sont appropriées pour la cartographie des étages de submersion mais que, par contre, les images TM sont plus adéquates pour le suivi hydrologique des eaux de surface.

5 Conclusion

Une évaluation du potentiel des images NOAA est actuellement en cours. Les traitements visent à localiser temporellement les phases de submersion principales du fleuve Niger sur le bief Bourem-Gao. Rappelons que les données NOAA se distinguent par une basse résolution spatiale, des acquisitions quotidiennes et un faible coût d'achat. Elles pourraient donc être d'une bonne aide quant au suivi dynamique de la morphologie de fleuve.

Les données Landsat-TM et SPOT sont des outils complémentaires à l'identification temporelle des différents états du fleuve Niger au Mali. La résolution spectrale de TM est un atout majeur pour la détection automatique de l'eau et des cultures. Par contre, la forte résolution spatiale des données SPOT panchromatiques aide grandement à une bonne interprétation visuelle et donc à l'identification des objets utiles à l'occupation du sol. Les images SPOT multibandes, quoiqu'aussi efficaces que TM pour la cartographie des étages

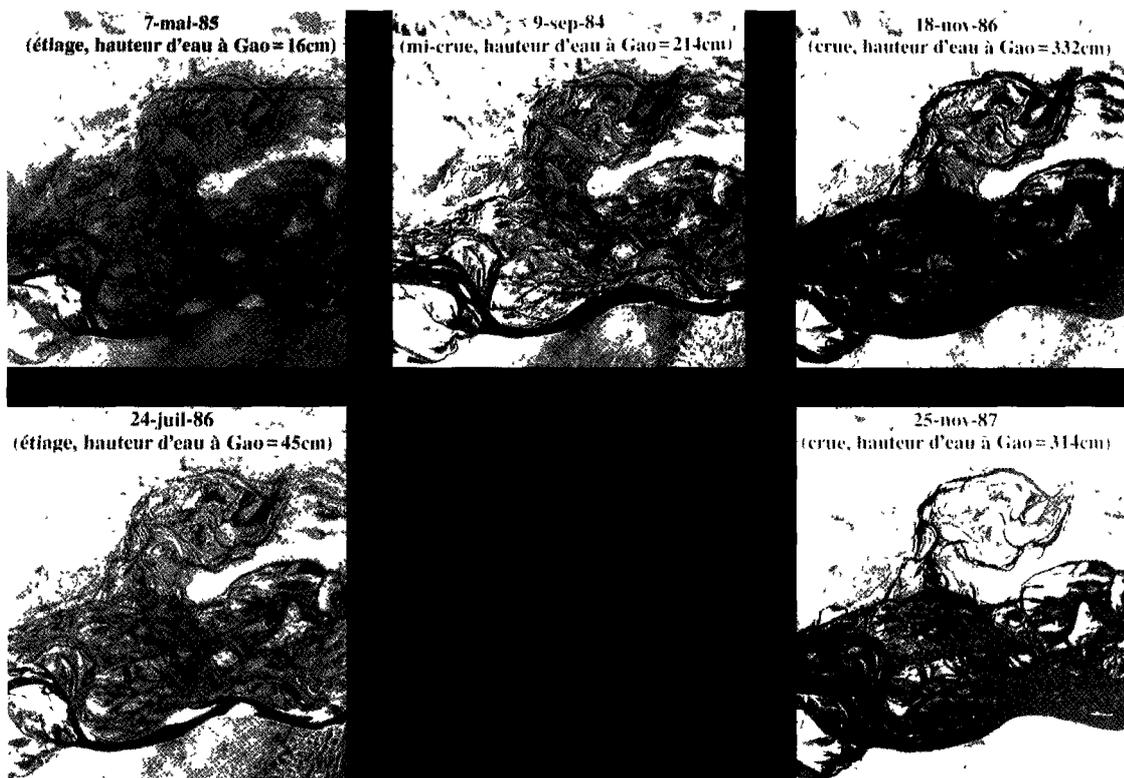


Figure 5. Comparaison TM/SPOT en terme de résolution spatiale; en haut : images TM (bandes 4-3-2) rééchantillonnées à 20 m; en bas : images SPOT (bandes 3-2-1)

de submersion, constituent surtout une alternative date-orbite. Notons que, lorsque la cartographie dérivant des images produites sera complétée, une évaluation plus approfondie pourra être effectuée.

Déjà, à ce stade d'avancement du projet, on peut affirmer que, par un choix judicieux des dates d'acquisition et une utilisation optimale des caractéristiques des bandes spectrales, la télédétection satellitaire peut s'avérer un outil avantageux quant au suivi morphologique du fleuve Niger et à son aménagement agricole.

6 Références

- BERTRAND, R. et G. BOURGEON, 1984. Évaluation du milieu naturel des plaines alluviales de la boucle du Niger (Mali). —*L'agronomie tropicale*, 39-3, p. 199-215.
- GILBERT, P., 1986. Intégration d'informations cartographiques et satellitaires pour l'inventaire des ressources végétales dans un environnement tropical sec. —Thèse de maîtrise, Département des sciences géodésiques et télédétection, Université Laval, Québec, 517 p.
- SAMAKÉ, S., 1989. Perspectives d'utilisation des images satellite dans la planification des aménagements agraires. —Division nationale du génie rural du Mali, Bamako, rapport interne.

Évaluation des images TM et SPOT pour le suivi de l'étalement du fleuve Niger (Mali)

- TAMS/USAID, 1983. Les ressources terrestres au Mali. —Rapport technique pour le compte du Ministère chargé du développement rural au Mali.
- THOMSON, K. P. B., P. GILBERT et G. CLICHE, 1988. Projet-pilote de télédétection au Mali. — Comptes rendus du 6^e congrès de l'Association québécoise de télédétection, du 4 au 6 mai, Sherbrooke, p. 19-23.

26

Inventaire et aménagement des ressources au Sahel, un exemple de transfert de technologie en télédétection

MICHEL YERGEAU*, BERTIN GOZE BÉNIÉ**, CHRISTIAN PRÉVOST***, RÉJEAN SIMARD**, FERDINAND BONN* et Q. HUGH J. GWYN*

**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, boulevard René-Lévesque Ouest, Montréal, Québec, Canada H3B 4P3, téléphone : 514-876-4521, télécopieur : 514-876-9273, télex : 055-61250*

****Centre canadien de télédétection, 1 547, chemin Merivale, Ottawa, Ontario, Canada K1A 0Y7, téléphone : 613-952-2715, télécopieur : 613-952-7353, télex : 053-3737*

Résumé

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 a débuté en 1988. Il vise à définir les moyens susceptibles de favoriser des conditions d'épanouissement du milieu rural sahélien pour une gestion rationnelle des ressources. Trois projets utilisant la télédétection et des systèmes d'information géographique ont été initiés dans trois pays sahéliens, soit :

- l'utilisation des ressources en eau des affluents du fleuve Niger actuellement sous-exploitées au Burkina Faso;
- l'aménagement d'un terroir pastoral au Mali, à partir d'une connaissance constamment mise à jour des conditions qui y prévalent, soit les disponibilités en eau et l'état de la végétation dans les zones de pâturages;
- la stratification d'un territoire au Niger permettant un zonage agro-écologique constituant une base d'échantillonnage pour les statistiques agricoles.

Ce projet se décompose en deux volets : 1) l'application de la télédétection dans un projet de démonstration et, 2) la gestion d'un projet de télédétection.

La première phase (juin 1988 - mai 1989) de ce projet a permis de réaliser des cartes d'occupation des sols au 1:200 000 (Burkina Faso et Mali) et au 1:100 000 (Niger), et des produits photographiques au 1:50 000 illustrant les variations des niveaux de l'eau dans les barrages de Dakiri et de Mani (Burkina Faso), et à l'intérieur du lit majeur du fleuve Niger (Mali et Niger). Outre ces produits livrés, le volet télédétection au Burkina Faso a fait l'objet d'une simulation d'un système d'information géographique appliqué à la répartition des cultures en aval des barrages de Dakiri et de Mani.

1 Introduction

Les sécheresses qui ont affecté le Sahel ces 20 dernières années ne sont pas choses nouvelles; elles s'inscrivent dans l'histoire climatique de cette région. Les famines qui y sont associées ont cependant révélé à l'humanité la fragilité de l'équilibre environnemental en certains points du globe. Ces famines surviennent apparemment en désordre un peu partout, d'où la nécessité d'améliorer le système de surveillance et de gestion des ressources. Dans ce contexte éclaté, la télédétection s'avère un outil performant pour l'acquisition d'information nécessaire à la surveillance et à la gestion des ressources naturelles renouvelables.

L'intérêt scientifique de l'observation par satellites des écosystèmes africains n'est plus à démontrer et a fait l'objet de nombreuses publications (Dubois et Lafrance, 1989; Lambin, 1988; Le Comte *et al.*, 1988; Pons, 1988; Eden et Parry, 1986; Joannes *et al.*, 1986; Courel, 1985). Les satellites d'observation de la Terre ont en effet été fort utiles pour révéler les traumatismes régionaux ou continentaux; les données multitemporelles acquises nous ont en effet informés sur des signes de dégradation de l'environnement dans plusieurs régions du monde. L'intégration de ces informations dans des systèmes de gestion des ressources ne permet pas d'éviter les ruptures des équilibres environnementaux, mais elle donne aux gestionnaires des instruments de planification susceptibles d'orienter les actions à prendre afin de réduire les effets dramatiques des stress environnementaux.

Le Sahel est la région la plus fragile d'un continent qui est lui-même l'un des plus démunis. La précarité de la situation environnementale dans cette région met et remet en évidence l'importance de la maîtrise des ressources en eau comme source d'équilibre socio-écologique et d'autosuffisance alimentaire. La poursuite de ces objectifs commence par une gestion efficace de cette ressource. L'apport de la télédétection à l'inventaire et aux choix stratégiques de sites pour l'aménagement de ces ressources a été souligné par de nombreux projets de démonstration.

L'aspect technique du projet a démarré au début des années 1980 au moment où le Canada a appuyé des activités de gestion et d'assistance aux utilisateurs du Centre régional de télédétection de Ouagadougou (CRTO). À cette époque, les ressources humaines canadiennes affectées au CRTO ont travaillé au développement d'une méthode d'inventaire et de surveillance des ressources en eau au Sahel (Prévost *et al.*, 1981; Prévost et Rochon, 1984). Les travaux ont été poursuivis (Prévost *et al.*, 1987) pour en arriver à une cartographie des sites potentiels d'aménagements hydro-agricoles. Cette phase a fait appel, sur une base manuelle, à l'intégration de données de télédétection et de données auxiliaires : population, cheptel, pluviométrie, types de sol, etc.

Dans le cadre du suivi de la deuxième Conférence des chefs d'État et de gouvernement des pays ayant en commun l'usage du français (Sommet de Québec de 1987), le Centre canadien de télédétection du Ministère de l'énergie, des mines et des ressources du Canada a présenté un projet de formation et de démonstration concernant l'utilisation de la

télédétection pour les petits aménagements énergétiques et agricoles dans trois pays du Sahel : le Burkina Faso, le Mali et le Niger. Accepté, le projet appelé «Télédétection-Aménagement-Sahel» a débuté en 1988 sous la responsabilité du Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL) de l'Université de Sherbrooke (Canada) et de la société Digim/Lavalin de Montréal (Canada). Le Centre canadien de télédétection (CCT) agit à titre de conseiller technique du projet. Le projet est financé sur les fonds multilatéraux confiés pour gestion à l'Agence de coopération culturelle et technique (ACCT).

Le choix des projets de démonstration a tenu compte de l'existence de projets d'aménagement en cours ou en planification dans chacun des pays et qui offraient la possibilité d'y intégrer un volet télédétection et système d'information géographique (Yergeau et Bigras, 1989). Dans le cadre de cette communication, outre le cadre général du projet, nous résumerons les composantes burkinabè et malienne. Le projet nigérien fait l'objet d'une autre communication (Iro *et al.*, 1990).

2 Objectifs du projet

Le projet de formation et de démonstration vise à définir des moyens susceptibles de favoriser des conditions d'épanouissement du milieu rural sahélien par une gestion rationnelle des ressources. Les objectifs des projets burkinabè, malien et nigérien retenus sont :

- l'utilisation des ressources en eau des affluents du fleuve Niger actuellement sous exploitées au Burkina Faso;
- l'aménagement d'un terroir pastoral au Mali, à partir d'une connaissance constamment mise à jour des conditions qui y prévalent, soit les disponibilités en eau et l'état de la végétation dans les zones de pâturages;
- la stratification d'un territoire au Niger permettant un zonage agro-écologique constituant une base d'échantillonnage pour les statistiques agricoles.

L'organigramme de la figure 1 présente les deux volets du projet ainsi que les résultats.

3 Formation

Ce projet de formation et de démonstration se situe au niveau des activités d'appui (formation des ressources humaines) dans le programme canadien d'intervention au Sahel (ACDI, 1989).

3.1 Participants

Le projet a regroupé six stagiaires du Burkina Faso, du Mali et du Niger. Le groupe a été scindé en deux : les spécialistes techniques qui ont participé aux projets de démonstration de la télédétection provenaient de :

- l'Office national des barrages et des aménagements hydro-agricoles, Ministère de l'eau, Burkina Faso;
 - la Direction nationale de la cartographie et de la topographie, Ministère des travaux publics, de la construction et de l'urbanisme, Mali;
 - et de la Direction nationale de la topographie, Ministère des finances, Niger.
- Quant aux gestionnaires, qui ont élaboré trois documents de projet, ils étaient en poste :
- à la Direction des études et de la planification, Ministère de l'eau, Burkina Faso;

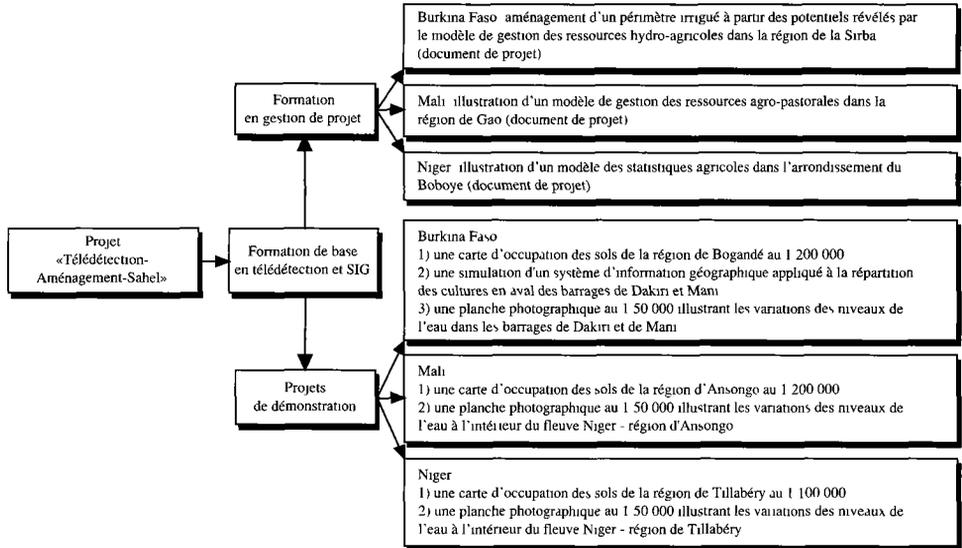


Figure 1. Le projet «Télé-détection-Aménagement-Sahel»

- à la Direction nationale du génie rural, Ministère de l’agriculture, Mali;
- et à la Direction des statistiques de l’agriculture et de l’environnement, Ministère de l’agriculture et de l’environnement, Niger.

3.2 Formation en télédétection et systèmes d’information géographique

3.2.1 Objectifs

Les stagiaires provenant d’horizons académiques différents (économie, génie rural, topographie), deux objectifs ont été retenus :

- 1) donner une formation de base en télédétection et systèmes d’information géographique pour assurer un niveau commun de connaissance relativement à l’acquisition et au traitement des informations;
- 2) faire un cheminement individuel avec chacun des stagiaires en prenant en compte la nature des projets soumis par les États burkinabè, malien et nigérien.

3.2.2 Contenu

Le programme de formation de base d’une durée de huit semaines a couvert les points suivants :

- nature et définition de la télédétection;
- base physique : spectre électromagnétique;
- carte topographique et photographie aérienne;
- signatures spectrales;
- photo-interprétation;
- systèmes d’acquisition et images multibandes;
- thermographie et radar;

- Landsat MSS, Landsat TM, SPOT;
- applications : végétation, utilisation du sol, ressources en eau;
- traitement numérique (images du Sahel);
- systèmes d'information géographique.

3.3 Formation en gestion de projet

3.3.1 Objectifs

La formation en gestion de projet visait quatre objectifs principaux :

1) initier les stagiaires à la gestion de projet, aux techniques d'évaluation, de planification et de contrôle de projet, ainsi qu'à certains outils micro-informatiques nécessaires ou utiles à ce type de gestion;

2) sensibiliser les stagiaires aux étapes du cycle de gestion de projet;

3) rendre les stagiaires aptes à planifier un projet de développement;

4) encadrer les stagiaires dans leur démarche d'élaboration d'un document de projet en télédétection appliquée.

3.3.2 Contenu

Le programme académique a duré quatre semaines. Ses grandes lignes se répartissent en quatre parties, soit les aspects stratégiques de la gestion de projet, l'évaluation de projet, la planification et le contrôle, ainsi que les perspectives : les systèmes experts.

Ponctuée de conférences prononcées par des spécialistes attachés à des divisions de Lavalin et à l'Université de Montréal, le contenu de la formation en milieu industriel incluait :

- les éléments de base de la gestion de projet;
- l'identification des grands facteurs qui constituent l'environnement d'un projet;
- la conception et la planification d'un projet;
- la rédaction des documents de projet;
- la version préliminaire des documents de projet;
- les commentaires sur les documents de projet;
- la finalisation des documents de projet;
- le suivi ou l'évaluation continue d'un projet;
- la version finale des documents de projet.

3.4 Évaluation du volet formation

3.4.1 Télédétection et système d'information géographique

La formation de base en télédétection et système d'information géographique s'est étalée sur huit semaines. Le contenu théorique a été appuyé par des travaux pratiques habituellement utilisés dans le cadre de la formation dispensée au Département de géographie et de télédétection de l'Université de Sherbrooke, sauf concernant les aspects de traitement numérique et de SIG qui ont été appuyés par des exemples sahéliens. Les travaux pratiques basés sur des exemples canadiens ont cependant constitué un léger handicap concernant l'intérêt qui était demandé aux stagiaires. Après les deux ou trois premières semaines, les stagiaires montraient en effet un certain désintéressement. La transition vers les projets de démonstration s'est aussi faite dans des conditions d'impatience étant donné que les données images n'étaient pas encore disponibles après huit semaines de fonctionnement. Une fois ces contraintes surmontées, les stagiaires ont entrepris l'interprétation visuelle des images.

Les résultats de la formation ont pu être appréciés lors des présentations verbales que les stagiaires ont livré lors de l'évaluation du projet par les partenaires sahéliens du projet. Les stagiaires ont en effet présenté un produit de qualité qu'ils ne pouvaient prétendre livrer à leur arrivée au Canada. Les perspectives d'intégration des projets de démonstration (Yergeau, 1989) dans la politique nationale des pays concernés sont principalement une sensibilisation des instances politiques sur les avantages de la télédétection par rapport aux méthodes classiques de travail et l'intégration systématique d'un volet télédétection dans tout nouveau projet d'inventaire des ressources ou d'aménagement du territoire.

Dans un projet similaire, nous recommandons cependant que la formation soit planifiée sur un temps plus long afin de permettre aux stagiaires de mieux assimiler la théorie conjointement avec les travaux pratiques élaborés avec les données des projets de démonstration.

3.4.2 Gestion de projet

Après la formation de base en télédétection et SIG, certains stagiaires ont suivi une formation théorique de quatre semaines en gestion de projet. Cette étape a permis par la suite aux stagiaires d'élaborer des documents de projet dans une collaboration université-industrie. Nous croyons que cette collaboration doit être maintenue dans ce type de projet afin de faire le lien entre les aspects pédagogiques des projets de formation et l'application des concepts dans la réalité. Cette collaboration offre également la possibilité d'un meilleur cheminement entre la conception d'un projet et les étapes de sa réalisation.

4 Projets de démonstration

Forger de meilleurs instruments pour combattre la situation, c'est mettre du côté du Sahel un atout de plus dans sa lutte pour la survie. Le projet de formation et de démonstration concernant l'utilisation de la télédétection pour les petits aménagements énergétiques et agricoles au Sahel n'est qu'une des nombreuses initiatives qui conditionnent le futur du Sahel mais, tout apport, si modeste soit-il, apporte une contribution précieuse aux efforts de redressement qui se dessinent dans la région (ACDI, 1989).

En accord avec les autorités nationales du Burkina Faso, du Mali et du Niger, trois projets de démonstration ont été retenus (Yergeau et Bigras, 1989). Ces trois projets sont localisés dans le bassin du fleuve Niger, plus précisément dans la région du Liptako-Gourma. Le projet burkinabè, «Aménagement hydro-agricole», a trait aux bassins de la Sirba et de la Faga, affluents du versant droit du fleuve Niger. Le projet malien, «Aménagement des terroirs pastoraux», se situe dans la région d'Ansongo. Le projet nigérien, «Statistiques agricoles et zonage agro-écologique», a pour site la région de Tillabéry (Iro *et al.*, 1990).

4.1 Burkina Faso

4.1.1 Introduction

La stratégie de développement de l'État burkinabè vise à assurer une meilleure intégration des secteurs d'activité économique par la recherche d'un équilibre spatial de ces activités. Cet objectif de la stratégie de développement se traduit dans les faits par une lutte contre la

désertification. Pour ce faire, l'État burkinabè vise à faire de l'agriculture le moteur du développement économique par l'orientation prioritaire des investissements dans ce secteur.

Cependant, certaines composantes du milieu biophysique, l'insuffisance et la mauvaise répartition des pluies dans l'espace et dans le temps, et la désertification sont des contraintes au développement de cette agriculture. Face à ces facteurs défavorables, le Ministère de l'eau s'est vu confier la mission de conduire la politique nationale de l'eau, principalement de protéger et de restaurer l'environnement en luttant contre l'action agressive de l'eau de façon qu'elle ne devienne pas un facteur limitatif au développement socio-économique et aussi, d'accorder une place de choix à l'hydraulique agricole.

Le projet «Télédétection-Aménagement-Sahel» s'inscrit dans cette problématique définie par les responsables burkinabè du Ministère de l'eau qui ont un besoin énorme de technologie appropriée pouvant leur permettre de connaître le potentiel hydro-agricole de la Sirba, ainsi que les meilleurs sites en vue d'y réaliser de manière planifiée des ouvrages de retenue et d'y aménager des périmètres irrigués.

La zone se situe dans la province de la Gnagna au centre-est du Burkina Faso. Elle couvre une partie du bassin de la Faga et une partie du bassin de la Sirba. La province subit un climat soudano-sahélien. Les précipitations moyennes varient de 605 mm à 875 mm tandis que les décennales sèches vont de 425 mm à 625 mm. Les sols minéraux bruts (lithosols sur roches diverses ou sur cuirasses), les sols ferrugineux tropicaux et les sols hydromorphes (c'est le domaine des zones rizicoles ou des galeries arborées) prédominent. Le dernier recensement de 1985 estime la population de la province à 230 000 habitants répartis sur 224 villages. Avec sa superficie de 8 640 km², la province a une densité de 27 hab./km².

La province possède des potentialités agricoles tant du point de vue des cultures pluviales que des cultures irriguées. Cependant, les moyens de production rudimentaires et le manque d'équipement pour la maîtrise de l'eau font que la province demeure tributaire des caprices des précipitations. En effet, la province ne compte que trois principaux périmètres irrigués : Dakiri, Mani et Bilanga-Yasiga. Dans l'ensemble, la province de la Gnagna est aussi une zone favorable à l'élevage, mais le facteur limitatif est l'insuffisance de points d'eau bien répartis sur le territoire.

4.1.2 Volet télédétection et système d'information géographique

a) Données disponibles

Les données disponibles sont présentées au tableau I dans la colonne Burkina Faso.

b) Méthode

La figure 2 présente la méthode employée. Les cartes topographiques existantes au 1:200 000 correspondant au site d'étude ont été numérisées. Les thèmes numériques résultants (réseau routier, réseau hydrographique, occupation du sol) ont été tracés automatiquement sur papier. Ces tracés ont ensuite été imprimés sur acétate pour faciliter leur mise à jour par télédétection.

Les étapes importantes de la phase de traitement des images sont détaillées à la figure 3. Pour le traitement de l'image SPOT, les trois bandes spectrales ont été utilisées. Quant aux données Landsat, les bandes TM2, TM4 et TM7 ont été sélectionnées pour mieux analyser les thèmes d'intérêt de cette étude : l'eau, la végétation et le sol. Les cartes topographiques au 1:200 000 ont permis de redresser les images dans le système de référence : la projection MTU. Pour mettre en relief les thèmes étudiés en vue de faciliter leur interprétation, toutes ces bandes ont subi une amélioration du contraste d'intensité.

Pour l'interprétation cartographique, des compositions fausses couleurs des bandes rehaussées ont permis d'obtenir des planches photographiques sur papier couleur au 1:50 000 (SPOT) et au 1:200 000 (Landsat). Les cartes numérisées et les planches photographiques

Tableau I. Données disponibles dans le cadre du projet «Télédétection-Aménagement-Sahel»

Types de données	Burkina Faso	Mali	Niger
Données satellitaires			
Landsat TM	3 images	3 images	2 images
SPOT	1 image	1 image	1 image
Données auxiliaires			
Cartes topographiques	1:200 000	1:200 000	1:200 000 1:50 000
Photo-mosaïques		1:50 000	
Cartes pédologiques	1:50 000		
Zonages agro-écologiques		x	
Cartes géologiques	1:1 000 000 1:200 000	1:500 000	
Cartes isomagnétiques	1:50 000		
Cartes d'occupation des sols			1:100 000
Cartes des unités physiographiques			1:100 000
Statistiques agricoles et pastorales	x		
Données démographiques	x		
Puits et forages	x		
Inventaires des points d'eau		x	
Données climatiques	x	x	

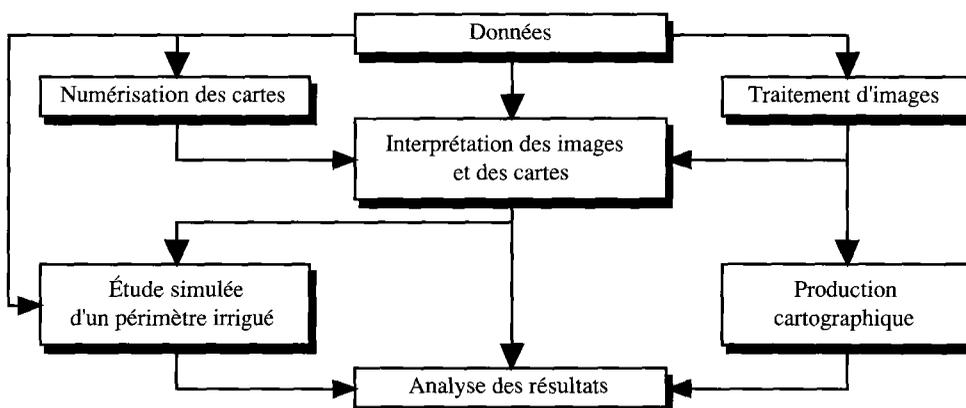


Figure 2. Méthode générale employée (Burkina Faso)

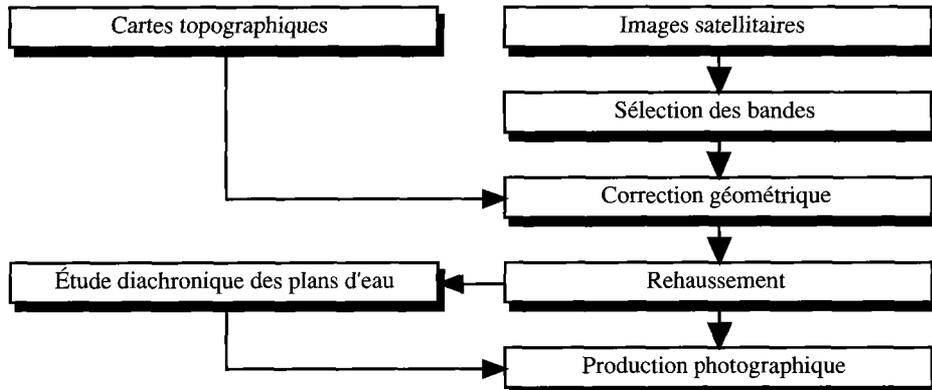


Figure 3. Étapes importantes de la phase de traitement d'images

interprétées (à l'échelle de 1:200 000) ont permis de produire une carte d'occupation du sol à la même échelle par des procédés cartographiques conventionnels.

Parallèlement à cette dernière opération, les bandes TM4 et HRV3 (proche-infrarouge), caractérisées par une absorption par l'eau, ont été utilisées pour créer des thèmes «eau» en masquant le sol par une technique de seuillage des niveaux de gris (Bénié, 1982). Cette classification binaire (eau, non-eau), faite pour toutes les dates, montre l'évolution des surfaces d'eau par la superposition des thèmes «eau» (un par date). Des planches photographiques ont été produites à partir des résultats obtenus.

c) Résultats

Une carte d'occupation des sols à l'échelle de 1:200 000 a été produite (fig. coul. 26-4). Cette carte illustre les différentes classes de l'occupation des sols de la région de Bogandé, avec un accent particulier sur les barrages et mares. Quatre types d'occupation des sols ont été identifiés visuellement sur les images : la savane (beige), les galeries arborées (vert), les zones de cultures pluviales (vert pâle) et les zones de cultures irriguées (vert foncé). Les éléments reliés à l'eau sont représentés en bleu dont les zones inondables en traits discontinus.

L'étude diachronique des points d'eau (fig. coul. 26-5) est basée sur la superposition de plusieurs images prises à des dates différentes (11/11/86, 03/03/87 et 21/12/87). Ce processus met en évidence l'évolution des surfaces d'eau au cours d'une saison sèche (en rouge, le niveau des eaux en novembre 1986; en jaune, le niveau en décembre 1987; et en bleu, le niveau en mars 1987). Le niveau des eaux en mars 1987 (bleu) indique cependant une importante variation morphologique des plans d'eau, et donne un aperçu de la dynamique d'un plan d'eau sahélien. Cette période de l'année présente en effet des surfaces en eau qui ont subi une évaporation d'environ 1 500 - 1 600 mm durant les 7 mois de la saison sèche. Les périmètres irrigués de Dakiri et de Mani ont été mis en évidence.

L'un des objectifs de ce projet était d'intégrer la télédétection et un système d'information géographique (SIG) en vue de faire une gestion rationnelle des points d'eau et des périmètres irrigués. Compte tenu de la nature et des échelles des données disponibles, l'expérience n'a pu être faite qu'au niveau d'un exercice de simulation. Cette simulation avait pour but de définir une répartition des cultures en aval des barrages de Mani et de Dakiri, en pondérant les rendements des cultures selon les sols par les besoins en eau de chaque type de culture.

Les quinze classes de sol (fig. coul. 26-6) de la carte pédologique Mani-Dakiri au 1:50 000 ont été numérisées à l'aide du système SPANS. Une matrice des types de rendement a été

formulée selon les informations de l'opérateur burkinabè. Les valeurs des types de rendement des sols ont été attribuées seulement pour des fins de simulation. Un indice de rendement par culture a donc été constitué en analysant les types de rendement cultural et la demande en eau de chaque culture. Compte tenu du fait que le Sahel est caractérisé par une insuffisance notoire en eau, le modèle de gestion des terres a été basé sur l'utilisation minimale de cette ressource. Des rendements en fonction du sol et des besoins en eau du mil, du maïs, du riz, et des cultures maraîchères ont été cartographiés en quatre classes : excellent, bon, moyen et médiocre. Les cultures optimales (huit classes) sont illustrées à la figure couleur 27-7 : quatre classes de rendement excellent (maïs, coton, cultures maraîchères et riz), une classe de bon rendement (maïs), deux classes de rendement moyen (maïs, et cultures maraîchères) et une classe regroupant les zones impropres à l'agriculture.

En disposant de données de terrain d'échelle comparable et de données socio-économiques adéquates, des modèles empiriques valables pourraient être développés pour la gestion d'un périmètre irrigué.

4.1.3 Volet gestion de projet

Dans le cadre de la formation en gestion de projet, un document de projet a été réalisé. Il porte sur l'aménagement d'un périmètre irrigué à partir des potentiels révélés par le modèle de gestion des ressources hydro-agricoles généré par télédétection et système d'information géographique dans la région de la Sirba (Burkina Faso). Il traite aussi d'une amorce de transfert de cette technologie. Ce document a été présenté à des bailleurs de fonds pour considérations.

En bref, sept extraits ont été identifiés : analyse de besoins et plan d'opération, développement et implantation des systèmes de traitement d'images et d'information géographique, formation en Afrique et au Canada, projets de démonstration (banque de données, cartes par télédétection et exploitation du SIG), aménagement et mise en valeur, assistance technique et diffusion des résultats.

4.2 Mali

4.2.1 Introduction

Basé en partie sur le programme malien de lutte contre la désertification (octobre 1985), le Plan quinquennal de développement économique et social 1987-1991 du Mali identifie parmi les entraves à son développement la contrainte climatique qui apparaît comme la plus importante et la moins prévisible. La priorité accordée à la lutte contre la sécheresse et la désertification traduit la conviction du pays que cette lutte est indispensable et possible :

- indispensable car le Mali étant un pays agricole, son avenir à long terme est fondamentalement dépendant de la préservation de ses potentialités agricoles;
- possible car, si la pluviosité ne peut être modifiée ni même prévue, les interventions et les comportements humains peuvent être changés dans le sens d'une exploitation meilleure et plus rationnelle des ressources.

Dans ce contexte où les ressources mobilisables sont très limitées, la maîtrise de l'eau constitue un préalable à la lutte contre la désertification. La sensibilisation, l'animation et l'organisation des communautés villageoises s'articulent donc autour du problème immédiat de la maîtrise de l'eau, et ultimement de l'aménagement rationnel des terroirs.

Le projet «Télédétection-Aménagement-Sahel» s'appuie sur le projet national «Mali Nord-Est». Pour atteindre ses objectifs, ce projet malien préconise des études

complémentaires dont des inventaires des formations pâturables et l'établissement de cartes d'occupation des sols dans la vallée du fleuve Niger.

La région d'étude est centrée sur la ville d'Ansongo. Cette région subit un climat sahélien; la pluviométrie moyenne y est de 300 mm. La région d'étude présente plusieurs types de sols de répartition très inégale. Ce sont principalement les sols brun rouge subarides composés de matériaux limoneux fins, les sols minéraux d'apport éolien (dunes mortes), les surfaces de déflation éolienne, les sols à pseudogley (terrains hydromorphes faiblement ou non inondés), etc. La végétation est typiquement sahélienne et les formations herbacées et ligneuses se rencontrent sur les sites les plus favorables, c'est-à-dire dans les dépressions interdunaires et les couloirs de drainage. Drainée par les eaux du fleuve Niger qui la traverse du nord-ouest au sud-est, la zone du projet regorge d'une multitude de mares temporaires. Le lit majeur du fleuve à cet endroit a une largeur moyenne de quatre kilomètres.

4.2.2 Volet télédétection

a) Données disponibles

Les données disponibles sont présentées au tableau I dans la colonne Mali.

b) Méthode

La figure 8 présente la méthode générale employée. La carte topographique existante au 1:200 000 a été numérisée. Les thèmes numériques résultants (réseau routier, réseau hydrographique, occupation du sol axée sur les pâturages) ont été tracés automatiquement sur papier. Ces tracés ont ensuite été imprimés sur acétate pour faciliter leur mise à jour par télédétection (superposition des données).

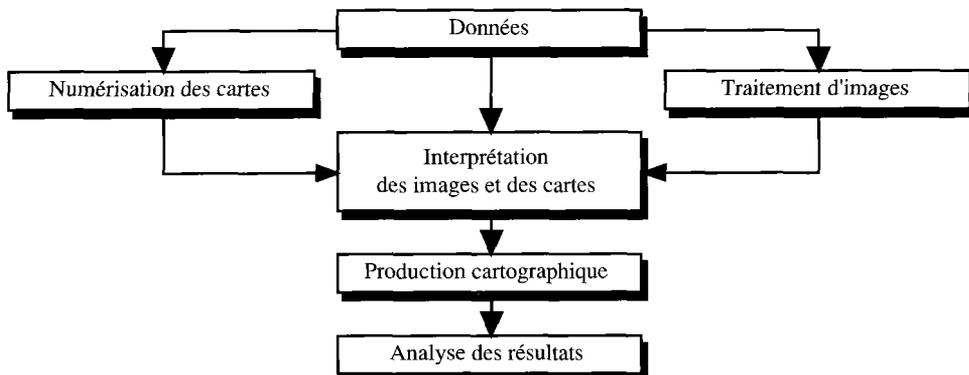


Figure 8. Méthode générale employée (Mali)

Les étapes du traitement des images sont présentées à la figure 3. La carte topographique numérisée et les planches photographiques interprétées (à l'échelle de 1:200 000) ont permis de produire une carte d'occupation du sol à la même échelle par des procédés cartographiques conventionnels.

c) Résultats

Pour l'interprétation visuelle des images SPOT et Landsat TM, une classification de la végétation basée sur les types de sol a été adoptée. La cartographie à l'échelle de 1:200 000 de l'occupation des sols en date du 13 décembre 1986 (image Landsat TM) met en évidence (fig. coul. 26-9) les pâturages verts associés aux zones dunaires (vert), la savane (beige), les rizières aménagées () et les zones inondables (traits discontinus bleus).

Une classification binaire (eau, non-eau) appliquée à des images du 21 novembre 1984, du 13 décembre 1986 et du 3 mars 1987 a été reproduite par procédés photographiques (fig. coul. 26-10). Le niveau des eaux au 3 mars 1987 (bleu) indique un stade de décrue avancé; le niveau en novembre 1984 (jaune + rouge) correspond quant à lui à la période de la crue maximale. Le niveau en décembre 1986 (jaune + vert) correspond quant à lui à un stade intermédiaire. Le niveau de décembre 1986 illustre aussi un déplacement des masses d'eau selon les années; en effet, les surfaces représentées en vert étaient inondées en décembre 1986 mais ne l'étaient pas en novembre 1984.

4.2.3 Volet gestion de projet

Un document de projet portant sur l'illustration d'un modèle de gestion des ressources agropastorales, produit par télédétection et système d'information géographique dans la région de Gao (Mali), a été réalisé. Ce document suggère du même coup une amorce de transfert de cette technologie. Ce document a aussi été présenté à des bailleurs de fonds pour considérations.

En bref, six extrants ont été identifiés : analyse de besoins et plan d'opération, développement et implantation d'un système de traitement d'images et d'un système d'information géographique, formation en Afrique et au Canada, projet de démonstration, assistance technique et diffusion des résultats.

5 Conclusion et recommandations

Les stagiaires ont donc reçu une formation théorique et pratique en télédétection, systèmes d'information géographique et gestion de projet. Selon leurs domaines d'orientation, ils ont produit deux documents de projet concernant l'aménagement d'un périmètre irrigué à partir des potentiels révélés par un modèle de gestion des ressources hydro-agricoles dans la région de la Sirba (Burkina Faso), et la définition d'un modèle de gestion des ressources agropastorales dans la région de Gao (Mali); ils ont aussi élaboré deux cartes d'occupation des sols à l'échelle du 1:200 000.

L'état d'avancement des travaux de formation et de démonstration laisse présager une possibilité de suivi technique centré sur l'exploitation d'un système d'information géographique adapté aux besoins de chaque partenaire.

Ce genre de projet devrait être mené pour d'autres pays membres de l'Agence de coopération culturelle et technique (ACCT). La formation, dans un projet similaire, doit être planifiée sur un temps plus long qui permet aux stagiaires de mieux assimiler la théorie conjointement avec des travaux pratiques élaborés avec les données du projet de démonstration. La collaboration université - industrie doit aussi être maintenue dans ce type de projet afin de faire le lien entre les aspects pédagogiques des programmes de formation et l'application des concepts dans la réalité. Cette collaboration offre également la possibilité d'un meilleur cheminement entre la conception d'un projet et les étapes de sa réalisation. Enfin, une collaboration entre pays bailleurs de fonds et l'ACCT est nécessaire pour assurer l'intégration des acquis de l'utilisation de la télédétection dans les projets majeurs de développement.

Le suivi des projets de démonstration initiés dans ce projet devrait être orienté vers l'intégration rationnelle de la télédétection et des systèmes d'information géographique dans les projets de développement du Burkina Faso, du Mali et du Niger. Ce suivi devrait inclure a) l'acquisition et le traitement de données satellitaires supplémentaires; b) l'achat d'équipement optique de type Procom (Turner et Stafford, 1987) facilitant l'interprétation et

la cartographie des données satellitaires; c) la cueillette de données de terrain en relation avec l'imagerie; et d) la réalisation d'un système d'information géographique.

6 Références

- ACDI, 1989. Le Sahel. Vers un nouvel équilibre. —Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, 34 p.
- BÉNIÉ, G. B., 1982. Étude de quelques applications de la télédétection à la gestion des eaux au Québec. —Thèse de M. Sc., Université Laval, Québec, 126 p.
- COUREL, M. F., 1985. Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. —Thèse de doctorat d'État, Université Paris I, 407 p.
- DUBOIS, J.-M. et P. LAFRANCE (réd.), 1989. *Télédétection en francophonie : bilans régionaux et thématiques*. —Actes des Premières journées scientifiques du réseau thématique de télédétection de l'UREF (Sherbrooke), Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, 123 p.
- EDEN, M. J. et J. T. PARRY (éd.), 1986. Remote sensing and tropical land management. —Commonwealth Geographical Bureau, Wiley, London, 365 p.
- IRO, A., M. YERGEAU et G. B. BÉNIÉ, 1990. Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole au Sahel. —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. 121-127.
- JOANNES, H., J. PARNOT, F. RANTRUA et N. A. SOW, 1986. Possibilité d'utilisation de la télédétection dans le domaine de l'eau en Afrique. —Série Hydrologie, Comité interafricain d'études hydrauliques, Ouagadougou, 141 p.
- LAMBIN, E., 1988. Apport de la télédétection 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.
- LE COMTE, D. M., F. N. KOGAN, C. A. STEINBORN et L. LAMBERT, 1988. Assessment of crop conditions in Africa. —NOAA Technical Memorandum, NESDIS AISC 13, Washington, 66 p.
- PONS, R., 1988. La télédétection satellitaire et le Sahel. —SAHEL D(88)313, Club du Sahel, Paris, 149 p.
- PRÉVOST, C. et G. ROCHON, 1984. Application de la télédétection par satellite à l'inventaire des ressources en eau au Sahel. —4^e Congrès de l'Association québécoise de télédétection et 8^e Symposium canadien de télédétection, Montréal, p. 309-319.
- PRÉVOST, C., M. YERGEAU et R. TOÉ, 1981. Suivi diachronique des plans d'eau par imagerie satellite, région de Pissila, Haute Volta. —Centre régional de télédétection de Ouagadougou, Ouagadougou, 35 p.
- PRÉVOST, C., M. YERGEAU, H. VICKERS, D. BERTHELOT, A. GOSSELIN et J. L. MARTEL, 1987. Applied Data Integration for Water Resources Management in the Sahel. —Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 13, n° 2, p. 75-84
- TURNER, A. M. et D. R. STAFFORD, 1987. Operational revision of national topographic maps in Canada using Landsat images. —ITC Journal, 1987-2, p. 123-128
- YERGEAU, M. (éd.), 1989. La télédétection au service de la gestion des ressources naturelles et de la planification des micro-réalisations. —Compte rendu d'un séminaire régional, Agence de coopération culturelle et technique et CARTEL, Niamey, 117 p.
- YERGEAU, M. et P. BIGRAS, 1989. La télédétection, une source d'information pour la gestion de l'eau au Sahel. —CARTEL, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 16 p.

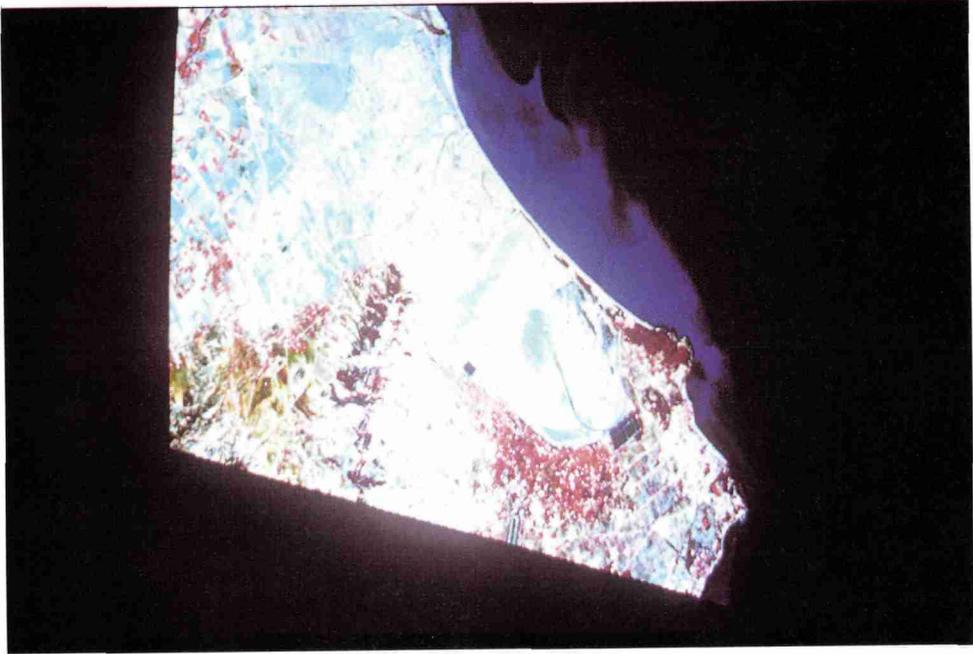


Figure 3-2. Image SPOT-XS 65-276 du 9 septembre 1987 (région de Tunis)

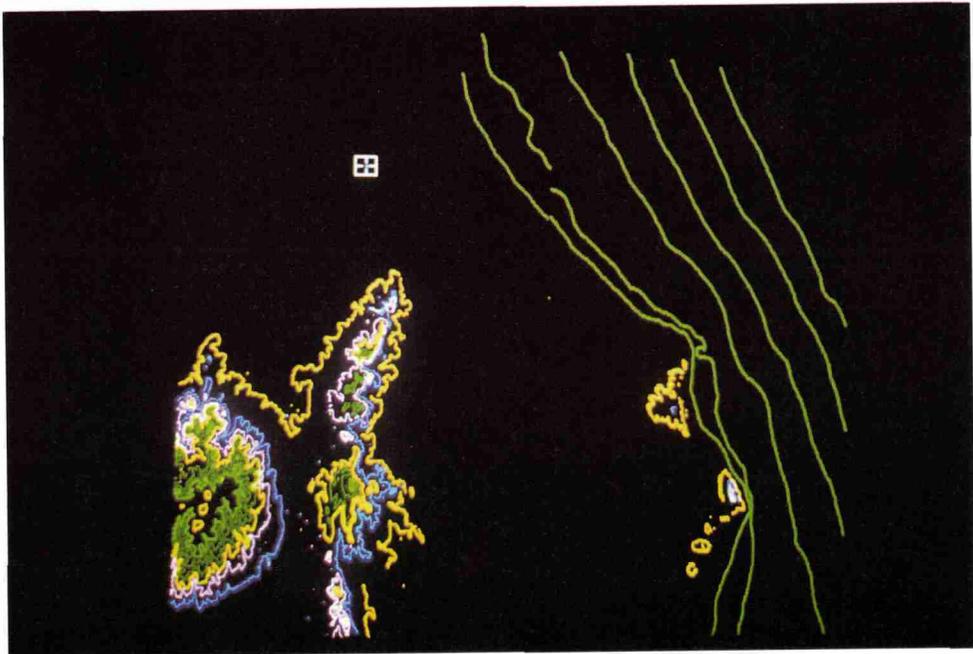


Figure 3-3. Topographie numérisée de la région de Tunis

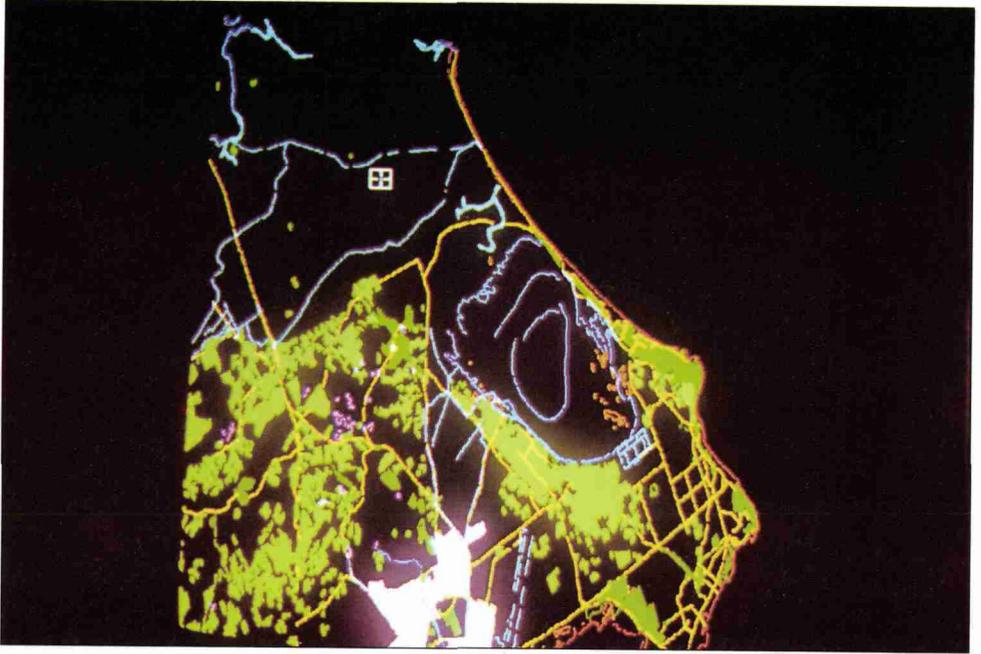


Figure 3-4. Occupation du sol de la région de Tunis numérisée

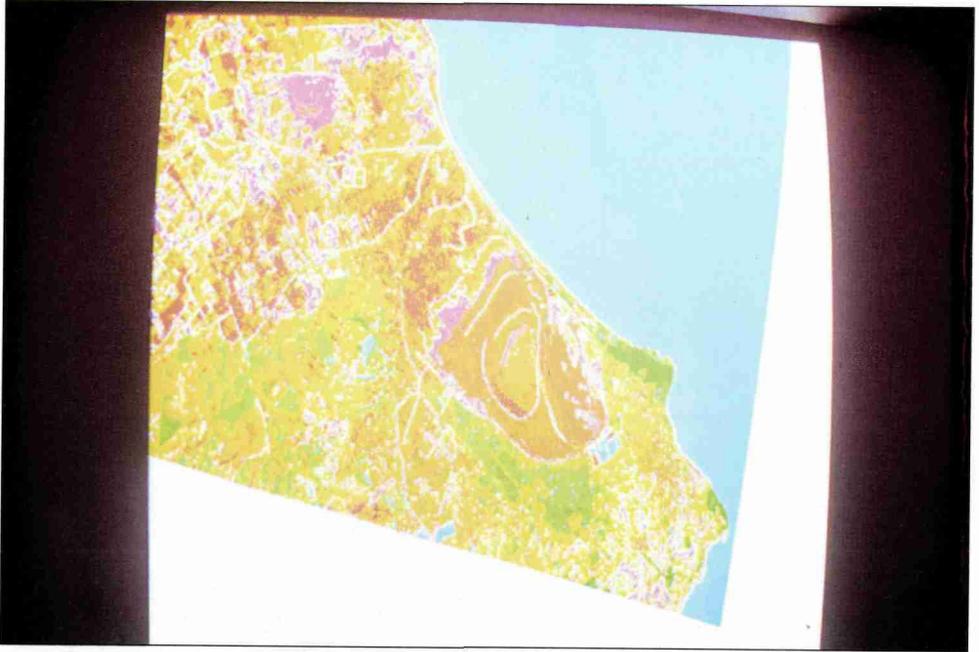


Figure 3-6. Classification multisources de la région de Tunis

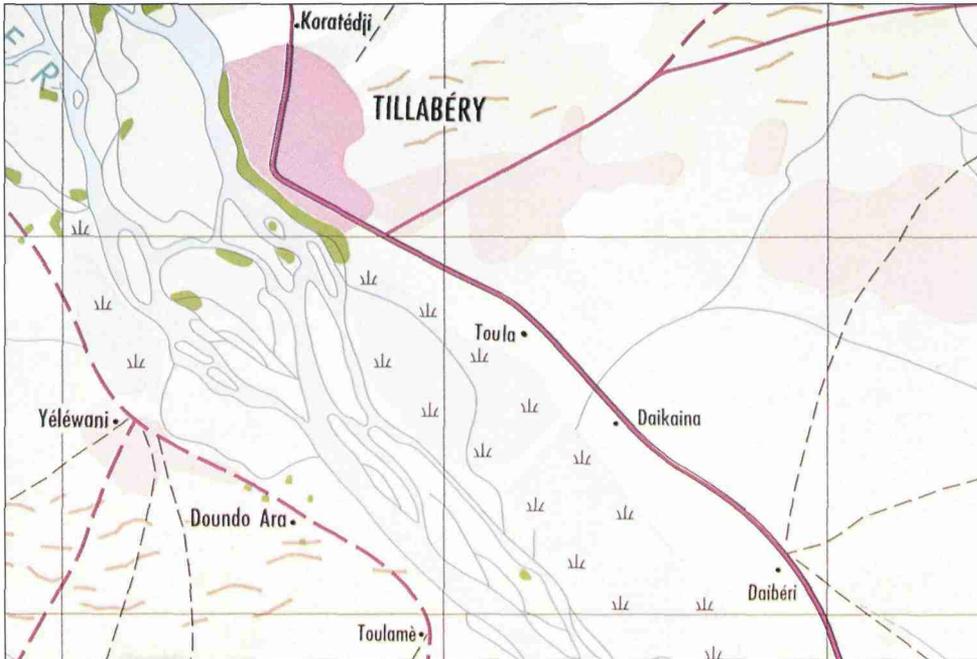


Figure 12-3. Carte d'occupation des sols au 1:100 000, région de Tillabéry, Niger (les rizières aménagées en bordure du fleuve Niger)

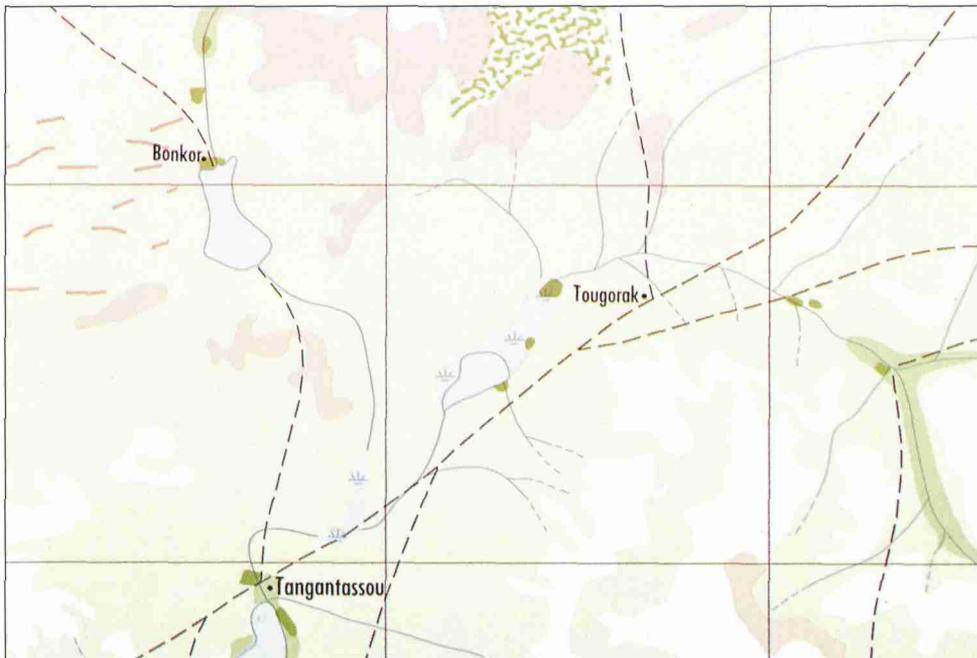


Figure 12-4. Carte d'occupation des sols au 1:100 000, région de Tillabéry, Niger (les sites de cultures de contre-saison qui occupent les bas-fonds durant la saison sèche)

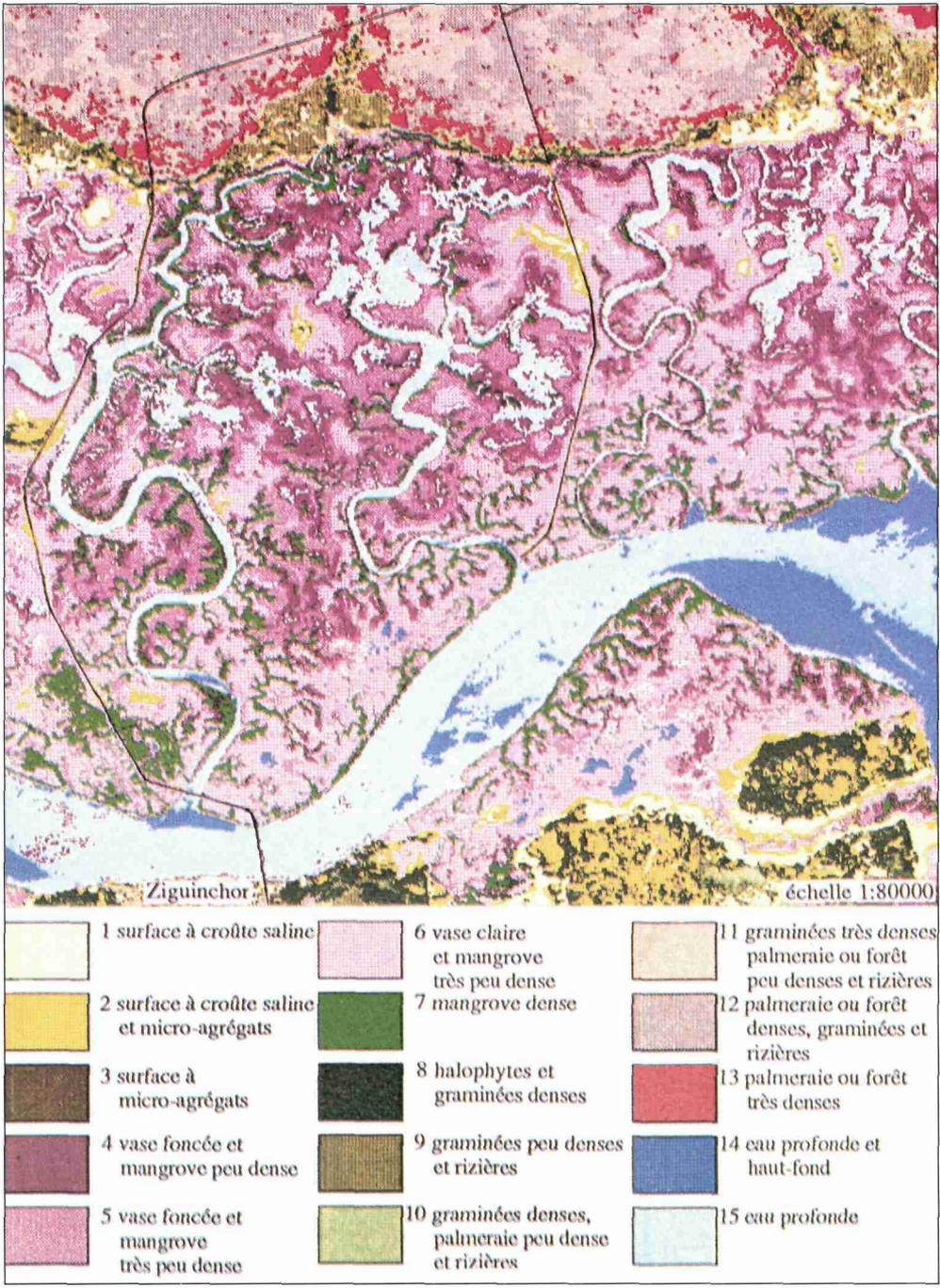


Figure 16-3. Carte des états de surface (exemple de Ziguinchor, Sénégal)

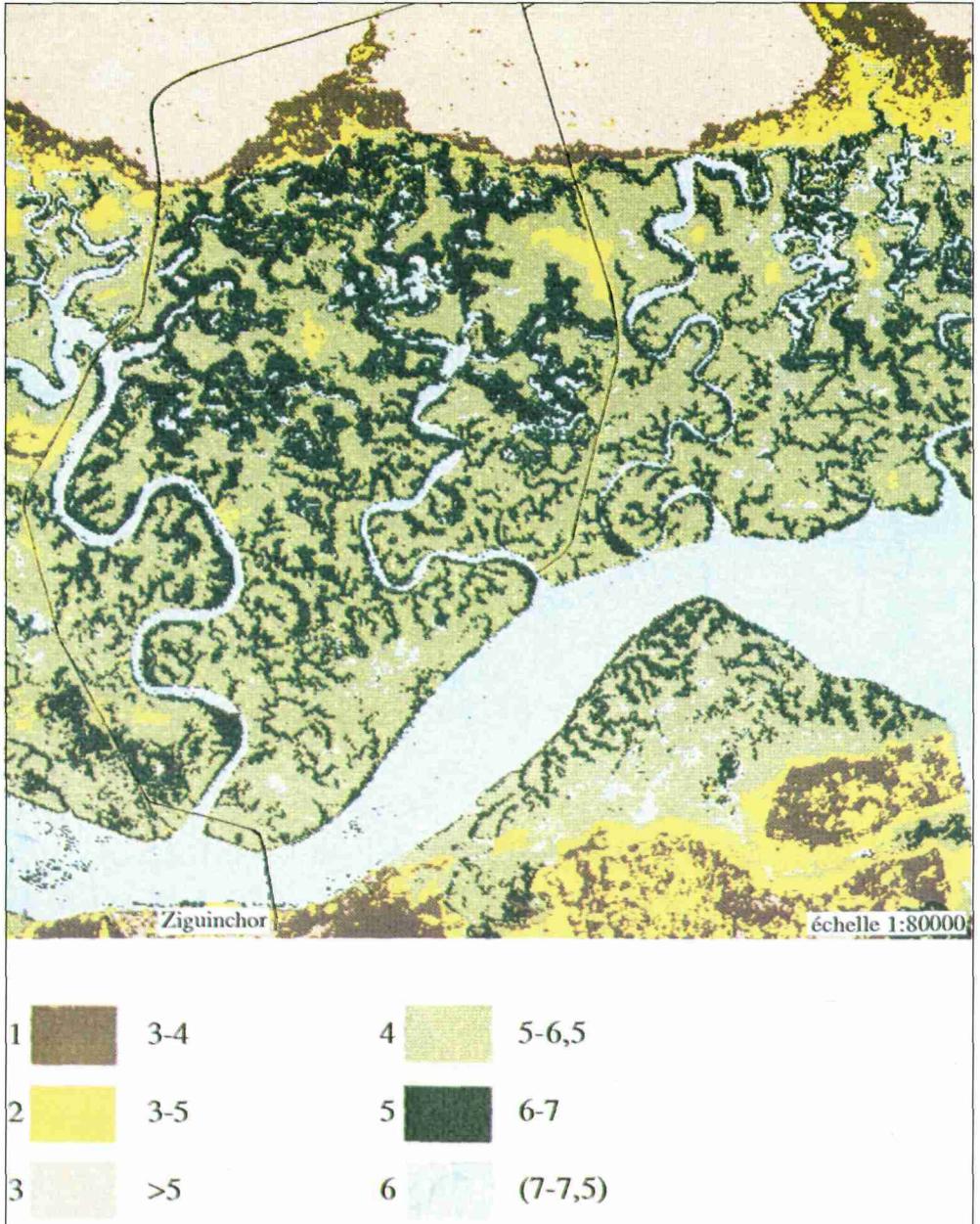


Figure 16-4. Carte du pH de l'horizon de surface (exemple au nord de Ziguinchor, Sénégal)

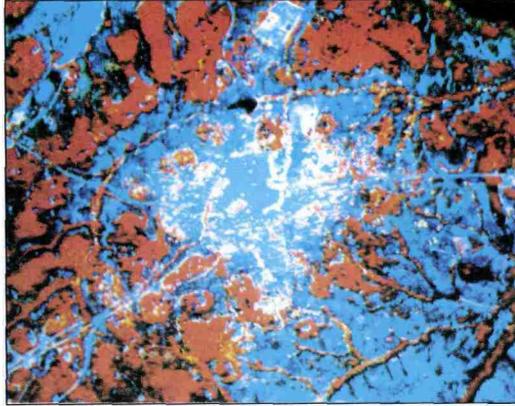


Figure 17-2. Composition colorée de la fenêtre de Toumodi (Côte d'Ivoire)

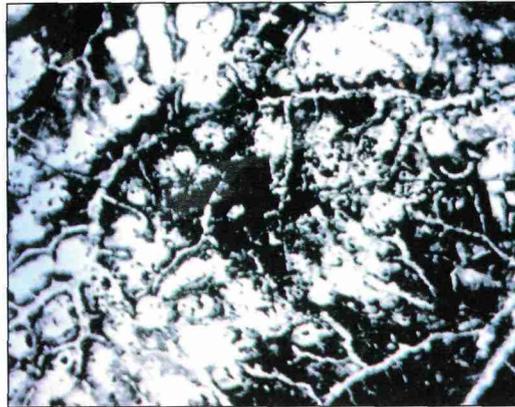


Figure 17-3. Indice de végétation de la fenêtre de Toumodi (Côte d'Ivoire)

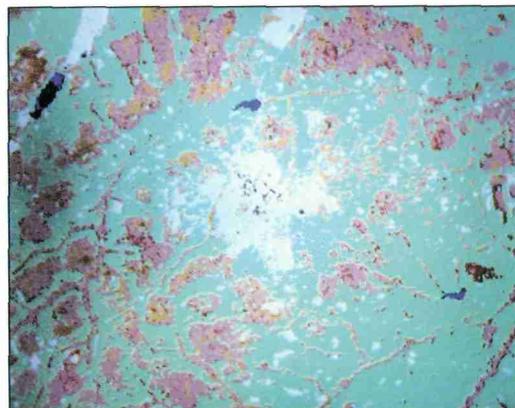


Figure 17-4. Classification de la fenêtre de Toumodi (Côte d'Ivoire)



Figure 17-5. Forêt dégradée dans le «V Baoulé» (Côte d'Ivoire)



Figure 17-6. Savane à *Borassus arthiopum* avec au premier plan une savane herbeuse dans le «V Baoulé» (Côte d'Ivoire)

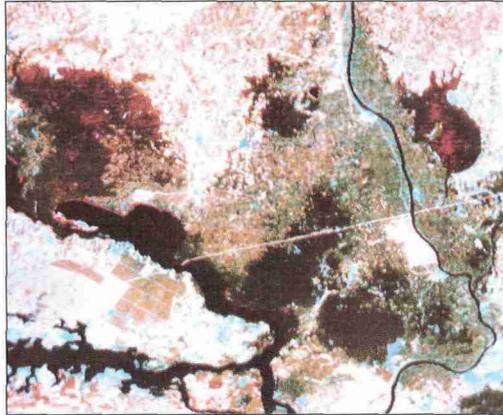


Figure 18-2. Vue d'ensemble du milieu d'étude (composition colorée TM 4-7-3) (région de Bingerville, Bassam et Ono, Côte d'Ivoire)



Figure 18-3. Vue d'ensemble du milieu d'étude (image classée) (région de Bingerville, Bassam et Ono, Côte d'Ivoire)



Figure 18-4. Vue d'ensemble du milieu d'étude (indice de végétation) (région de Bingerville, Bassam et Ono, Côte d'Ivoire)

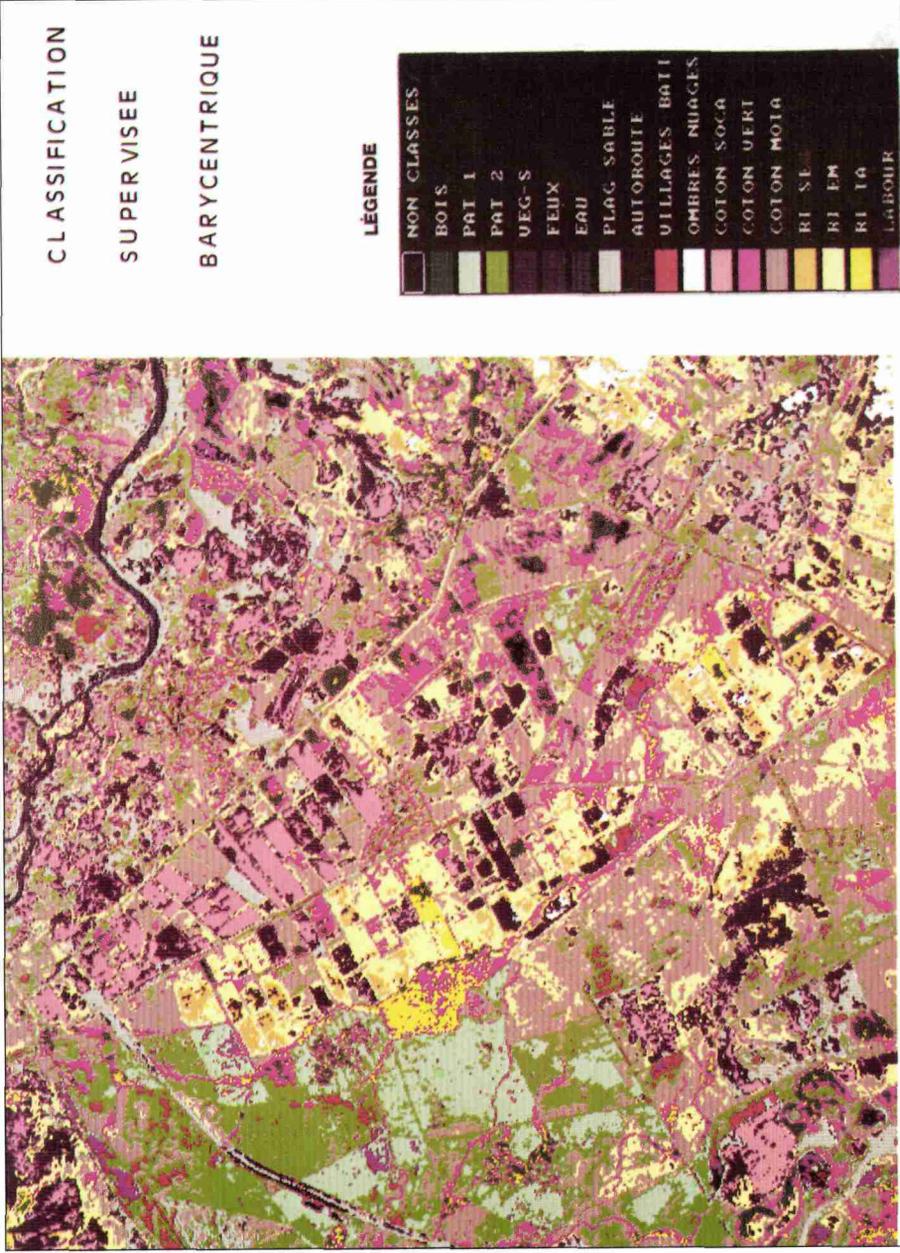


Figure 20-2. Périmètre irrigué «Sistema Rio Bocono», Venezuela (classification barycentrique effectuée en utilisant les canaux XS1, XS2, XS3, IV et IB)

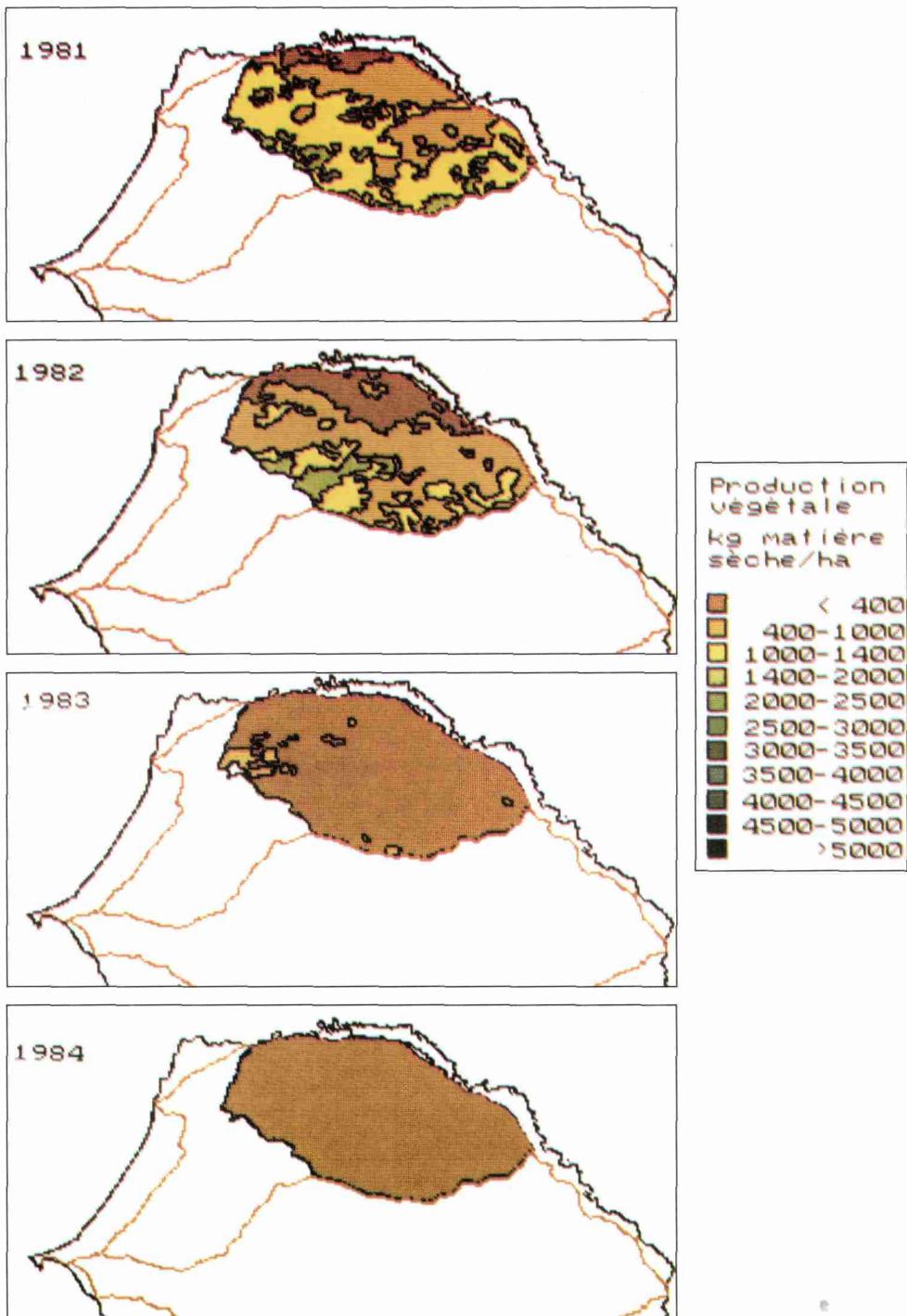


Figure 22-3 (partie 1). Évolution de la production végétale estimée entre 1981 et 1989 au Sénégal

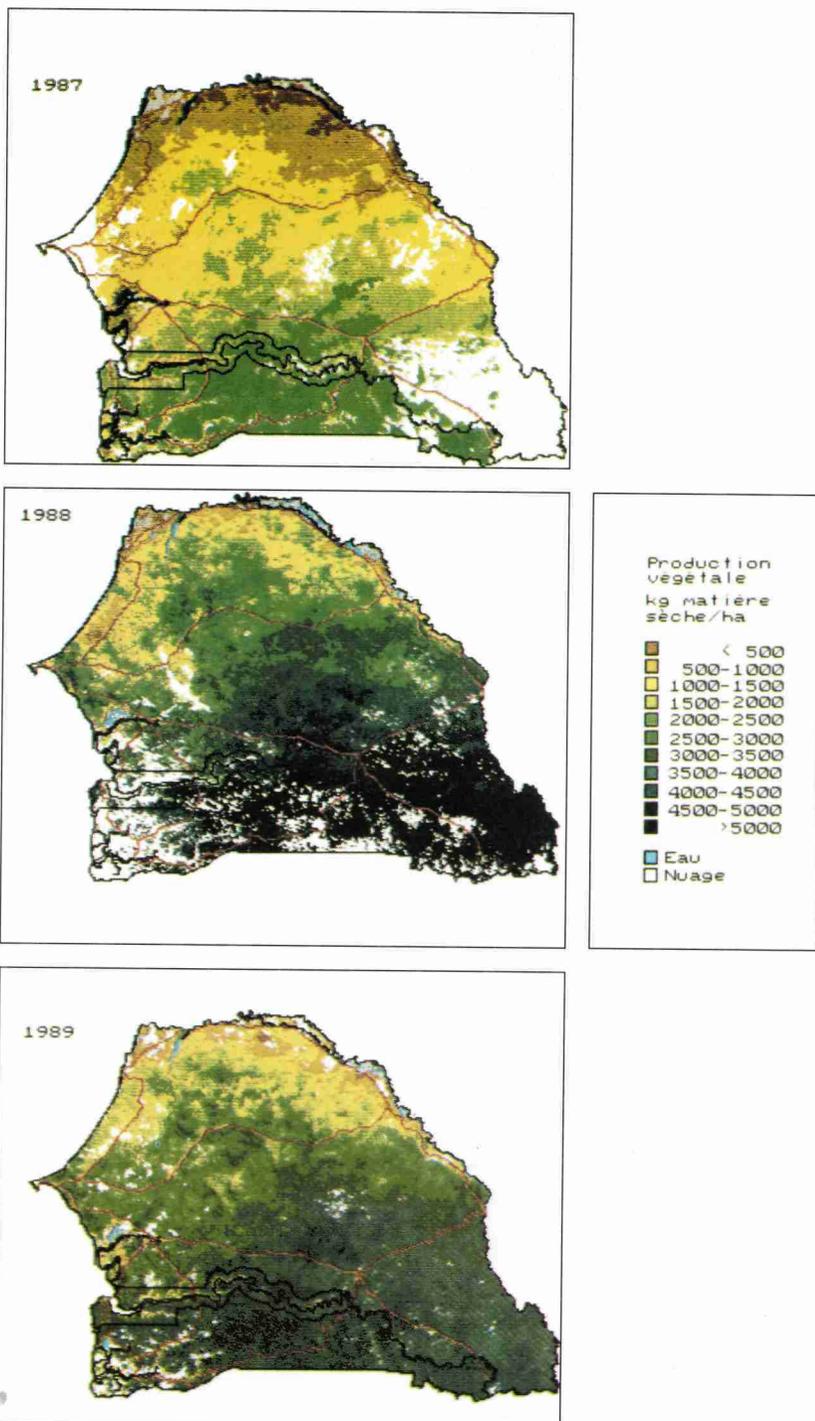


Figure 22-3 (partie 2). Évolution de la production végétale estimée entre 1981 et 1989 au Sénégal

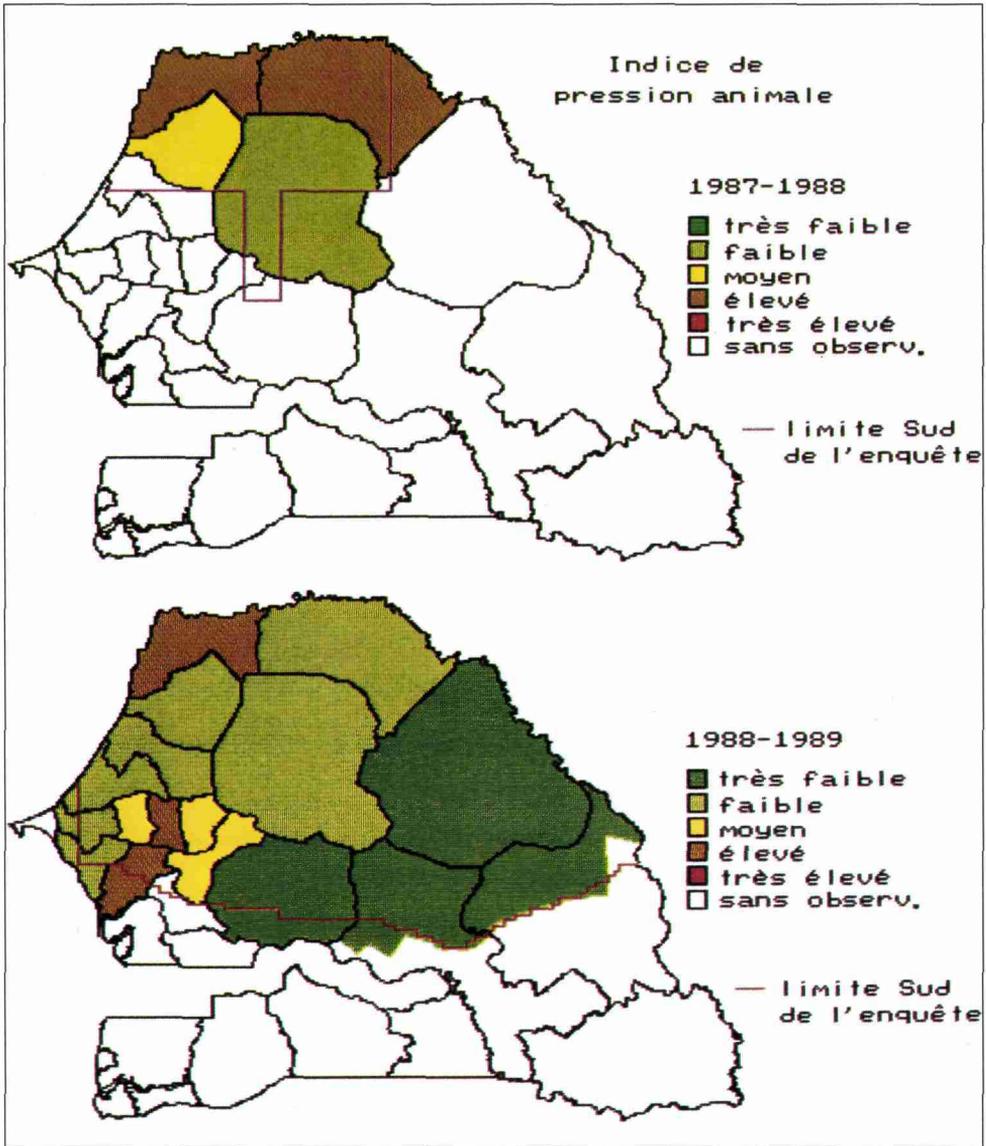


Figure 22-8. Indice de pression animale en 1987-1988 et 1988-1989 dans le nord du Sénégal (utilisation sur 365 jours, 30% de la végétation accessible)

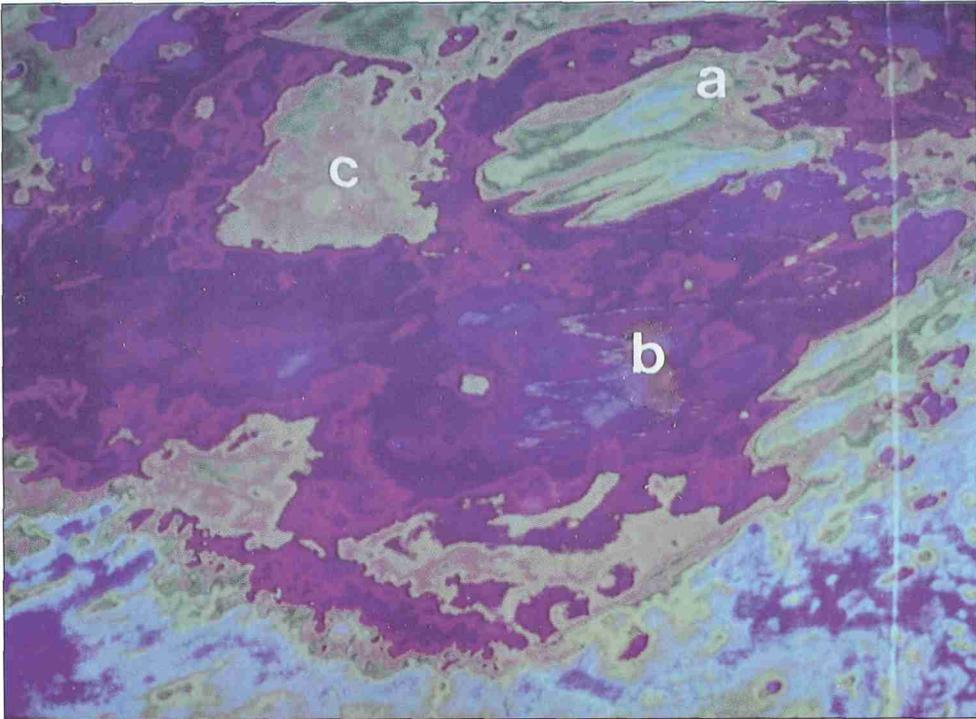


Figure 23-3. Image MSS du chott Jerid (Tunisie) traitée au Digicol; a : détail des incursions éoliennes au chott, b : diagramme de transmission selon un axe N-S mettant en évidence la différence de réflectance des sédiments, c : détail de la zone à croûte de sel fragmentée

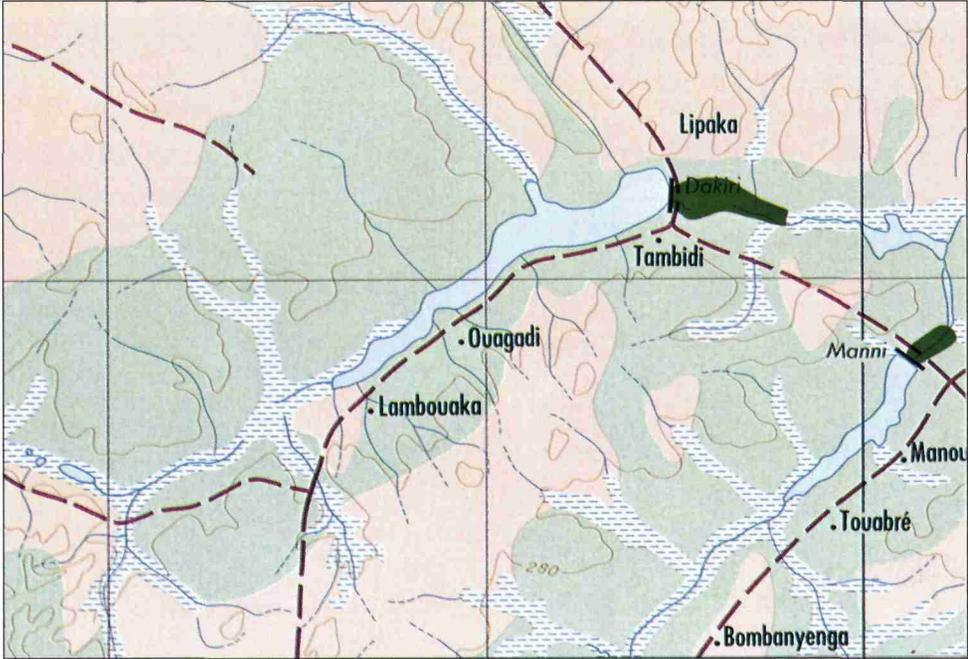


Figure 26-4. Carte d'occupation des sols au 1:200 000, région de Bogandé, Burkina Faso



Figure 26-5. Étude diachronique des barrages de Dakiri et de Mani (Burkina Faso); les périmètres irrigués sont mis en évidence



Figure 26-6. Carte pédologique de Mani-Dakiri (Burkina Faso) numérisée et incluse dans un SIG

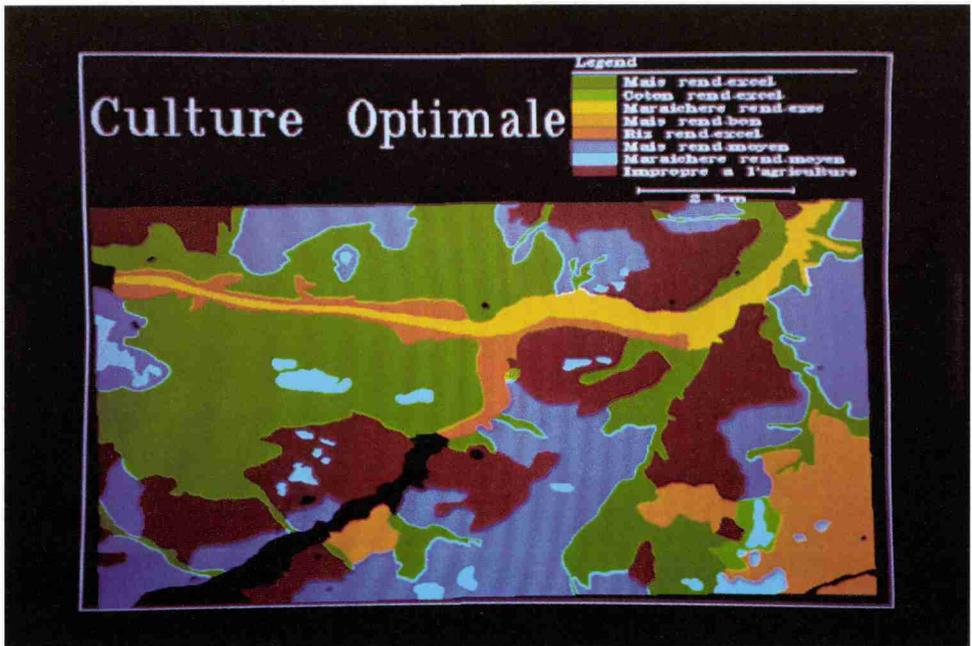


Figure 26-7. Un des résultats du SIG : carte des cultures optimales de la région de Mani-Dakiri (Burkina Faso)

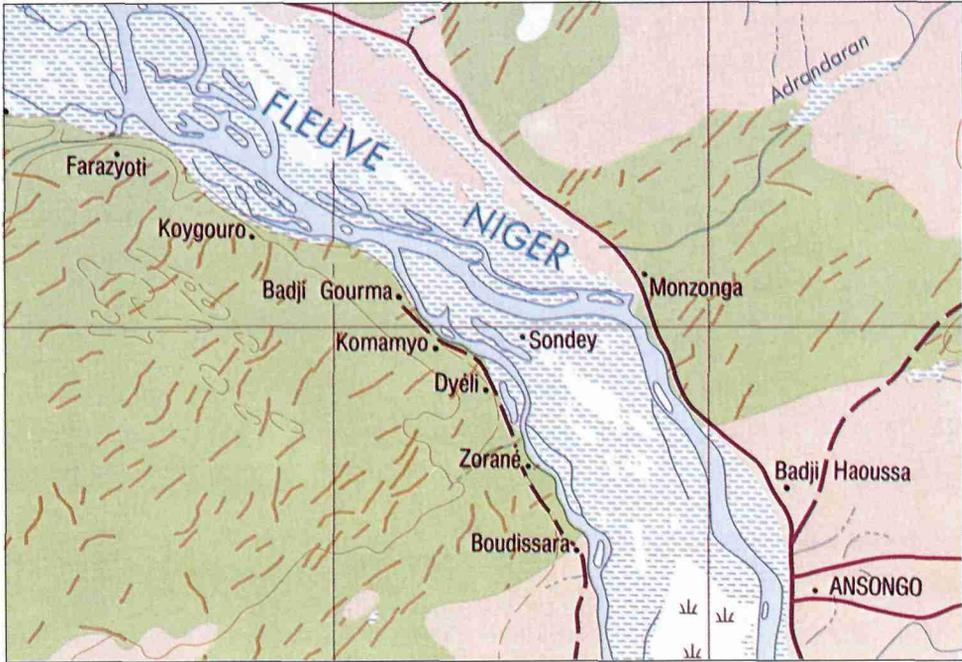


Figure 26-9. Carte d'occupation des sols au 1:200 000, région d'Ansong, Mali

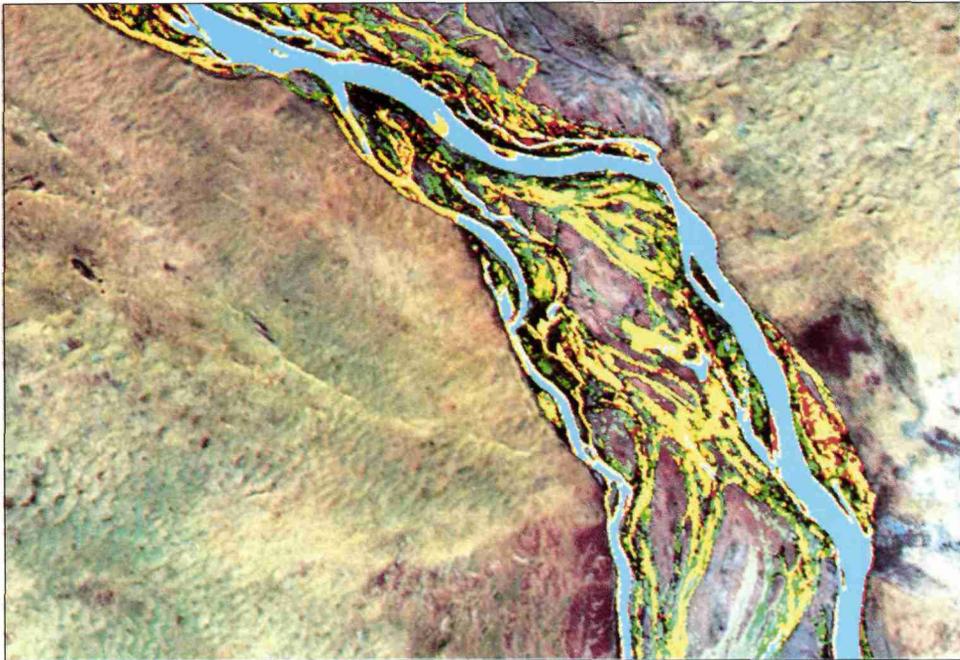


Figure 26-10. Étude diachronique illustrant les variations du fleuve Niger (région d'Ansong), Mali

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
BP 87 — 05003 GAP Cedex
Tél. : 92.51.35.23
Dépôt légal : 726 — Octobre 1990
Imprimé en France

Universités francophones est la collection de l'Université des Réseaux d'Expression Française (UREF). Cette dernière, qui fonctionne au sein de l'AUFELF comme une Université sans murs, a été choisie par le Sommet des Chefs d'Etat et de Gouvernement des pays ayant en commun l'usage du français comme l'opérateur privilégié du Sommet en matière d'enseignement supérieur et de recherche.

Cette collection de manuels universitaires et d'ouvrages de référence s'adresse à tous les étudiants francophones. Elle est appelée à constituer une bibliothèque universitaire en langue française dont les ouvrages sont proposés à des prix modérés.

160,00 FF

80,00 FF — UREF / Prix préférentiel : Afrique, Asie, Amérique du Sud, Haïti

REF 59.4271.9



U R E F



9 780861 962617

AUFELF

