

PARTIE II

Télédétection et désertification

12

Contribution de la télédétection à l'étude de la désertification : exemples choisis en Afrique de l'Ouest

MARIE-FRANÇOISE COUREL ¹, PATRICE BICHERON ², ÉRIC MOUGIN²
et LIONEL JARLAN ²

¹ *PRODIG – UMR 8586, 191, rue St Jacques 75005 Paris (France); tél/télécopieur : (33 1) 44 32 14 80 / 43 29 63 83, courriel : courel@univ-paris1.fr*

² *Centre d'Études Spatiales de la Biosphère, 18, avenue Édouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 04 (France); courriel : bicheron@cesbio.cnes.fr / mougins@cesbio.cnes.fr*

Résumé

L'étude de la désertification depuis l'espace a été rendue possible, il y a plus d'un quart de siècle, avec le lancement des premiers satellites d'observation de la Terre. Dans ce domaine, l'essentiel est de pouvoir identifier dans le paysage les marques dont la présence ou l'apparition témoignent de l'installation de conditions désertiques. Tout aussi important, pour l'approche du phénomène, est de pouvoir attester son caractère dynamique à travers la nature provisoire ou apparemment stable de ces empreintes. On parle véritablement de désertification quand ce processus se pérennise sur de grands espaces. L'effort des thématiciens qui conjuguent « télédétection et désertification » se porte donc sur la mise en évidence d'indicateurs ou de révélateurs de la transformation durable du milieu.

1. Introduction

La désertification est l'aboutissement de processus de dégradation et d'appauvrissement du couvert végétal, de la flore, de la faune des régions sèches, semi-arides et arides. Cette évolution est consécutive à la péjoration des conditions pluviométriques et aux activités humaines susceptibles d'endommager les écosystèmes et de réduire la régénération des ressources naturelles. Une bonne part des conséquences environnementales sont accessibles par télédétection. À l'heure actuelle, l'ensemble des instruments spatiaux, optiques et radars, de résolution décimétrique à kilométrique, apparaissent comme des outils bien adaptés à l'observation et au suivi des phénomènes de dégradation. Les satellites d'observation à haute résolution spatiale nous montrent des phénomènes locaux de dégradation et facilitent le passage vers les plus petites échelles spatiales. La transformation dans le temps des végétations tropicales sèches par le passage d'un mode diffus à un mode contracté (COUREL, 1985) ou encore l'augmentation régulière de l'albédo de surface sur l'ensemble d'une région, indépendamment des variations saisonnières, sont de vrais traceurs de désertification (COUREL *et al.*, 1984). Cependant, l'albédo de surface est un paramètre à manipuler avec précaution. On a montré, qu'au Sahel, il n'y avait pas de relation directe entre l'albédo et la pluviométrie. L'albédo réagit à l'extension de la couverture annuelle herbacée qui, elle, dépend plus de la répartition des pluies que de la quantité des pluies (COUREL et CHAMARD, 1992).

Nous ne reviendrons pas sur les avancées à l'échelle planétaire par le système de veille mondiale des satellites météorologiques, dont la continuité opérationnelle autorise des études de l'environnement et des climats inscrites désormais dans la durée.

À travers quelques résultats choisis en Afrique de l'Ouest, nous verrons la contribution de nouveaux instruments à l'étude de la dégradation des paysages et de la désertification. Il s'agit du diffusiomètre-vent des satellites ERS, pour le suivi du développement herbacé en zone sahélienne et de l'instrument POLDER aéroporté, pour une étude de l'évolution saisonnière de l'indice foliaire sur le continent africain.

2. Diffusiomètre-vent de ERS1 et ERS2

Conçus à l'origine pour estimer la vitesse et la direction des vents au-dessus des océans, les diffusiomètres spatiaux sont des capteurs hyperfréquences actifs (ou radar), présentant une faible résolution spatiale (25 ou 50 km). Leur orbite quasi-polaire et leur large fauchée permettent d'obtenir une couverture totale du globe, à l'exception des pôles, avec une répétitivité temporelle de quelques jours (1 à 2 observations par semaine en zone sahélienne par exemple). Le diffusiomètre mesure le coefficient de rétrodiffusion radar σ^0 qui est l'analogie de la réflectance bidirectionnelle utilisée dans le domaine optique.

Les diffusiomètres embarqués à bord des satellites ERS-1 et ERS-2 fournissent des observations depuis août 1991 dans un domaine de longueur d'ondes complémentaire de celui utilisé par les capteurs optiques (VEGETATION et POLDER par exemple). À ces fréquences radar, le signal enregistré dépend principalement des propriétés géométriques (rugosité du sol, relief, structure des couverts végétaux) et diélectriques (liés directement au contenu en eau) des surfaces observées. De plus, pour la fréquence utilisée (5,3 GHz) qui correspond à une longueur d'onde d'environ 5 cm, l'atmosphère peut être considérée comme transparente, ce qui autorise une observation régulière et non perturbée des surfaces (MOUGIN *et al.*, 1993). Nous utilisons les données mesurées aux grands angles

d'incidence pour suivre le développement végétal dans la région du Gourma au Mali depuis 1991. Les mesures obtenues aux faibles angles d'incidence nous renseignent, par ailleurs, sur l'humidité superficielle des sols. À titre d'illustration, sur la figure 1, on montre les variations du coefficient de rétrodiffusion radar σ^0 mesuré à 45° d'incidence au cours des années 1991–1995 sur un site localisé dans la partie septentrionale du Sahel (17° N, $1,7^\circ$ O). Dans cette région, l'observation par les capteurs optiques à basse résolution est inopérante en raison de la faiblesse du recouvrement végétal. Au cours de la période considérée, la pluviométrie moyenne annuelle est de 155 mm mais présente d'importantes variations interannuelles. L'année 1994 peut être considérée comme une année très pluvieuse avec un total des précipitations s'élevant à 233 mm alors qu'une sécheresse sévère a touché la région en 1995 avec une pluviométrie de 59 mm. La variation des précipitations entraîne une forte variation interannuelle de la production herbacée qui varie de 240 kg/ha en 1995 à 1050 kg/ha en 1994.

L'évolution du coefficient de rétrodiffusion radar reflète bien la saisonnalité et la dynamique du couvert herbacé. Les valeurs du coefficient de rétrodiffusion sont faibles et constantes durant la saison sèche, mais augmentent rapidement avec l'humidification du sol et le développement de la végétation pendant la saison pluvieuse. Les valeurs maximales sont atteintes en août ou septembre lorsque le couvert végétal est à son maximum de développement. Le pic observé en janvier 1992 est consécutif à un fort événement pluvieux qui a entraîné un démarrage précoce suivi d'une sénescence rapide du tapis herbacé. L'amplitude du signal est fortement corrélée à la pluviométrie annuelle, à la biomasse herbacée et à l'humidité du sol. Un modèle simple de rétrodiffusion radar permet de simuler le signal temporel observé et d'analyser les contributions du sol et de la végétation. L'inversion de ce modèle fournit une estimation de la production herbacée annuelle avec une précision de l'ordre de 30 % (FRISON *et al.*, 1998).

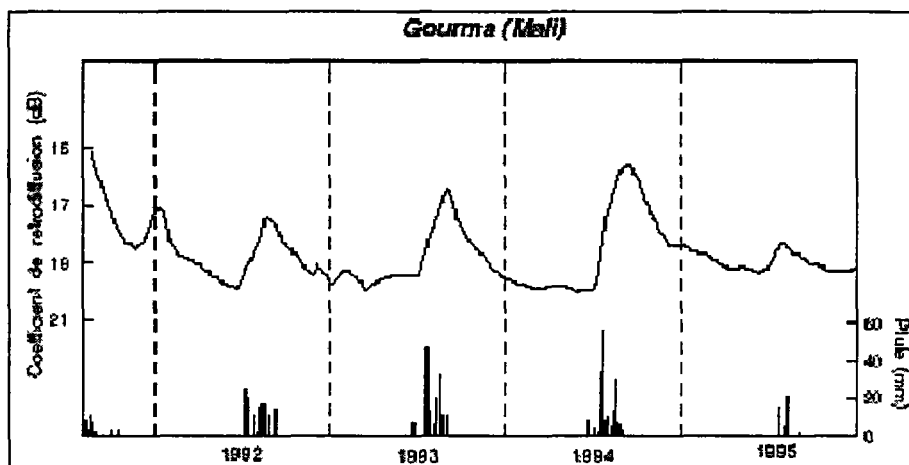


Figure 1. Évolution du coefficient de rétrodiffusion radar mesuré à 45° d'incidence par les diffusiomètres ERS. La région d'étude est située dans la transition saharo-sahélienne (17° N, $1,7^\circ$ O).

3. POLDER

L'extraction à des échelles planétaire et régionale de paramètres biophysiques de la biosphère terrestre, tel l'indice foliaire (LAI), est un débouché intéressant pour l'utilisation des données de nouveaux satellites d'observation opérant dans le domaine du spectre solaire réfléchi. POLDER a la capacité de fournir la fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (FDRB) de n'importe quel point de la terre pour des angles de visée allant jusqu'à 60°, et tout angle azimutal, à une résolution spatiale d'environ 6 km. Tirant profit de cette richesse directionnelle, un algorithme basé sur l'inversion du modèle de FDRB de KUUSK (1995) a été testé avec succès sur des données aéroportées POLDER obtenues sur différents biomes (BICHERON and LEROY, 1999). Notre intention est d'obtenir à l'échelle planétaire et de manière opérationnelle le LAI, ainsi que d'autres paramètres biophysiques à partir de données POLDER/ADEOS 2 qui sera lancé en décembre 2000. On montre ici au travers quelques exemples, l'évolution saisonnière de la végétation du continent africain.

L'instrument POLDER (DESCHAMPS *et al.*, 1994) est composé d'une matrice bidimensionnelle CCD, une roue tournante portant des filtres spectraux et polarisants, et une optique à grand champ. Un point de la surface pour un jour donné est vu jusqu'à 14 fois durant le survol du satellite. La configuration angulaire change chaque jour. Ainsi, après quelques jours, les orbites successives fournissent une description complète de la FDRB. Les données sont géoréférencées, étalonnées, filtrées des nuages et corrigées des effets atmosphériques. Nous avons considéré ici des synthèses de données journalières sur plusieurs périodes de 10 jours. Les bandes spectrales à 670 et 865 nm sont utilisées dans l'étude.

La méthode a consisté à déduire les paramètres biophysiques par l'inversion d'un modèle de réflectance de végétation unique, c'est-à-dire indépendant du type de surface, et reposant sur des bases physiques. Le couvert est modélisé comme un milieu turbide horizontal homogène limité par une couche de sol. Il prédit la FDRB pour n'importe quelles longueur d'onde et direction en fonction d'un jeu de paramètres décrivant la structure du couvert, sa biochimie, et des propriétés spectrales et directionnelles du sol. Le protocole d'inversion consiste à déterminer, outre le LAI, les paramètres les plus sensibles du modèle en fixant les autres au travers une procédure classique de minimisation d'une fonction mathématique.

Sur les figures 2 et 3, on montre l'évolution spatiale et temporelle du LAI sur l'ensemble de l'Afrique de novembre à février. Les pixels sombres correspondent à des surfaces où aucune donnée n'est disponible. Le désert Saharien se distingue clairement avec des valeurs de LAI nulles. Considérant la figure 2, la frange sahélienne s'étend en latitude du sud de la Mauritanie jusqu'à la mer Rouge (Éthiopie), et est caractérisée par des valeurs de LAI entre 0 et 0,7. Plus au sud, le couvert se développe jusqu'aux formations forestières denses. Cette large bande, présente en novembre, rétrécit fortement durant les mois suivants. L'évolution temporelle de ce gradient pourrait être reliée à la pluviométrie. En effet, la saison sèche commence en novembre et dure jusqu'en mars pour les parties les plus au sud. En Afrique Australe, le comportement temporel est opposé. De novembre à février, une large couronne se développe autour du désert de Namibie. Il est également intéressant d'observer l'évolution temporelle pour différents types de végétation. En utilisant la classification IGBP 1-km sur l'Afrique comme référence, nous avons extrait, à titre d'exemple et aléatoirement, des points représentatifs de 2 types de classes végétales. Sur les figures 4 et 5, on suit l'évolution temporelle du LAI entre novembre et juin pour les prairies et les cultures. Le cycle est assez distinct à chaque fois. Pour les prairies, le LAI

commence à croître en décembre pour atteindre son maximum en février et ensuite décroître. Les cultures démarrent leur cycle légèrement plus tôt en novembre avec un LAI maximal en janvier et de fortes valeurs dans la vallée du Nil, pour ensuite entamer une lente décroissance.

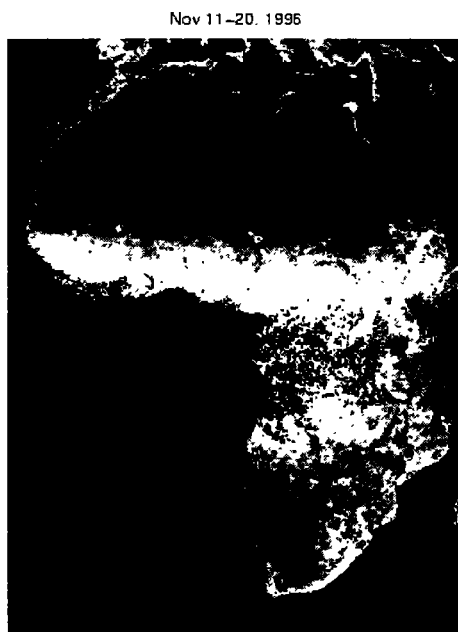


Figure 2. Carte de LAI 2^{ème} décade de novembre

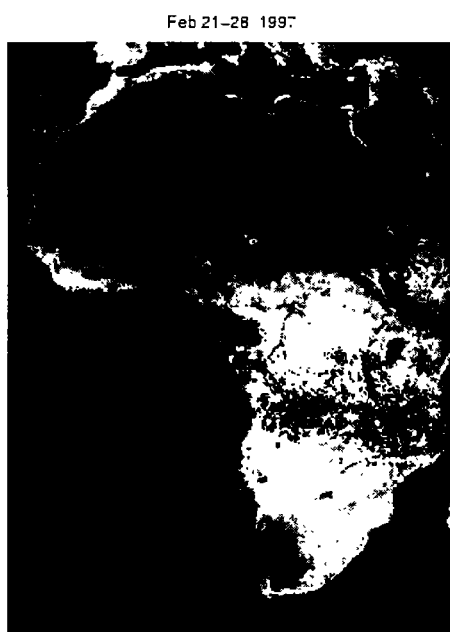


Figure 3. Carte de LAI 3^{ème} décade de février

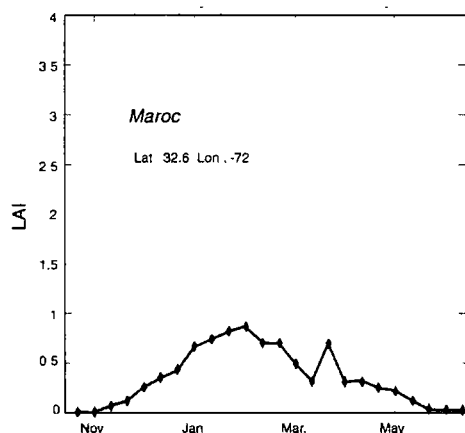


Figure 4. Évolution temporelle du LAI pour les prairies

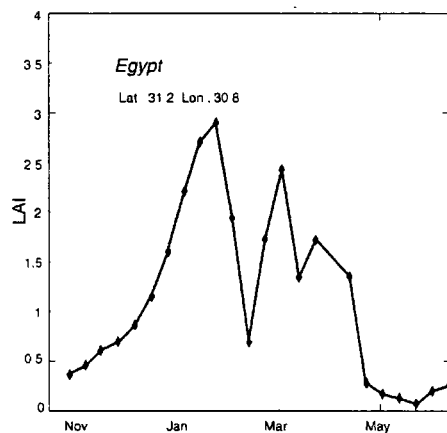


Figure 5. Évolution temporelle du LAI pour les cultures

4. Conclusion

Grâce à leur performance instrumentale améliorée, cette nouvelle génération de capteurs tels que POLDER et VEGETATION, permet de développer de nouveaux algorithmes pour améliorer la qualité des paramètres estimés. Les diffusiomètres spatiaux présentent un potentiel très intéressant pour le suivi des zones sahéliennes. Ces instruments devraient être plus largement utilisés dans un proche avenir avec la mise en service de capteurs présentant une meilleure résolution spatiale et temporelle. Les études de suivi global de la désertification devraient ainsi bénéficier de l'apport de ce nouveau type d'observations complémentaires de celles réalisées par les instruments optiques à large champ.

Pour conclure, la télédétection est un outil de surveillance exceptionnel qui donne accès à la dynamique des milieux. L'essentiel est cependant la compréhension des processus. Ce n'est qu'à ce prix que l'on pourra parler de véritable lutte contre la désertification.

5. Références

- BICHERON, P. and LEROY, M., 1999. A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, vol. 67, p. 251-266.
- COUREL, M.-F., KANDEL R. and RASOOL, I., 1984. Surface albedo and the Sahel drought. *Nature*, vol. 307, n° 5951, p. 528-531, 9 feb.1983.
- COUREL, M.-F., 1985. La contraction de la surface arborée d'après les images Landsat et SPOT simulées, signe d'adaptation sahélienne à la sécheresse. *Photo-interprétation*, n° 81.
- COUREL, M.-F. et CHAMARD, Ph.C., 1992. Reforestation au cap Vert (Sénégal). *Afrique contemporaine*, n° 161, p. 238-247.
- DESCHAMPS, P.Y., BREON, F.M., LEROY, M. *et al.*, 1994. The POLDER mission : instruments characteristics and scientific objectives. *IEEE Tran. Geos. Rem. Sen.*, vol. 32, p. 598-615.
- FRISON, P.L., MOUGIN, E. et HIERNAUX, P., 1998. Observations and interpretation of seasonal ERS wind scatterometer data over northern Sahel (Mali). *Remote Sensing of Environment*, vol. 63, p. 233-242.
- KUUSK, A., 1995. A fast invertible canopy reflectance model, *Remote Sensing of Environment*, vol. 51, p. 342-350.
- MOUGIN, E., LOPES, A., PROISY, C., WARICH, A., FRISON, P.L., LO SEEN, D. and LECOMTE, P., 1993 : Analysis of ERS-I scatterometer data over land surfaces. *Proceedings of the 2nd ERS-1 Symposium, Hamburg, 11-14 Oct.*, p. 393-397.

13

Détection des feux en forêt amazonienne à partir des données HRVIR et VEGETATION de SPOT-4

MARIE-FRANCE BELLAN¹, JEAN-LUC CARAYON¹, THIERRY PHULPIN², FRANÇOIS LAVENU³ et FRANÇOIS BLASCO¹

¹ *Laboratoire d'écologie terrestre, UMR 5552 (CNRS/UPS), B.P. 4403, 31405 Toulouse cedex 4, France; téléphone : +33 (0)5 61-55-85-45; télécopieur : +33 (0)5 61-55-85-44; courriel : marie-france.bellan@cict.fr*

² *Centre national d'études spatiales, 18, avenue Edouard-Belin, 31401 Toulouse cedex 4, France, téléphone : +33 (0)5 61 27 39 01; télécopieur : +33 (0)5 61 28 19 26; courriel : Thierry.Phulpin@cnes.fr*

³ *Centre d'étude spatiale de la biosphère, B.Pi 2801, 31401 Toulouse cedex 4, France, téléphone : +33 (0)5 61 55 66 80; télécopieur : +33 (0)5 61 55 85 00; courriel : lavenu@cesbio.cnes.fr*

Résumé

En 1997-1998, le phénomène El Niño entraîna une saison sèche très prononcée en Amazonie, notamment dans l'État de Roraima (Brésil). De nombreux incendies ont sévi en savane comme en forêt, aussitôt localisés par plusieurs satellites. Notre article traite de la contribution des images fournies par les capteurs à haute et basse résolutions HRVIR et VEGETATION (VGT) de SPOT-4 pour évaluer l'impact de ces feux sur les formations végétales tropicales. Quelques-unes des premières images des capteurs de SPOT-4 sur le Roraima sont analysées et interprétées en vue de délimiter des zones affectées par les incendies. Les données VGT permettent une première estimation des surfaces brûlées à l'échelle régionale et montrent les principaux écosystèmes touchés. Les images HRVIR sont utilisées pour établir une classification beaucoup plus précise des différentes formations

végétales (forêts denses sempervirente et saisonnière, savanes, pâturages et cultures) effectivement brûlées ou non. Les surfaces calculées sur les images VGT sont corrigées à l'aide des données HRVIR. Cependant, l'estimation des surfaces peut être faite globalement à partir de VGT avec une précision de 15 % environ.

1. Introduction

Parmi les phénomènes menaçant l'équilibre naturel, les feux ont pris, depuis quelques dizaines d'années, une importance prépondérante. Récemment, on a pu voir le nord de l'Amazonie (en particulier l'État de Roraima, 225 000 km²) en feu (www.nma.embrapa.br/projectos/queimadas). Les conséquences sur les écosystèmes de la région n'ont pas encore été évaluées.

La littérature scientifique sur la télédétection des feux aux échelles régionales et sub-régionales est abondante, concernant la détection des feux actifs et des zones brûlées à partir d'AVHRR de NOAA ou des satellites géostationnaires (DWYER *et al.*, 1998; GRÉGOIRE *et al.*, 1998; JEFFERY 1989; KOFFI *et al.*, 1995; MALINGREAU *et al.*, 1985; RANDRIAMBELO *et al.*, 1998). EASTWOOD *et al.* (1998) ont repéré des traces de feux en forêt boréale sur des images VGT. Pourtant, les chiffres concernant leur impact sur les écosystèmes brûlés sont rares.

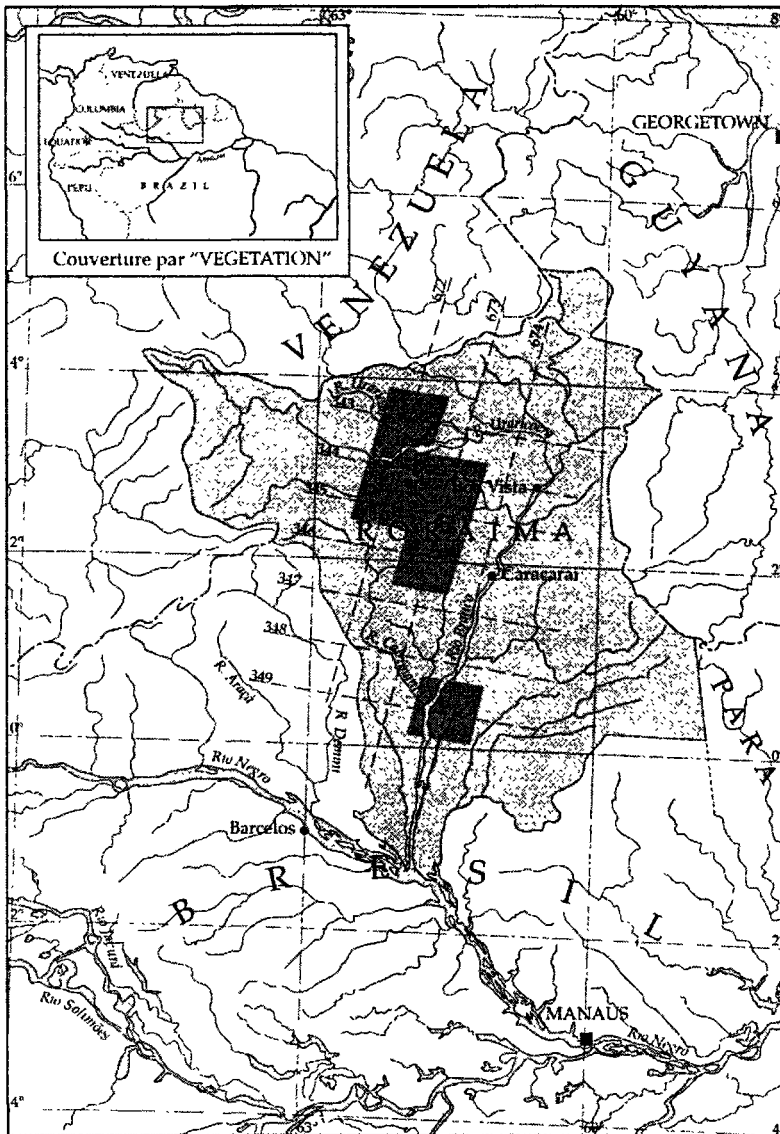
L'objectif de cet article est de montrer les capacités des capteurs HRVIR et VEGETATION (VGT) de SPOT-4 pour évaluer l'impact des feux de forêt et pour délimiter les principales formations végétales touchées. Il s'agit principalement de cartographier et de mesurer les surfaces brûlées.

2. Capteurs de SPOT-4

SPOT-4 est le quatrième satellite opérationnel conçu et fabriqué par la France en collaboration avec la Suède et la Belgique. Lancé en mars 1998, il transporte comme ses prédécesseurs, deux caméras à haute résolution spatiale appelées HRVIR qui bénéficient d'une amélioration importante : l'addition d'une bande dans moyen infrarouge. Une seconde amélioration de SPOT-4 est le capteur VGT, le premier à utiliser les barrettes de détecteurs pour produire des images de haute qualité à faible résolution, avec une distorsion très réduite. Sa principale mission est la surveillance opérationnelle continue de la biosphère continentale.

3. Zone d'étude

La région du Roraima est située au nord du Brésil, à la frontière du Vénézuéla et de la Guyane anglaise ou Guyana (figure 1). On y trouve les principales classes de végétation suivantes : végétation très dégradée et cultures, savanes saisonnières, savanes semi-saisonnières et forêt de plaine sempervirente saisonnière (PUIG *et al.*, 1981; RADAMBRASIL, 1975; TREES, 1996). Ces savanes équatoriales d'Amazonie brûlent régulièrement (VAN DONSELAAR, 1968 et 1969; SARMIENTO, 1983).



4. Matériel utilisé

Pour avoir une vue globale de l'extension des incendies dans l'État de Roraima, nous avons pu nous procurer auprès de VITO, Centre de traitement et d'archivage des produits VGT, une image VGT du 21-04-1998 dont une partie seulement a été analysée (figure 13-2) (voir cahier couleur). Grâce à la possibilité de programmer le satellite, nous avons pu obtenir également des images HRVIR à la même date (figure 13-3) (voir cahier couleur). À l'intérieur de la zone d'étude VGT (ZEV), on a donc défini une zone d'étude détaillée (ZED) où l'on a pu comparer les données VGT et HRVIR. D'autre part, nous avons utilisé une image HRVIR du 16-04-1998, située à 200 km au sud, sur des savanes semi-saisonnières incluses dans la forêt dense, apparemment brûlées elles aussi.

5. Analyse des données VGT et HRVIR de SPOT-4

Cette analyse met en lumière l'apport de la bande dans le moyen infrarouge (MIR). La signature des pixels occupés par la végétation est déterminée par la teneur en eau de cette végétation et du sol sous-jacent. La réflectance augmente quand la teneur en eau diminue. Ce comportement est le même sur les images VGT et HRVIR.

5.1. Image VEGETATION

Nous avons utilisé une composition colorée des canaux B0 en bleu, B3 en vert et MIR en rouge. Sols et végétation secs ressortent donc en rouge sur l'image, l'eau est bleu foncé et les surfaces qui viennent de brûler sont noires.

Dans la classe 1, « végétation très dégradée et cultures », les feux ont débuté en mars 1998. Ceci est visible sur les images AVHRR de NOAA diffusées sur le Web (www.nma.embrapa.br/projectos/queimadas). La plupart des feux actifs repérés ont été localisés sur une image TM de LANDSAT par l'INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) au Brésil (MORAES NOVO, 1998). Sur l'image VGT du 21 avril, la plus grande partie de la surface a été parcourue par le feu, mais les cendres ont été dispersées, laissant à nu les sols clairs, desséchés, et des débris de végétation sèche, d'où la teinte rose.

La classe 2 est la « forêt de plaine sempervirente saisonnière » dont une surface importante a brûlé entre le 17 et le 29 mars; des taches de forêt dense sont toutefois restées intactes au milieu de la zone brûlée.

La classe 3 est la forêt intacte, comprenant à la fois la forêt dense tropicale humide et la forêt saisonnière.

On calcule le nombre de pixels et la surface de chaque classe. Sur le tableau 1, on donne la surface brûlée par écosystème, calculée d'après l'image VGT sur la ZED.

Cette estimation s'appuie sur deux hypothèses : les pixels à faible réflectance dans le PIR et forte dans le MIR sont considérés comme brûlés et chaque pixel représente 1 km².

L'étape suivante est la vérification de ces résultats à partir des données HRVIR.

Tableau 1. Surfaces brûlées identifiées avec le capteur VGT en 1998.

Classe « VEGETATION »	Surface ZED (HRVIR) km ²	Surface ZEV (VGT) km ²	Principaux écosystèmes
1	3 350	21 160	Végétation très dégradée et cultures brûlées
2	8 740	10 620	Forêt sempervirente saisonnière de plaine brûlée
3	Sans objet	10 660	Savanes semi-saisonnières brûlées
4	7 08	292 470	Intactes : Forêt sempervirente saisonnière de plaine Forêt sempervirente tropicale
5	1 720	665 550	Nuages, eau et non classés
Total	20 890	1 000 460	

ZED = zone d'étude détaillée ; ZEV = zone d'étude VGT

5.2. Images HRVIR

Les classes identifiées sur VGT peuvent être analysées beaucoup plus finement à partir des données HRVIR du 21 avril.

5.2.1. Classe 1

Sur l'image HRVIR, l'occupation du sol, profondément influencée par l'Homme, est très complexe. Dans ce paysage de plateau, les vallées étroites à sol argileux sont mises en évidence par une végétation particulière liée à l'hydromorphie. Cette végétation brûle en saison sèche et apparaît ici en gris foncé ou violet foncé. Les interfluves sont occupés par les *campos* et ont été également parcourus par les feux. Mais, au bout de quelques semaines, quand les cendres ont été dispersées, la réflectance augmente rapidement, avec une couleur rose de plus en plus prononcée. Les taches blanches correspondent à des sols sableux superficiels très secs.

5.2.2. Classe 2

La large tache brune sur l'image VGT est une forêt dense dans laquelle le sous-bois et le sol superficiel et, partiellement la canopée, ont été détruits par le feu depuis environ un mois. Cependant, on voit bien que certains émergents restent debout, apparemment intacts. À cet endroit, la forêt était intacte en octobre 1997.

5.2.3. Classe 3

L'image HRVIR du 16-04-1998 montre, dans la forêt, de larges ouvertures occupées par des savanes dont certaines ont été brûlées il y a quelques semaines, à en juger par leur couleur rouge.

Sur les images HRVIR constituant la ZED, on a repris le calcul des zones brûlées après avoir réalisé une mosaïque pour supprimer les chevauchements. D'autre part, on a tenu compte de l'angle de prise de vue pour corriger la taille du pixel. La surface brûlée d'après VGT est alors comparée à celle mesurée à partir des scènes HRVIR de même date sur la ZED. En même temps, on tient compte des subdivisions, reconnues sur HRVIR, des classes VGT.

Sur le tableau 1, on montre une nette surestimation des surfaces brûlées sur VGT : ceci est dû principalement au fait qu'un pixel couvrant une zone partiellement brûlée est classé en surface brûlée. Par conséquent, si l'on veut utiliser l'image VGT, il faut appliquer un coefficient de correction (tableau 2). Ainsi, la surface brûlée dans la ZEV serait de 33 410 km² au lieu de 42 000 km² calculée à partir des seules données VGT.

6. Discussion

On a utilisé les capteurs VGT et HRVIR pour évaluer l'impact des grands incendies qui ont affecté l'État de Roraima au Brésil.

Dans les régions tropicales où il y a des risques d'incendie, on peut disposer rapidement d'images VGT permettant de détecter et de suivre l'impact des feux.

Évidemment, la résolution de VGT est insuffisante pour identifier avec précision les écosystèmes touchés par le feu, mais la comparaison avec des cartes de végétation à petite échelle permet une première approche. Ici, l'image VGT montre clairement trois grands types de végétation parcourus par les feux.

Tableau 2. Estimation des surfaces brûlées avec les données des capteurs VGT et HRVIR en 1998.

Classes identifiées par VGT	Sous-classes identifiées par HRVIR	Surfaces brûlées (km ²) d'après VGT sur la ZED	Surface intacte d'après VGT (km ²)	Surface brûlée (km ²) d'après HRVIR sur la ZED	Surface intacte d'après HRVIR (km ²)	Différence (S. brûlée VGT - S. brûlée HRVIR)	Coefficient de correction
Savanes très dégradées et cultures		3 350	0	3 060		280	0,91
	Cultures et savanes herbeuses			1 460			
	Forêts claires et savanes arborées			1 000			
	Savanes inondées			600			
Forêt sempervirente saisonnière de plaine brûlée		8 739		6 980		0,176	0,80
Non touchées par le feu : forêt sempervirente saisonnière et forêt sempervirente tropicale de plaine			7 085		8 500	1 410	1,2
Nuages, eau et non classés			1 720		1 860	140	1,08

Les images VGT fournissent une estimation des surfaces brûlées supérieure de 15 % à celle des images HRVIR.

L'acquisition simultanée de VGT et HRVIR est un progrès technique important et prometteur. Un écosystème donné peut être étudié à haute et basse résolutions avec les mêmes distorsions ou altérations atmosphériques. Ceci donne la possibilité de calculer les surfaces brûlées avec une certaine précision.

L'apport du MIR est indéniable, en distinguant immédiatement les zones brûlées, juste après le feu et quelques semaines après.

Les données HRVIR utilisées dans le présent article montrent clairement la diversité des impacts du feu sur les forêts amazoniennes. Certaines forêts ne sont pas entièrement détruites par le feu mais elles ont gravement souffert de la sécheresse exceptionnelle et sont restées extrêmement vulnérables.

7. Conclusion

Les résultats présentés ici montrent pour la première fois l'extension des feux dans l'État de Roraima et le type d'écosystèmes totalement ou partiellement détruits. Ces résultats ont été obtenus par l'utilisation complémentaire des données des deux capteurs (VGT et HRVIR) de SPOT-4. Il est intéressant de constater que les images VGT permettent une estimation des surfaces brûlées avec une précision de 15 % par rapport à l'estimation calculée sur les images HRVIR. Les données de ces images apportent une connaissance plus fine des divers écosystèmes touchés, ce qui permet de faire un pas vers une évaluation des biomasses brûlées, mais aussi de la perte de biodiversité par fragmentation. Toutefois ce dernier point est encore matière à spéculation.

Cette recherche se poursuit par une étude plus approfondie des écosystèmes concernés et de leur comportement vis-à-vis du feu. Si l'on peut estimer la biomasse totale de ces écosystèmes et la part de cette biomasse effectivement brûlée, on aura une idée de la quantité de carbone rejetée dans l'atmosphère. Ainsi, l'estimation au moyen des images satellitales de la surface brûlée par écosystème peut conduire à une quantification de l'effet des feux sur l'atmosphère.

8. Remerciements

Les auteurs remercient particulièrement E. Moraes Novo (INPE, Brésil), qui a confirmé notre première analyse sur l'extension des feux, d'après des données de TM de LANDSAT 5.

9. Références

- DWYER, E., GREGOIRE, J.M. and MALINGREAU, J.P. 1998. A global analysis of vegetation fires spatial and temporal dynamics. *Ambio*, vol. 27, n°3, p. 175-181.
- EASTWOOD, J.A., PLUMMER, B.K., WYATT, B.K., and STOCKS, B.J. 1998. The potential of SPOT-VGT data for fire scar detection in boreal forest. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n°18, p. 3681-3687.

- GRÉGOIRE, J.M., GLENAT, B., JANVIER, P., JANODET, E., TOURNIER, A. and SILVA, J.M.N. 1998. Fire Activity in the Guiana shield, the Orinoco and Amazon Basins during March 1998. Commission of the European Communities, Joint Research Center, Space Applications Institute, Ispra Establishment, Italie.
- JEFFERY, D. 1989. Yellowstone : the great fires of 1988. *National Geographic*, n°175, p. 255-273.
- KOFFI, B., GREGOIRE, J.M. and EVA, H.D. 1995. Satellite Monitoring of vegetation fires on a multi-annual basis at continental scale in Africa. In : J.S. Levine (édit.) *Biomass burning and Global Change*, Williamsburg, Virginie.
- MALINGREAU, J.P., STEPHENS, G. and FELLOWS, L. 1985. Remote Sensing of forest fires : Kalimantan and North Borneo in 1982-83. *Ambio*, vol. 14, n° 6, p. 314-315.
- MORAES NOVO, E. 1998. Communication personnelle.
- PUIG, H., BLASCO, F. and BELLAN, M.F. 1981. *Vegetation Map of South America*. UNESCO, Natural Resources Research XVII, 1 : 5 000 000 , Paris, avec notice.
- RADAMBRASIL (Projeto). 1975. *Levantamento de Recursos Naturais*. Vol. 8, Boa Vista/Roraima, Folhas NA/NB 20. Mapa fitoecológico. E 1 : 1 000 000. Ministerio das Minas a Energia, Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM), Rio de Janeiro, Brasil.
- RANDRIAMBELO, T., BALDY, S., BESSAFI, M., PETTIT, M. and DESPINOY, M. 1998. An improved detection and characterization of active fires and smoke plumes in south-eastern Africa and Madagascar. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n° 14, p. 2623-2638.
- SARMIENTO, G. 1983. The savannas of tropical America. in Bourlière (éd.). *Tropical Savannas. Collection Ecosystems of the World*, 13, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, p. 245-288.
- TREES, 1996. *Vegetation Map of South America from NOAA-AVHRR*, Commission of the European Communities, Joint Research Center, Ispra Establishment, 1 : 5 000 000.
- VAN DONSELAAR, J. 1968. Phytogeographic notes on the savanna flora of Southern Surinam (South America). *Acta Botanica Neerlandica*, n° 17, p. 393-404.
- VAN DONSELAAR, J. 1969. Observations on savanna vegetation types in the Guianas. *Vegetatio*, n° 16-17, p. 271-312.

14

Sur l'ensablement des palmeraies : apport de la télédétection numérique dans un secteur menacé du sud-est du Maroc

ROBERT DESJARDINS¹, EL MEHDI ALEM², PIERRE ROGNON³,
PATRICK MAUPIN⁴, IBRAHIMA NDIAYE⁵ et MANSOUR BENALLA⁶

¹ *Département de géographie, Université du Québec à Montréal, B.P. 8888 Succursale Centre-ville, Montréal, QC, Canada H3C 3P8; téléphone : 514 987 3000 poste 8236#; télécopieur: 514 876 6784; courriel : desjardins.robert@uqam.ca*

² *Département de télédétection, Institut scientifique, Université Mohammed V, avenue Ibn Batouta, B.P. 703, Rabat-Agdal, Maroc; téléphone : (212) (7) 77 45 48; télécopieur: (212)(7) 77 45 40*

³ *Département de géodynamique et des Milieux Continentaux, Case 114, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris, France; téléphone : (33) (1) 44 27 50 46; télécopieur : (33) (1) 44 27 59 53*

⁴ *Département de génie électrique, École de technologie supérieure, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, QC, Canada H3C 1K3; téléphone : (514) 396 8607; télécopieur : (514) 396-8595*

⁵ *Département de gestion de l'environnement, Université Senghor, 1 place Ahmed Orabi - El Mancheya, B. P. 21111-415, Alexandrie, Égypte; téléphone : (212) 4843371; télécopieur : (212) 4843374*

⁶ *Département des sciences de la Terre, Université Mohammed V, avenue Ibn Batouta, B.P. 703, Rabat-Agdal, Maroc; téléphone : (212) (7) 77 45 48; télécopieur : (212)(7) 77 45 40*

Résumé

La partie sud-est du Maroc est aux prises avec un phénomène très répandu dans les pays limitrophes aux environnements sahariens et sahéliens. Il s'agit de la désertification et de l'ensablement. La menace constante de l'avancement du sable sur les oeuvres humaines dans ce secteur est bien présente si nous prenons en compte par exemple la destruction de 60 % d'un village par une tempête à la fin des années 1970.

Face à ce phénomène, nous nous devons de trouver des voies opérationnelles pour l'identification, le suivi de la dynamique et une évaluation de son impact sur l'habitat. Dans cet article, nous présentons une approche centrée sur les données de télédétection qui permettent de voir l'évolution spatio-temporelle de l'ensablement. Des informations aériennes, satellitaires et des données de terrain sont utilisées. Pour y arriver, nous explorons des images de différence, des composantes principales ainsi que des données visuelles issues de la morphologie mathématique. Cette approche nous aura permis de déduire qu'un champ de barkhanes se déplace vers le nord-est à une vitesse moyenne de 10 m/an. De plus, pour un secteur donné, il a été possible d'évaluer à plus de 20 % la superficie ensablée d'une palmeraie sur une période de 37 ans. Cette étude nous porte à croire qu'une fréquence de prise d'information de 10 ans et une résolution spatiale plus fine constituent les éléments de base afin d'extraire de l'information utile dans une perspective de suivi et de recherche de solutions visant à minimiser l'impact de l'ensablement.

1. Introduction

Pendant longtemps, la détection de changements dans divers unités de paysage a été effectuée à partir de constats sur le terrain et de photographies aériennes. Dans le cas des conséquences de l'ensablement, ces sources de données ne permettent pas d'obtenir une vision synoptique du problème et de ses conséquences. Tout au plus, elles peuvent aider à la détection d'une dynamique à l'échelle locale. Dans une perspective spatio-temporelle, il devient utile de trouver des nouvelles sources d'information qui pourront saisir d'un seul coup d'oeil le déplacement et l'orientation de ce mouvement des sables et ce, à l'échelle régionale. Aujourd'hui, grâce aux images satellitaires à haute résolution telles que celles acquises par le capteur HRV de SPOT en mode panchromatique, il est possible d'obtenir une information suffisamment pertinente pour analyser le paysage à l'échelle souhaitée.

L'utilisation des données satellitaires est cependant limitée dans le temps. Dans le cas de la plate-forme SPOT, elle a été lancée le 21 février 1986, ce qui ne donne que 13 ans d'information disponible. Or, pour bien visualiser et évaluer le comportement du sable dans le temps, nous avons besoin d'une période de temps plus grande.

Afin d'obtenir une vision réaliste des changements et de la dynamique qui y est associée, nous devons donc posséder des informations multitudes sur une longue période. Il nous faut donc trouver des données qui datent d'avant la venue des satellites d'observation de la Terre. Deux possibilités s'offrent à nous : une cartographie des données de terrain et les photographies aériennes. Nous voyons donc la complémentarité, voire même une complicité entre l'approche dite conventionnelle et celle développée autour des nouvelles technologies d'acquisition de données. Cette combinaison ne peut être réussie de façon satisfaisante qu'avec l'apport du traitement numérique d'information. Les données doivent donc être transformables en bases d'informations numériques. Ainsi, il sera possible d'effectuer sur chaque image discrète des traitements identiques ainsi que des extractions d'information

provenant de cette combinaison.

L'objectif de cette recherche est de voir comment l'utilisation des données de télédétection (tant d'origine satellitale qu'aéroportée) jumelées avec des données auxiliaires peut aider, non seulement à mieux percevoir le problème de l'ensablement, mais aussi à bien saisir ses conséquences sur le paysage à court et à long terme. Nous nous concentrerons sur le cas de certaines palmeraies dans la province du Tafilalet, dans le sud-est du territoire marocain.

Plus spécifiquement, il s'agit de colliger les informations sous un même format numérique afin de voir comment elles nous permettent d'identifier les changements et, dans une certaine mesure, de déterminer l'orientation et le déplacement des masses sableuses et d'évaluer les superficies de palmeraies qui ont été ensablées.

Il existe dans la littérature plusieurs travaux qui traitent de la reconnaissance de la sécheresse, de la désertification et de leur importance à l'échelle mondiale. Nous citerons d'abord Émile DERLIN ZINSOU qui était, en 1995, Président du Conseil permanent de la francophonie: « Pour le XXI^e siècle, la sécheresse, que ses causes soient d'origine naturelle ou anthropique, constituera le phénomène climatique dont l'impact sur les processus écologiques fondamentaux, sur la productivité biologique, sur la santé et la vie des populations, [...] sera le plus profond[...] plusieurs centaines de millions de personnes sont ou vont être confrontés dans les prochaines années à la sécheresse et à la désertification. » Mentionnons aussi les travaux de FRÉROT (1995) qui présente une perception cruellement réaliste de ces phénomènes chez les enfants de Mauritanie. Ces processus évolutifs engendrent des impacts négatifs autant sur les mangroves du Sénégal (MARIUS, 1995), que sur le développement de l'agriculture dans les régions semi-arides marocaines (YACOUBI *et al.*, 1998). Quant au suivi de la désertification et de l'ensablement, notons les travaux de JAQUEMINET (1990), de KARIMOUNE *et al.* (1993) et de CALLOT *et al.* (1994). Ce dernier utilise une approche relativement nouvelle basée sur la morphologie mathématique.

2. Description du site et données disponibles

Le territoire analysé est situé dans le sud-est du Royaume du Maroc, à la limite nord-ouest du Sahara, à plus de 600 km de Rabat, capitale du pays (figure 1). Plus spécifiquement, le secteur se trouve à environ 80 km au sud du centre régional d'Er Rachidia, dans la province du Tafilalet. Nous avons concentré nos recherches autour des villages de Jorf et d'Hannabou, ces deux secteurs étant particulièrement vulnérables à l'ensablement.

La région étudiée présente une physiographie peu variée, composée en grande partie d'une plaine dont la topographie varie de 790 m au sud-est à 830 m au nord-ouest. Le sol qu'on y trouve est limino-argileux avec une salinité élevée, ce qui ne favorise pas l'implantation de la végétation (BENALLA, 1996). La faiblesse du dénivelé et le pouvoir de transport du vent dominant SO-NE appelé Sahéli entraînent comme conséquence une mobilité importante des dépôts en surface. Notons que la présence de palmeraies au nord-est du territoire favorise à leur amont un dépôt de sable. En effet, cette rugosité de surface fait en sorte que la vitesse du vent diminue à proximité de cet obstacle. En conséquence, nous pouvons noter là des accumulations importantes de dépôts fins. C'est le cas près du village de Hannabou. En 1978, ce village a été en grande partie détruit par une tempête de sable causée par le Sahéli.

Les sols aujourd'hui cultivés sont concentrés dans des zones irriguées surtout au centre-nord du secteur étudié. La partie sud-ouest est constituée de collines dont les sommets culminent à 930 m au contrefort. Nous pouvons enfin observer une masse montagneuse

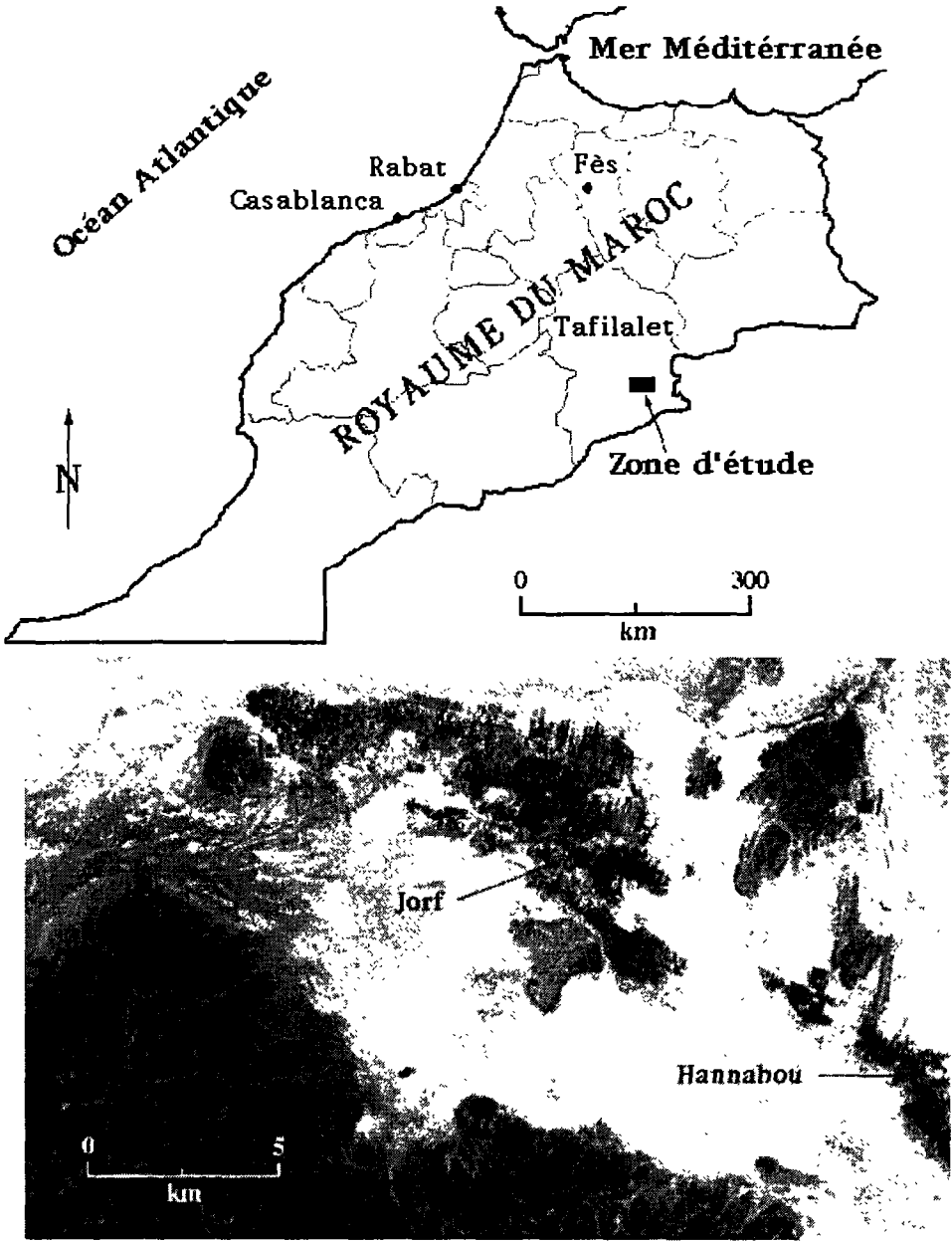


Figure 1. Localisation du secteur étudié aux échelles nationale et régionale.

plus à l'ouest où nous trouvons une topographie plus élevée (environ 1 050 m).

Pour réaliser cette étude, nous disposons de données provenant du capteur HRV de SPOT. Il s'agit des images acquises en mode panchromatique le 29 septembre 1986 et le 6 août 1995. Des photographies aériennes à l'échelle du 1 : 22 000 (mission de 1958) numérisées complètent les sources provenant de la télédétection. Des informations statistiques et cartographiques de recherches sur le terrain complètent les bases de données disponibles.

3. Considérations significatives dans l'étude du changement

3.1. La résolution

Dans le contexte de cette recherche, nous avons à notre disposition des images HRV de 1986 et de 1995 dont la résolution spatiale est de 10 m. Il a été aussi nécessaire de numériser des photographies aériennes datant de 1958. Enregistrées à raison de 2 400 *DPI* (*dots per inches*) à l'aide d'un numériseur, nous les avons ramenées à une résolution spatiale identique à celles des images HRV afin qu'elles soient superposables aux images. Pour la résolution spectrale, les données acquises en mode panchromatique de HRV couvrent le visible, comme les photographies aériennes. Visuellement, l'illumination est comparable lorsque nous effectuons les rehaussements de contraste appropriés. Pour la résolution temporelle, l'échantillonnage s'échelonne sur 37 ans. Les informations ayant été acquises à trois moments entre 1958 et 1995, la fréquence de prise d'information est donc faible. Enfin, la résolution radiométrique est, en général, comparable entre les images aéroportées numérisées et satellitaires.

3.2. L'information numérique, le traitement préalable

Nous devons d'abord nous préoccuper de la possibilité de superposer, avec précision, les différentes bases de données numériques. Pour y arriver, nous avons effectué des corrections géométriques en utilisant comme image de référence celle de HRV du 6 août 1995. Il faut prendre pour acquis que, dans des environnements désertiques, il est souvent difficile, voire même impossible pour certains secteurs du territoire étudié, de pouvoir trouver des points de contrôle dont la fiabilité est à toute épreuve, surtout en dehors des zones où l'on retrouve des activités humaines (milieux habités et zones agricoles). Dans un milieu naturel comme celui de cette recherche, nous devons souvent nous contenter de jonctions d'entailles d'érosion parfois détectables en zone montagneuse ou des rares croisées de sentiers ou de pistes. En conséquence, nous ne pouvons difficilement en arriver à la précision souhaitée de moins de 1/2 pixel. Dans notre cas, l'erreur quadratique oscille autour d'un pixel c'est-à-dire 10 m au sol, même pour les photographies aériennes numérisées, lesquelles ont été ramenées à 10 m de résolution afin qu'elles puissent être géométriquement et spatialement comparables.

Pour fin de comparaison visuelle, une harmonisation radiométrique entre les images a été réalisée à l'aide de l'analyse de la dynamique des histogrammes de fréquences. En effet, nous avons atténué les différences avec la technique d'étirement par égalisation de l'histogramme. Ainsi, nous avons obtenu de bons contrastes entre les objets pour l'environnement sableux. L'harmonisation radiométrique avec les photographies aériennes numérisées de 1958 a été cependant plus difficile. En effet, les intensités de gris sur les

documents originaux montraient des secteurs saturés. Nous les avons néanmoins utilisés, tout en sachant qu'à certains endroits, l'information était difficilement utilisable et interprétable. C'était le cas pour le secteur de Jorf. Nous avons donc concentré nos efforts sur Hannabou. Sur la figure 2, on présente ce secteur en 1958, 1986 et 1995. On reconnaît les zones de palmeraies au nord-est et le secteur sableux au sud-ouest caractérisé par un champ de barkhanes.

4. Méthodologie

4.1. Préambule

D'un point de vue spectral, il convient de mentionner que la détection des changements à partir de données de télédétection doit être faite avec des détecteurs captant de l'information par l'intermédiaire des mêmes fenêtres spectrales. Il est aussi possible d'utiliser une carte thématique résultante d'une classification sur les différentes images lorsque les informations d'un même territoire proviennent de fenêtres spectrales différentes (MAUPIN, 1999, communication personnelle). De plus, la géométrie de visée (incluant une visée qui se rapproche le plus possible du nadir) ainsi que l'angle solaire (en fonction du moment de l'année et de l'heure du jour) constituent des variables non négligeables qui doivent aussi être semblables d'une plate-forme de détection à l'autre. Enfin, il est essentiel d'obtenir des informations à partir d'images numériques qui soient spatialement superposables et ce, avec une grande précision, surtout pour des petites unités spatiales (telles que les dunes) qui voisinent la résolution des capteurs. LILLESAND et KIEFFER (1994) suggèrent l'équivalent de 1/4 à 1/2 pixel. JENSEN (1996) propose comme précision une erreur quadratique moyenne de 1/2 pixel ou moins.

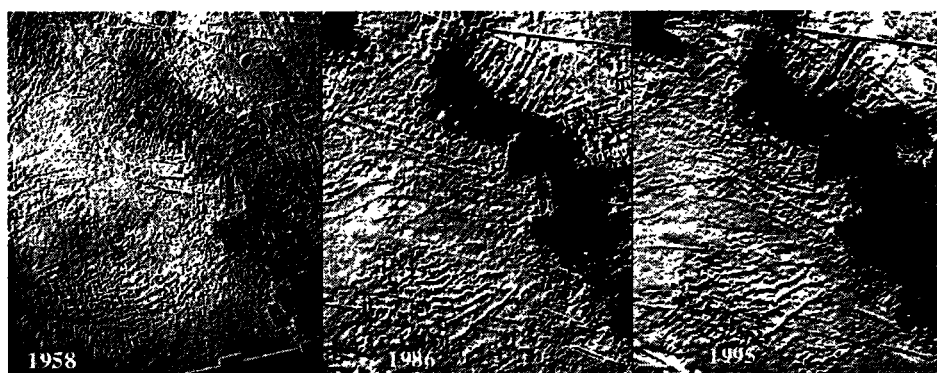


Figure 2. Visualisation des images corrigées géométriquement et rehaussées. Ce territoire couvre une superficie d'environ 12 km².

4.2. Approches retenues

JENSEN (1996) propose différentes étapes pour en arriver à une démarche scientifique de détection et d'analyse des changements (tableau 1).

Dans le cadre de notre recherche, les algorithmes retenus pour l'étude des changements et de leurs conséquences sont d'abord la différence normalisée entre les années d'acquisition des données c'est-à-dire 1958, 1986 et 1995 et l'analyse en composantes principales des données de 1958 et 1986 et de celles de 1986 et 1995. Enfin, nous utilisons des filtres morphologiques (morphologie mathématique) qui balaient les images combinées deux à deux afin d'isoler les dunes ou champs de dunes dans une perspective de vision de leur déplacement.

L'approche par différence normalisée consiste à soustraire, de la même façon qu'un indice de végétation (NDVI) la première bande de la seconde. En fait, l'expression mathématique de cette opération est la suivante :

$$\Delta_{(bandes1, 2)} = \frac{Bande2 - Bande1}{Bande2 + Bande1}$$

Tableau 1. Étapes générales de la détection des changements.

ÉTAPE	TITRE	SPÉCIFICITÉS
I	Présentation du problème	Description du site étudié Spécification de la fréquence du changement Identification des objets étudiés
II	Considérations significatives dans l'étude du changement	Présentation des aspects de la résolution (spatiale, spectrale, temporelle et radiométrique) des données de télédétection
III	Processus de traitement des informations	Acquisition des données appropriées : données de télédétection, données auxiliaires (rapports, cartes, données <i>in situ</i>) Pré-traitement des données numériques (corrections géométriques et radiométriques) Choix de l'algorithme de détection Cartographie des résultats
IV	Évaluation de la qualité des résultats	Critique sur la détection et discussion sur la précision
V	Production du résultat final	Production numérique Production sur papier

Contrairement à une simple différence ou à un rapport de bandes, cette formule permet de minimiser l'impact des différences d'illumination, les effets de pente et d'ombrage. L'expérimentation démontre de plus qu'on obtient une meilleure discrimination spectrale avec cette approche par rapport aux opérations mathématiques simples.

L'analyse en composantes principales est utile dans la détection des changements entre deux moments d'observation. Cette opération engendre de nouvelles bandes non corrélées entre elles et, selon la composante qui en résulte, permet de présenter sur une même image des informations provenant de deux images acquises à des moments différents. De plus, elle offre une meilleure perception visuelle du fait qu'elle élimine des premières composantes les bruits radiométriques. Sur la figure 3, on illustre la différence entre une différence normalisée (image de droite) et la deuxième composante principale (image de gauche) d'un secteur couvert par cette recherche. Il est visuellement plus facile de pouvoir bien distinguer les changements entre deux années avec l'approche par la composante principale. L'exemple de cette figure montre la dynamique spatiale du champ de dunes situé immédiatement à l'ouest du village d'Hannabou entre 1986 et 1995. Dans ce cas, sur les deux images, les teintes pâles correspondent à la localisation des dunes en 1986 et les foncées, en 1995. Ces approches sont efficaces lorsque les dunes sont suffisamment volumineuses et espacées pour détecter leurs changements spatiaux à partir de plates-formes satellitaires.

Une troisième approche a été retenue. Elle est basée sur une description spectrale et texturale de l'image, c'est-à-dire sur un regroupement de pixels voisins qui constituent en quelque sorte une unité spatiale (objet) sur l'image. On cite dans MAUPIN *et al.* (1997) que la base théorique sous-jacente de cette nouvelle perception des choses peut être décrite à l'aide de l'appareil conceptuel de la morphologie mathématique. Des approches ensemblistes telles que l'union et l'intersection intervenant entre l'élément structurant et l'image sous-jacente permettent d'extraire les éléments structuraux connexes. Pour notre recherche, des filtres morphologiques de taille croissante (FAS : filtre alterné séquentiel) sont appliqués sur l'image de différence (originale d'une différence normalisée ou autre).

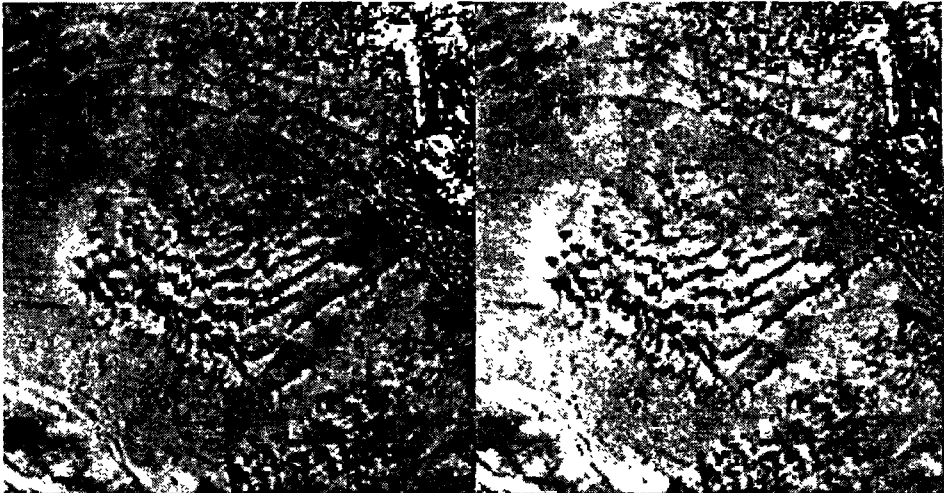


Figure 3. Résultats visuels des approches par différence normalisée (à gauche) et par analyse en composantes principales (à droite) pour les images de 1986 et de 1995.

Ainsi, on isole les changements en fonction de leur taille sur autant d'images qu'il y aura d'itérations lors de la création de la séquence de filtre. La figure 4 est le résultat de l'application de filtres morphologiques avec trois itérations sur l'image de différence 1986-1958. Notons qu'un rehaussement de contrastes a été effectué sur les images résultantes et ce, strictement dans le but d'améliorer la perception visuelle des changements. Leur localisation spatiale en est grandement facilitée.

5. Extraction et interprétation de l'information

Les premiers constats sont déduits des analyses faites à partir des images de 1986 et de 1995.

Pour le secteur situé près d'Hannabou, qui est illustré par la figure 3, force nous est de constater que l'approche par les composantes principales donne des résultats qui offrent visuellement le plus de contrastes. Elle est une source d'informations au sujet de l'orientation des champs de dunes organisés. Notons au départ l'influence du Sahéli (BELLANA, 1996). Il se manifeste en effet par la présence de constructions dunaires de type barkhanes immédiatement à l'ouest du village. Nous y notons en effet une composante SO-NE. Cependant, une autre y est clairement visible. Il s'agit de celle présentant des constructions orientées SE-NO. Entre les deux, il semble que la disposition des dunes fait en sorte que leur orientation change graduellement de la direction dominante à l'autre de façon radiale. De plus, nous constatons le manque de définition claire des formes dunaires dans leur front sud-ouest, laissant l'hypothèse qu'il y a eu reprise du mouvement des sables entre 1986 et 1995. De plus, la morphologie d'ensemble de certaines dunes dans ce secteur prend parfois l'allure d'une courbe qui a une orientation de départ vers le nord-est et qui, graduellement, change de direction pour se pointer franchement vers le nord-ouest. Pour mieux comprendre l'ensemble de l'organisation du paysage, sur la figure 5, on illustre la géographie physique générale du territoire étudié.

Grâce à des points de repère, il est possible d'évaluer, dans la limite de la précision des images, la distance parcourue par certaines dunes. Une évaluation sur les images corrigées géométriquement révèle que, à partir de 15 mesures manuelles, leur déplacement maximal a été d'environ 130 m entre 1986 et 1995 avec une valeur médiane de 104 m pour les

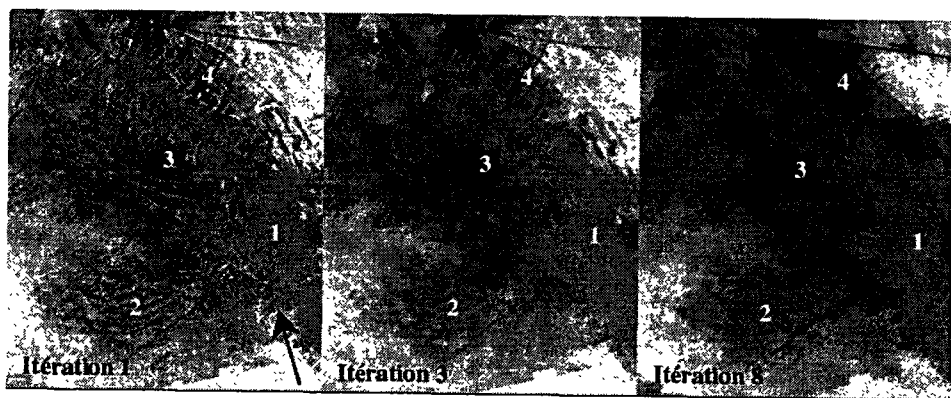


Figure 4. Conséquences visuelles de l'utilisation de filtres morphologiques sur le paysage changeant d'Hannabou en fonction du nombre d'itérations. La flèche indique le nord géographique.

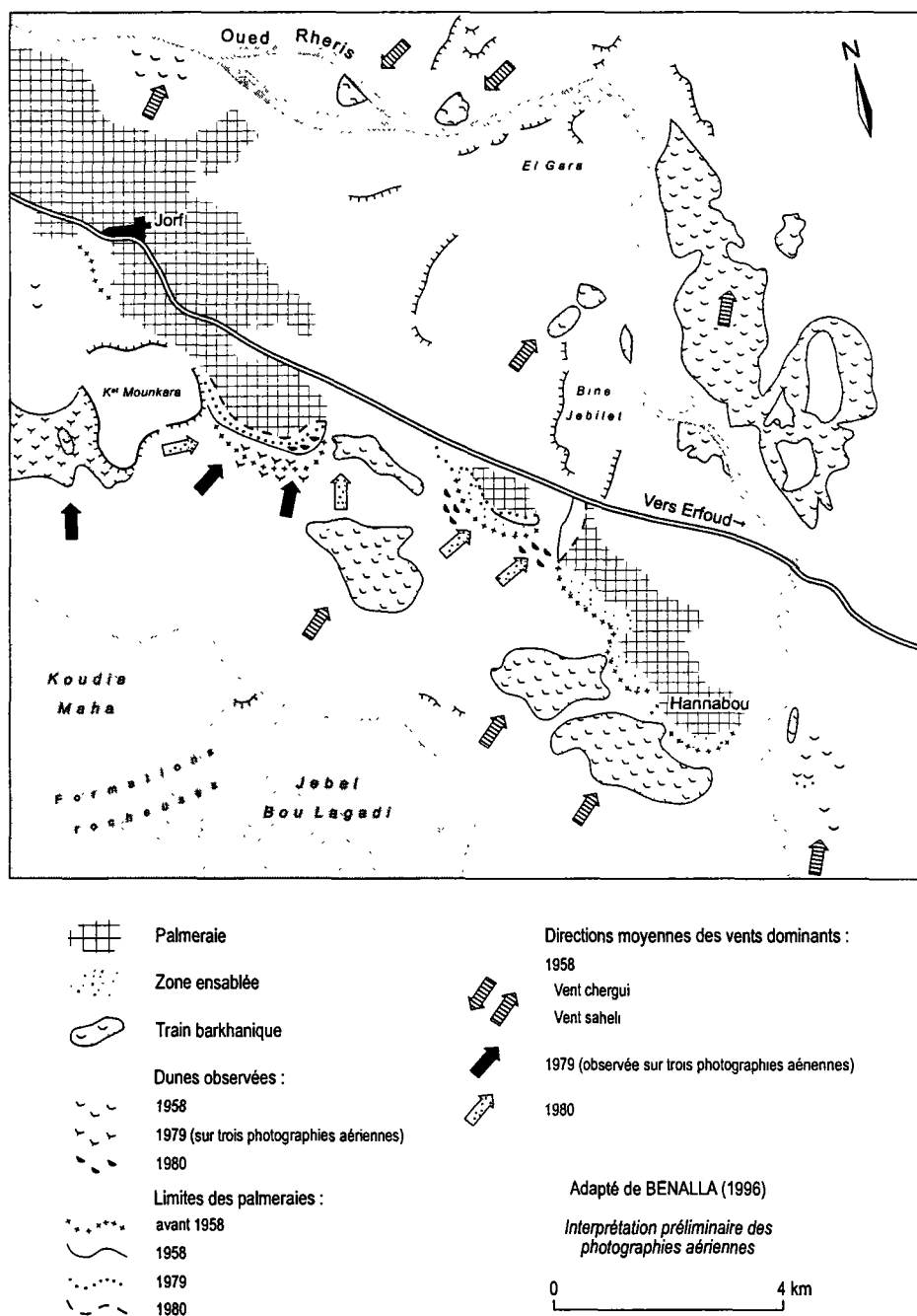


Figure 5. Présentation sommaire de quelques éléments de géographie physique pour le territoire étudié.

déplacements orientés vers le nord-est c'est-à-dire dans le sens du vent dominant. Pour la même période, l'avancée minimale a été évaluée à 20 m dans ce secteur. Ces différences sont liées à la taille des dunes ainsi qu'à leur position par rapport aux vents dominants. Ces mesures sont cependant discutables du fait qu'il est parfois difficile de s'assurer que la dune choisie est la même entre les deux années de mesures. La résolution spatiale du capteur (10 m) engendre aussi une imprécision. Cependant, notons à titre indicatif une étude réalisée dans la dépression de Khargé (désert libyque, sud de l'Égypte). On y présente des résultats comparables avec des déplacements de 10 m/an (ROBIN, 1995). Pour notre étude, seuls les critères d'observation visuelle, de déduction et de calcul manuel sont mis à contribution. Notons enfin que la tâche devenait de plus en plus difficile au fur et à mesure que nous tentions d'évaluer le déplacement de dunes spatialement de plus en plus rapprochées entre elles. Nous ne pouvions plus isoler les formes une à une à cause de la limite imposée par la résolution spatiale des images utilisées.

Suite à cette opération, nous avons sélectionné deux zones-échantillon afin d'évaluer le pourcentage de variation des zones ensablées entre 1958 et 1995 soit sur une période de 37 ans. Pour la zone située près de Jorf, nous avons pu cette fois-ci constater une augmentation de 18 % du territoire ensablé entre 1958 et 1995. Pour Hannabou, ce taux grimpe à 23 %. Statistiquement et en fonction du degré de précision de la correction géométrique, la marge d'erreur est de moins de 1 %. Cependant, en réalité, il y a aussi une imprécision du fait qu'il n'est pas toujours facile de fixer sur une image la limite de l'ensablement. Il y a là une subjectivité incontournable. Nous estimons quand même que ces chiffres sont représentatifs. Des observations sur le terrain confirment qu'il y a définitivement une avancée importante des sables dans les palmeraies de ces deux sites.

Par la morphologie mathématique, nous estimons qu'il est possible de détecter les espaces qui sont affectés par l'ensablement par l'intermédiaire de l'identification des zones de changement. En effet, cette approche peut indiquer des secteurs où la signature spectrale a changé. Sur la figure 4, les niveaux de gris correspondent à des amplitudes relatives de changements, qu'ils soient positifs (teinte pâle) ou négatifs (teinte foncée). Plus le nombre d'itérations augmente, plus l'algorithme rassemble des pixels ayant des valeurs numériques voisines. Cette compartimentation spectrale et spatiale fait en sorte qu'il est plus facile de détecter les grands ensembles avec leurs différents niveaux de changements. C'est le cas dans la sous-image à droite (itération 8). Il y a là un avantage indéniable au point de vue cartographie thématique. Sur cette figure, les secteurs qui n'ont que peu ou pas changé sont identifiés sur l'image (1). Par contre, nous remarquons que les aires où se localisent le champ de dunes et la limite sud-ouest de la palmeraie (2 et 3) sont, selon toute vraisemblance, des territoires où la signature a changé. Une zone 4 a subi évidemment des changements importants à cause de son mode d'occupation du sol (agriculture).

Des mesures acquises à l'aide des premières méthodes ainsi que des observations faites sur le terrain en 1993 et en 1995 confirment qu'il y a eu des changements dans les zones 2, 3 et 4. En effet, les déplacements de dunes dans la zone 2 ont été détectés et mesurés à cet endroit à l'aide des images de 1986 et de 1995. L'envahissement de la palmeraie d'Hannabou par le sable dans sa partie sud-ouest (zone 3) a été constaté sur le terrain. C'est à cet endroit que nous avons pu évaluer à 23 % la superficie ensablée entre 1958 et 1995. Enfin, les changements observés dans la zone 4 correspondent à des modifications de types de cultures dans les champs agricoles.

Dans un autre ordre d'idées, il convient de noter que les changements observés dans les zones sableuses (2 et 3) forment un axe dont la direction SO-NE correspond à celle du vent dominant pour la région, c'est-à-dire le Sahéli.

6. Conclusion

Dans cette recherche, nous avons tenté de démontrer comment la télédétection pouvait venir en aide à l'acquisition d'information, au traitement et à l'interprétation de territoires arides et semi-arides aux prises avec le problème de l'ensablement. Nous avons pu procéder à des mesures ainsi qu'à la détection de zones de changements. Cette expérimentation démontre qu'il est effectivement possible d'évaluer les déplacements, mais seulement lorsque nous sommes en présence de dunes bien formées et visuellement identifiables. De plus, les mesures ont une précision qui est déterminée par la résolution spatiale des images et par la facilité de distinguer les formes dunaires à l'aide de l'interprétation de l'image et des données auxiliaires d'une année de mesure à l'autre. La morphologie mathématique est une voie prometteuse dans la détection des aires où il y a eu des changements ou déplacement de matériaux dont le contenu laissait entrevoir un matériau spectralement homogène et le contenant, une forme bien définie. Dans une perspective d'application, les approches présentées se complètent et elles constituent une source d'information non négligeable. Cependant, nous pouvons constater qu'à l'heure actuelle, la connaissance intime du territoire à étudier et l'accès à des données auxiliaires demeurent essentiels à la réussite. Il est donc parfois nécessaire de fusionner des données très hétérogènes. De plus, dans une perspective quantitative, les informations satellitaires doivent être disponibles à une fréquence régulière et à une résolution spatiale encore plus fine. Pour le territoire étudié, une image tous les 10 ans semble une fréquence acceptable du fait que, pour ce laps de temps, il est encore possible d'observer le déplacement des organisations dunaires. Idéalement, la mise en place de témoins fixes sur le terrain qui seraient facilement identifiables à partir des plates-formes satellitaires constitue une assurance de résultats plus fiables. La télédétection s'avère enfin utile pour la localisation d'œuvres à construire et l'évaluation de leur efficacité à contrer l'avancée des sables sur des territoires fertiles.

7. Remerciements

Qu'il nous soit permis de remercier les responsables du programme FICU/AUPELF pour leur contribution financière à ce projet ainsi que l'ORMVAT (Office régional de mise en valeur du Tafilalet), Maroc, pour leur accueil, leur soutien logistique sur le terrain et pour la fourniture des données numériques et analogiques. Des remerciements s'adressent aussi aux responsables des Laboratoires et Départements (GÉOLAB/Université du Québec à Montréal, l'Institut scientifique, Département de télédétection/Université Mohammed V-Rabat, LIVIA/École de technologie supérieure, Université du Québec et l'Institut de traitement d'image/ENST BRETAGNE) pour leur soutien financier et matériel.

8. Références

- BENALLA, M. 1996. Érosion éolienne et ensablement dans le Tafilalet: cas des palmeraies de Jorf, Hannabou et El Krai. Mémoire de géologie appliquée, Faculté des sciences, Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 48 p.

- CALLOT, Y., MERING, C. and SIMONIN, A. 1994. Image-analysis and Cartography of Sand Hill Massifs on High Resolution Images: Application to the Great Western Erg (NW of Algerian Sahara). *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, n° 8, p. 3799 –3822.
- DERLIN ZINSOU, É. 1995. Sécheresse et désertification: l'engagement francophone. *Sécheresse*, vol. 6, n° 1, p. 5 - 6.
- FRÉROT, A. M. 1995. Une autre vision de la sécheresse: celle des enfants de la Mauritanie. *Sécheresse*, vol. 6, n° 1, p. 77 - 85.
- JAQUEMINET, C. 1990. Des indicateurs morphologiques pour mesurer le changement des milieux sahéliens à partir des images satellitaires à haute résolution. *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. (réd.). *Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse*. Collection Universités francophones - Actualités scientifiques, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 129 - 144.
- KARIMOUNE, S., OZER, A., TRÉFOIS, P. et GOOSSENS, E. 1993. Contribution de la télédétection et des mesures spectrales à l'étude de la désertification dans le secteur sahélien du Niger. *in* DUBOIS, J.-M., BOUSSEMA, M. R., BOIVIN, F. et LAFRANCE, P. (réd.). *Télédétection et ressources en eau*. Collection Universités francophones - Actualités scientifiques, Actes des Journées scientifiques de Tunis, Éditions AUPELF-UREF et Presses de l'Université du Québec, p. 273 - 281.
- JENSEN, J.R. 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 2^e édition, Prentice Hall, New York, 316 p.
- LILLESAND, T.M. and KIEFER, R.W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3^e édition, John Wiley and Sons Éd., Toronto, 750 p.
- MARIUS, C. 1995. Effets de la sécheresse sur l'évolution des mangroves du Sénégal et de la Gambie. *Sécheresse*, vol. 6, n° 1, p. 123 - 125.
- MAUPIN, P., LE QUÉRÉ, P., DESJARDINS, R., MOUCHOT, M.C., SAINT-ONGE, B. and SOLAIMAN, B. 1997. Contribution of Mathematical Morphology and Fuzzy Logic to the Detection of Spatial Change in Urbanized Area: Towards a Greater Integration of Image and Geographical Information Systems, *IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS '97)*, p. 207- 209.
- ROBIN, M. 1995. *La télédétection*. Nathan Éd., Collection Université/fac géographie, Paris, 318 p.
- YACOUBI, M., EL MOURID, M., CHBOUKI, N. et STOCKLE, C.O. 1998. Typologie de la sécheresse et d'indicateurs d'alerte en climat semi-aride marocain. *Sécheresse*, vol. 9, n° 4, p. 269 - 276.

15

Apport de la télédétection à l'étude de la transformation de l'agriculture et de l'environnement dans le département de Bignona (Sénégal méridional)

MAMADOU GUEYE et ANDRÉ OZER

Laboratoire de Géomorphologie et de Télédétection, Université de Liège, 2, allée du 6-Août, B11. Sart Tilman B-4000 Liège, Belgique; tél. : + 32 4 366 54 46; télécopie : +32 4 366 57 22

Résumé

Pour étudier les mutations spatiales qui affectent les systèmes de production agricole et l'environnement, les méthodes traditionnelles de recherche sont, souvent, très limitées. Ainsi, la télédétection se révèle comme un outil très précieux, permettant de disposer d'une lecture synthétique et de mesures spatialisées très précises. Dans cette étude, centrée sur le département de Bignona (Sénégal méridional), l'utilisation des possibilités offertes par la télédétection nous a permis, grâce à une analyse analogique diachronique des photographies de 1954 et des images TM de Landsat de 1990, de mettre en évidence, la transformation profonde du système de production traditionnel. Celle-ci est accusée par le développement des cultures sèches (+137 %) et la colonisation agricole des plateaux, jusqu'ici occupés par la forêt.

Les enquêtes effectuées sur le terrain, en marge de l'interprétation des images, ont montré que, concomitamment aux recompositions spatiales des territoires de l'agriculture, de nouvelles façons de faire et de nouvelles stratégies sont promues par les populations. Ainsi, le dévoiement du modèle de subsistance s'accompagne d'une dégradation des ressources naturelles agricoles. Dans les trois terroirs villageois ciblés par l'étude, nous avons mesuré une réduction moyenne de 66 % de la superficie forestière. Cette importante déplétion de la couverture végétale et la promotion de pratiques de plus en plus inadaptées

accélérent la dégradation des ressources pédologiques et placent la région dans une crise écologique sans précédent.

1. Introduction

Décrit par plusieurs auteurs parmi lesquels PELISSIER (1966), le système de production agricole traditionnel dans le département de Bignona, comme dans l'ensemble de la Basse Casamance tire son originalité du fait qu'il s'appuie sur la pratique presque exclusive de la riziculture inondée et la mise en œuvre de techniques d'aménagement originales. Contrairement aux autres régions agricoles du pays, ici, la première phase de colonisation agraire n'a pas revêtu la forme d'un défrichement par la hache et le feu.

Grâce à leur ingéniosité technique, les populations ont exploité les capacités du milieu naturel en installant une agriculture parfaitement sédentaire et adaptée. Les pratiques culturelles ont ainsi permis d'atteindre des niveaux de production garantissant à la paysannerie une sécurité alimentaire et des conditions de vie satisfaisantes. Aussi, les pressions exercées sur le milieu avaient-elles des impacts faibles en raison de leur caractère discontinu et peu intense.

Aujourd'hui, ce système de production traditionnel a subi de profondes mutations. La pression d'influences extérieures et la nécessité de faire face aux contraintes physiques de l'environnement ont en effet conduit à la promotion de pratiques nouvelles, ou tout au moins jusqu'ici marginales. Ainsi, l'hypothèse principale que nous formulons au départ de notre analyse est que la riziculture inondée, toile de fond du système de production n'est plus le modèle dominant. Les cultures gagnent de plus en plus les plateaux, restés jusqu'ici agricole marginaux, pendant qu'on assiste à l'émergence de nouveaux rapports de production et à un ajustement des pratiques.

Comme hypothèse secondaire, on postule que la modification du système de production traditionnel s'accompagne d'une perturbation des équilibres de l'environnement. Cette crise écologique serait le résultat du dévoiement du système de production traditionnel, de la récession climatique et, surtout, de la promotion de pratiques agricoles de plus en plus inadaptées par des populations ayant de plus en plus du mal à arbitrer entre le court et le long terme.

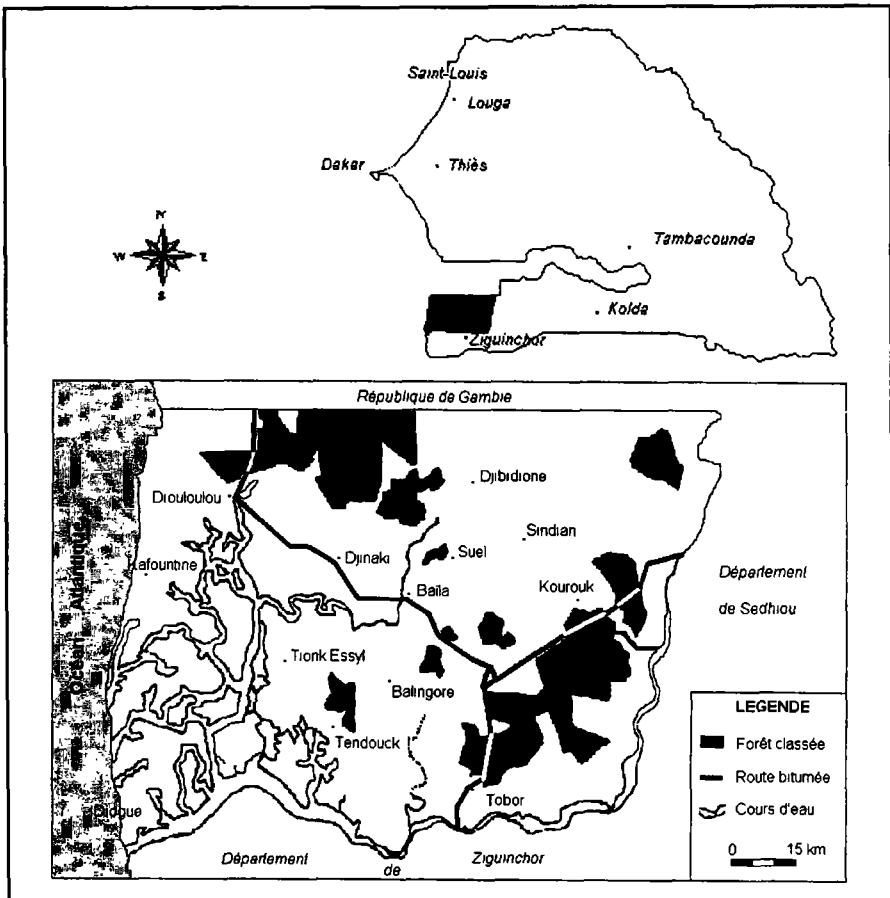
L'objet de notre étude est donc, d'une part, d'identifier à travers les mutations spatiales les stratégies agricoles actuelles et, d'autre part, de s'interroger sur l'état réel du milieu naturel en rapport avec les pratiques agricoles. Elle se justifie par la nécessité, au regard des multiples problèmes de développement qui se posent, de disposer d'un diagnostic clair des problèmes, susceptible de promouvoir des stratégies d'intervention pour un développement équilibré. Ainsi, à travers cette réflexion, nous nous proposons d'atteindre les objectifs suivants :

- comprendre les mutations des systèmes de production et contribuer à la connaissance des phénomènes et des mécanismes qui contrôlent la dégradation de l'environnement dans cette région qui abrite l'une des plus grandes paysanneries sénégalaises,
- mettre à la disposition des autorités de gestion des informations susceptibles d'améliorer la pertinence des politiques agricoles et la gestion des ressources naturelles.

2. Contexte géographique de l'étude

Le champ géographique envisagé dans cette étude est celui du département de Bignona, situé dans la région naturelle de la Basse Casamance, sur la rive droite du fleuve Casamance. Il s'étend sur une superficie de 5 295 km², entre 12° 35' et 13° 21' de latitude nord et 14° 17' et 16° 47' de longitude ouest. Il est limité à l'est par le département de Sédhiou, à l'ouest par l'océan Atlantique, au nord par la Gambie et au sud par le département de Ziguinchor (figure 1).

Le département de Bignona doit à son appartenance au bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, une structure géologique très simple. Sur le socle paléozoïque formé principalement de schistes, de grès quartzites et de rhyolites reposent des formations calcaires et marno-calcaires du Secondaire et des grès argileux du Tertiaire. Le Quaternaire est représenté dans la partie sud-ouest et le long des cours d'eau, par des dépôts fluvio-marins argilo-sableux et des dépôts continentaux sous forme de cordons littoraux, le long de la côte (AUDIBERT, 1966).



Le relief est très peu accidenté, l'altitude maximale ne dépassant guère 40 m et diminuant légèrement vers le sud ouest. Les différentes unités géomorphologiques ont été façonnées à la faveur des phases climatiques contrastées du Quaternaire. Des héritages paléoclimatiques de sols, de végétation et de modelés se succèdent sur les toposéquences. Ceux-ci sont en déséquilibre avec les conditions climatiques actuelles et sont, par conséquent, très vulnérables (GUEYE, 1995).

Le climat est de type sud soudanien, avec une forte influence maritime et une seule saison des pluies de juin à octobre. Le régime hydrologique est contrôlé par les eaux météoriques qui alimentent saisonnièrement les nappes et les cours d'eau. Cependant, depuis quelques décennies, le déficit pluviométrique cumulé a considérablement augmenté l'influence de la mer (GUEYE, 1999).

Le département compte une population estimée, en 1998, à 216000 habitants. Les activités économiques sont assez diversifiées mais elles sont largement dominées par l'agriculture qui emploie environ 80 % de la population active estimée à 40 % de la population totale (DPS, 1992). De manière générale, c'est un milieu relativement homogène avec des caractéristiques éco-géographiques représentatives de l'ensemble de la région naturelle de la Casamance et tranchant nettement avec celles que l'on rencontre généralement dans les autres régions du Sénégal.

3. Méthodologie

La télédétection satellitaire et les systèmes d'information à référence spatiale, sont des outils de reconnaissance très précieux, ils fournissent des informations que les techniques traditionnelles de recherche (enquêtes, observations directes etc.) ne permettent pas d'avoir. Dans le cadre de ce travail, nous avons tenté de produire une cartographie permettant une lecture synthétique et aisée des recompositions spatiales et des données quantitatives précises. Pour atteindre ces objectifs, trois étapes ont été nécessaires : 1) choix des photographies aériennes et des images, 2) superposition des photographies aériennes et des images et 3) photo-interprétation assistée par ordinateur et cartographie.

3.1. Choix des zones d'observation, des photographies aériennes et des images

L'étendue de la zone d'étude et le souci de disposer d'images à grande échelle nous a conduit à procéder à un choix de zones d'observation représentatives de l'ensemble de la région étudiée. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur la classification de l'Institut sénégalais de recherche agronomique (POSNER *et al.*, 1991) qui subdivise le département en trois situations agricoles. Selon la définition des auteurs de la typologie, chaque situation agricole représente des unités spatiales subissant des contraintes homogènes et reconnaissant un potentiel comparable, de sorte que les producteurs qui exploitent cet espace relèvent d'une même stratégie. Les critères de découpage utilisés sont : la division du travail en fonction du sexe des travailleurs, les proportions respectives des surfaces en cultures exondées et inondées ainsi que l'utilisation de la traction bovine. Les critères ont donc trait aux modes d'exploitation des ressources des zones considérées et non aux caractéristiques de celles-ci. Ainsi, la prise en compte de l'ensemble des situations se révèle-t-elle judicieuse pour rendre compte de la diversité des stratégies mises en œuvre et pour disposer d'une lecture complète des tendances actuelles des systèmes de production.

Nous avons ainsi choisi trois terroirs agricoles et leurs environs (Suel, Tendouck et Kourouk), représentatifs chacun d'une situation agricole donnée. La zone choisie couvre une superficie d'environ 30 000 ha et regroupe l'ensemble des caractéristiques éco-géographiques présentes dans la région.

La seconde démarche a été la recherche d'images et de photographies aériennes en fonction des vols accessibles. Nous avons ainsi, pu disposer des photographies aériennes au 1 : 50 000 de la Mission A.O.F (068-1954 ND 28 II) du 01-02-1954 disponibles à l'IGN (France) et des images TM de Landsat (analysées en composition colorée 4 3 2) du 16-11-1990. Pour l'année 1954, les photographies n° 186, 187 (Kourouk et ses environs), 217, 218 (Suel et ses environs), 247 et 248 (Tendouck et ses environs) ont été choisies tandis que, pour l'année 1990, nous avons extrait des fenêtres correspondant aux zones couvertes par les photographies, dans les images TM de Landsat numérotées 204-51 et 205-51 de la banque de données du Centre de suivi écologique de Dakar.

3.2. Superposition des photographies aériennes et des images

La superposition a consisté à rectifier les images les unes par rapport aux autres de manière à avoir, pour l'ensemble, le même système de coordonnées qui nous a permis, d'une part, de faire des mosaïques (assemblage de plusieurs photos consécutives d'une même bande en respectant la ligne de vol) avec les photographies de 1954 pour chaque zone étudiée et, d'autre part, de rendre superposable chaque mosaïque avec l'image TM correspondante. La rectification se justifie par le fait que les photographies et les images prises à des altitudes, des moments et avec des appareils et des lignes de vol différents n'ont pas les mêmes échelles et les mêmes déformations. Dès lors, il est impossible d'obtenir une superposition parfaite. Ainsi, avons-nous rectifié l'image TM en utilisant comme référence les photographies aériennes de 1954 au 1 : 50000.

La rectification a été essentiellement basée sur une approche polynomiale et les différentes étapes ont été : le choix des points de contrôle au sol (PCS), l'ajustement d'une fonction de correction géométrique et enfin, le rééchantillonnage.

Étant donné que, pour avoir une bonne rectification, il est souhaitable de multiplier les points de contrôle tout en les répartissant sur toute l'image, nous avons à chaque fois choisi entre 40 et 50 points.

Nous avons procédé ensuite à la rectification consistant à convertir les coordonnées sources en coordonnées rectifiées en utilisant une matrice de transformation calculée à partir des PCS et dont les coefficients définissent le modèle de changement de repère qui minimise la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et les valeurs estimées. L'erreur quadratique moyenne acceptable a été fixée à deux pixels.

L'image finale a été obtenue après un ré-échantillonnage au plus proche voisin. Après avoir procédé à l'ensemble des superpositions, nous avons effectué, sur l'ensemble des images, un rehaussement des contrastes par étallement linéaire. Les images ont été ensuite transférées dans ARC/INFO, pour procéder à la photo-interprétation assistée par ordinateur (PIAO) et la cartographie.

3.3. Photo-interprétation assistée par ordinateur et cartographie

En rapport avec les objectifs que nous nous sommes fixés, nous avons commencé par déterminer les thèmes à cartographier. Pour ce faire, nous avons adopté une démarche utilisant à la fois les outils de la photo-interprétation traditionnelle tels que la couleur, la

texture, la forme et ceux de la PIAO comme les fonctions de traitements d'image et d'édition graphique qui permettent de tracer les zones. Le découpage proposé a été réalisé en fonction des données recueillies sur le terrain et de la disponibilité d'information provenant d'autres sources : cartes topographiques au 1 : 50 000 (SGD, 1957), carte de la végétation au 1 : 500 000 (ANONYME, 1986).

Un relevé sur le terrain a permis de contrôler et de valider les résultats de l'interprétation avant que ceux-ci ne soient générés sous forme cartographique.

En sus de ces différentes démarches, nous avons effectué des enquêtes semi-structurées et des observations *in situ* dans les différents terroirs télédéectés qui nous ont permis de compléter les données recueillies par des informations pertinentes sur les motivations réelles des populations et leurs pratiques ajustées en fonction des contraintes actuelles.

4. Résultats et discussion

4.1. Transformation de l'agriculture : recompositions spatiales et émergence de nouvelles pratiques.

L'analyse analogique diachronique révèle des mutations spatiales très importantes dans le système de culture. Réduits en 1954 à quelques tâches éparpillées aux alentours des villages et des forêts, les champs de culture sèches ont connu une forte progression atteignant 218 %, 109 % et 84,6 % respectivement à Kourouk, Suel et Tendouck (figures 15-2, 15-3, et 15-4) (voir cahier couleur). Sur l'ensemble des terroirs, ils sont passés de 3 048 à 6 643 ha (tableau 1) soit une progression de 137 %. Ces données traduisent une accélération vertigineuse de la colonisation agricole des plateaux au cours des quatre dernières décennies.

Celle-ci met en évidence une véritable transformation du système jadis fondé sur la riziculture inondée. Les terres de plateau restées jusqu'ici marginales sont devenues le centre nerveux de l'activité agricole sur l'ensemble du département. Les cultures de plateau occupent 60 % des surfaces cultivées à Tendouck, 64 % à Suel et 74 % à Kourouk.

Tableau 1. Comparaison de l'occupation du sol (en hectares) entre 1954 et 1990 dans les trois zones étudiées.

Occupation	Tendouck			Suel			Kourouk		
	1954	1990	Écart	1954	1990	Écart	1954	1990	Écart
Cultures sèches	535	1 703	1 168	1 234	2 579	1 345	1 279	2 361	1 082
Forêts	1 392	565	-827	2 876	773	-2 103	3 392	1 150	-2 242
Forêts dégradées	865	858	-7	788	583	-205	535	1 200	665
Savanes arborées	1 198	808	-390	2 661	787	-1 874	1 695	2 873	1 178
Jachères	1 602	1 706	104	2 078	4 914	2 836	2 549	1 881	-668
Tannes	240	1 092	852	76	501	425	-	-	-
Mangroves	868	782	-86	276	143	-133	-	-	-
Rizières inondables	1 900	1 086	-814	1 711	1 420	-291	750	735	-15
Total	8 600	8 600		11 700	11 700	11 700	10 200	10 200	

En comparant la situation des trois terroirs, on peut se rendre compte que cette transformation ne s'est pas opérée au même moment. Il y a eu des décalages dans le temps qui s'expliquent par des facteurs sociologiques, géomorphologiques et pédo-climatiques.

Sachant que les sols, en raison de leur pauvreté, sont rarement ou presque jamais cultivés de manière consécutive plus de dix années et connaissant le cycle de l'évolution forêt, culture, jachère, savane (figure 5), on peut aisément supposer les périodes de transition.

Dans le terroir de Kourouk et ses environs (figure 15-2) (voir cahier couleur), le rapport cultures de plateau et riziculture inondée était déjà favorable aux premières en 1954 contrairement aux autres terroirs. À Suel et ses environs (figure 15-3) (voir cahier couleur), on peut penser, au regard de l'importance des terres laissées en jachère, que la rupture s'est opérée au cours des années 1970. Enfin, dans le terroir de Tendouck et ses environs (figure 15-4) (voir cahier couleur), la transformation est plus récente, attestée par la superficie restée peu importante des terres en jachère et la diminution des superficies occupées par la forêt et la savane.

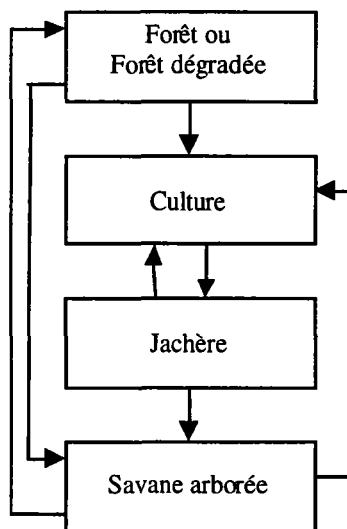


Figure 5. Cycle de l'évolution forêt, culture, jachère et savane.

Tout compte fait, la promotion des cultures sèches apparaît comme la toile de fond des stratégies agraires actuelles, dans l'ensemble des terroirs, ce qui traduit une uniformisation des stratégies agraires.

Les cultures sèches regroupent plusieurs spéculations : le mil, le sorgho, le maïs, l'arachide et le riz pluvial. Les enquêtes révèlent certaines rotations pour les différentes spéculations mis à part le maïs cultivé en champ de case de manière continue. L'arachide est soit en tête de rotation sur nouvelle défriche, soit en alternance avec des jachères annuelles. Le mil et le sorgho suivent une culture d'arachides ou alternent avec des jachères annuelles. Le riz pluvial strict est généralement cultivé après une longue jachère ou une longue défriche. En terme de superficies occupées, les enquêtes ont révélé que l'arachide est la culture dominante sur le plateau. Elle couvre une superficie moyenne annuelle (1987-1997), d'environ 15 300 ha, sur l'ensemble du département, pour une production de 15 400 t destinées à la commercialisation.

En somme, l'organisation traditionnelle de l'espace caractéristique d'un système fondamentalement axé sur la riziculture de bas-fonds a subi une profonde destructuration. La dynamique spatiale actuelle est orientée par le développement des cultures sèches et notamment celle de l'arachide sur les terres de plateau.

Avec la colonisation agricole des terres de plateau, le mode intensif d'exploitation de la terre est remis en cause au profit d'une stratégie extensive. L'utilisation de l'engrais organique, qui était une pratique systématique et généralisée, ne concerne plus que 56 % des paysans et l'engrais chimique est utilisé seulement par 4 % (POSNER *et al.*, 1991). Les facteurs de production modernes tels que les semences sélectionnées, la traction animale etc. sont d'une utilisation très peu répandue.

Étroitement liée à la conquête des terres de plateau et à la faiblesse de l'équipement agricole, la pratique des feux de brousse occupe aujourd'hui, une place de choix dans les activités agricoles. CONDAMIN (1988) note qu'« avant 1970, les forêts ne brûlaient presque jamais, car les populations locales qui appartiennent à des ethnies forestières, ont toujours eu besoin de la forêt pour leur subsistance, la cueillette de diverses plantes alimentaires et de pharmacopée, le bois de chauffe, la chasse etc. ».

Aujourd'hui, la pratique du feu est une activité courante dans les activités agricoles. Le feu est utilisé, comme moyen de défrichement et pour pallier les carences du sol en éléments minéraux, avec une fréquence plus importante sans dispositif de contrôle. Ainsi, de vastes superficies sont annuellement brûlées (32 400 ha en 1994) comme en témoignent les statistiques établies par le Centre de suivi écologique à partir de l'imagerie satellitaire (BADJI, 1996).

À côté de ces nouvelles pratiques agricoles associées à la transformation de l'agriculture, on assiste à l'émergence d'activités extra-agricoles de création de rente, centrées sur l'exploitation des produits forestiers (cueillette, charbonnage, récolte de bois d'œuvre etc.). Ces activités sont une réponse à la baisse des productions vivrières et au déficit vivrier. Elles permettent aux populations de se procurer du numéraire pour gérer les périodes de soudures.

4.2. Crise de l'environnement : une conséquence de la recomposition non contrôlée des territoires agricoles et des pratiques associées

La crise de l'environnement n'est pas abordée ici dans sa globalité, la réflexion s'appuyant avant tout sur les données fournies par l'analyse analogique des images et les informations recueillies sur le terrain au cours de nos missions. Ainsi, évoquons-nous seulement, l'état de la végétation et des sols.

L'étude diachronique des images met en évidence une dégradation généralisée de la forêt. Celle-ci a connu une régression moyenne de 66 %. Le terroir de Suel et ses environs sont les plus touchés avec une réduction de 73 %. Vient ensuite Kourouk et puis Tendouck avec respectivement 66 % et 59% (tableau 1). L'ampleur de la pression exercée sur les ressources forestières est telle qu'elle n'épargne pas les forêts classées qui, malgré la protection juridique dont elles jouissent, se sont considérablement rétrécies.

Les défrichements cultureux sont les principaux facteurs de la dégradation des forêts. Mais, ils ne sont pas les seuls : l'exploitation du bois, les feux de brousse et le déficit hydrique jouent un rôle déterminant dans la généralisation d'éclaircies au sein des massifs forestiers. C'est le cas dans les forêts classées de Kourouk (figure 15-2) (voir cahier couleur) et de Tendouck (figure 15-4) (voir cahier couleur) où la proportion de la forêt dégradée a considérablement augmenté.

Malheureusement, la dégradation de la forêt ne se limite pas à une réduction des superficies occupées par celle-ci et à leur remplacement par la jachère, les champs de culture, la savane ou la forêt dégradée : elle s'accompagne d'une baisse insidieuse de la diversité spécifique.

Une recherche approfondie sur les études menées dans la région et les inventaires forestiers ainsi que les enquêtes menées auprès des populations, font ressortir une nette régression des espèces primitives à affinité guinéenne qui sont remplacées par des formations secondaires de type soudanien (*Prosopis africana*, *Parkia biglobosa*, *Pterocarpus erinaceus*, etc.). Une étude récente de VANDEN-BERGHEN (1994) met en évidence des associations comme celle à *Malacantha alnifolia* et *Zanthoxylum zanthoxyloides* et celle à *Malacantha alnifolia* et *Cnestis ferruginea* auxquelles aucun auteur antérieur ne fait allusion, ce qui témoigne de la profondeur des changements intervenus dans la composition floristique.

Des espèces comme *Daniellia ogea*, *Mammea africana*, *Treculia africana* et *Guibourtia copalifera*, sont en voie de disparition; les populations que nous avons rencontrées sur le terrain tout comme les agents des eaux et forêts sont unanimes sur la question. Mais, le plus inquiétant vient du fait que certaines espèces signalées dans les travaux de AUBREVILLE (1948) et du père BERHAUT (1967) n'apparaissent plus dans les inventaires forestiers, ce qui conforte l'hypothèse de leur disparition. Ces espèces sont, par exemple, *Coelocaryon disticha*, *Heisteria parvifolia*, *Ouratea vogeli*, *Piptadeniastrum africanum*, *Cathormion altissimum* (WELE, 1996 et GUEYE, 1999).

En somme, les ressources végétales subissent une forte perturbation consécutive à la transformation de l'agriculture et surtout à des pratiques anthropiques de plus en plus inadaptées. Au niveau écologique, ceci constitue une véritable catastrophe en raison de la place de cet écosystème dans l'équilibre écologique du milieu. Conjugée à l'agressivité qui caractérise les pluies dans la région, la dégradation de la végétation est le principal vecteur de l'accélération de l'érosion hydrique, de la pollution physique des zones basses et de la baisse de fertilité des sols.

Les pertes de terre par érosion sont estimées (ANONYME, 1986) au niveau des sols de plateau, où le phénomène est le plus inquiétant, entre 10 t/ha et 50 t/ha (50 t/ha et par an correspond à 3 mm de perte annuelle d'épaisseur). En situation naturelle, l'érosion dans un sol forestier est de 0,03 à 0,20 t/ha et par an (ROOSE, 1977).

Si la tendance actuelle persiste, le risque serait d'atteindre 50 à 200 t/ha. L'érosion fait aujourd'hui partie des contraintes majeures soulevées par les paysans lors de nos entretiens et nous avons pu le vérifier par l'importance du ravinement le long des pentes.

Cette importante remobilisation sédimentaire est à l'origine de la pollution des bas-fonds inondables qui constitue après la salinisation et l'acidification, la contrainte la plus sérieuse pour l'riziculture inondée. L'accumulation des érodats sableux dans les bas-fonds accroît l'infiltration de l'eau, réduit les durées d'inondation et compromet l'alimentation suffisante en eau des plantes.

Enfin, la perte de fertilité consécutive à l'érosion mais aussi des mauvaises pratiques agricoles constitue un réel problème de l'évolution actuelle des sols. Celle-ci découle du fait que, contrairement à une idée largement répandue, les sols forestiers des plateaux sont pauvres et fragiles. Seule la présence des arbres permet de maintenir la fertilité par un recyclage de la matière organique car le climat ne favorise pas l'accumulation de l'humus qui recule rapidement sous l'effet de la chaleur et de l'humidité. Soumis à une agriculture itinérante sur brûlis, sans utilisation d'amendement et avec des temps de jachères de plus en plus courts, les sols accusent aujourd'hui une perte de fertilité de plus en plus prononcée qui se traduit par une chute des rendements que le paysan cherche le plus souvent à compenser par une extension des défrichements.

Au total, les changements dans l'environnement révèlent une véritable situation de crise. Celle-ci résulte des contraintes de plus en plus importantes d'un système de production ajusté sur un milieu dont le seuil de sensibilité a été abaissé. Si la tendance actuelle persiste, la situation risque de se solder par une véritable catastrophe écologique,

d'où la nécessité de construire des modèles d'aménagement qui intègrent des impératifs de conservation.

5. Conclusion

Cette étude nous a amené à faire le constat que le système de production agricole de la Basse Casamance a subi des mutations profondes. L'utilisation de la télédétection nous a permis, au travers d'une analyse analogique diachronique couplant des photographies aériennes de 1954 et une image TM prise un peu plus de trois décennies plus tard (en 1990), de mettre en évidence les recompositions spatiales et, notamment, le déplacement de l'essentiel des activités de bas-fonds vers les terres hautes. Elle nous a aussi permis d'avoir des données quantitatives précises sur les différentes mutations intervenues (tableau 1).

L'analyse a montré également, concomitamment au dévoiement progressif du système de production, une crise sans précédent, marquée par une perturbation des équilibres agro-écologiques. En effet, les forêts, fragilisées par le déficit hydrique, reculent sous la pression sans cesse croissante des cultures sèches et des activités émergentes de création de rente. Aussi, les sols se dégradent en raison des mauvaises pratiques agricoles qui accélèrent l'érosion et entraînent une baisse de fertilité. Plongés dans un cercle vicieux, les paysans, ayant de plus en plus de mal à arbitrer entre le présent et le futur, promeuvent des stratégies de survie qui accentuent le traumatisme de l'environnement.

Pour faire face à cette situation qui risque de s'aggraver dans l'avenir, des mesures urgentes et hardies sont nécessaires. Ainsi, au regard des problèmes soulevés, nous pensons que celles-ci, doivent s'orienter, d'une part, vers un renforcement et une amélioration du cadre institutionnel et juridique et, d'autre part, vers la promotion de stratégies de gestion durables. Dans cette perspective, il serait intéressant d'envisager des activités de recherche interdisciplinaire basée sur la télédétection en vue de produire une cartographie précise des contraintes et des potentialités du milieu en rapport avec les formes d'utilisation actuelles. Cette démarche permettra aux autorités de gestion et aux différents acteurs d'avoir une bonne visualisation des terroirs et des différents domaines agricoles afin de mieux prévoir l'impact des activités.

6. Remerciements

Nous tenons à témoigner notre profonde gratitude au lieutenant Babacar DIONE, chef du secteur des Eaux et Forêts de Bignona pour l'accueil chaleureux qu'il nous a réservé lors de nos différentes missions sur le terrain. Nous remercions également, Messieurs Souleymane DIOP, Alioune DIOUF et Abdoulaye WELE du Centre de suivi écologique de Dakar pour avoir facilité l'accès aux données satellitaires

7. Références

- ANONYME, 1986. Cartographie et télédétection des ressources de la république du Sénégal. Etude de la géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols. DAT/USAID/RSI, 653 p.
- AUBREVILLE, A., 1948. La Casamance. Agronomie tropicale, vol. III, n° 1-2, p. 25-52.
- AUDIBERT, M., 1966. Étude hydrogéologique de la nappe profonde du Sénégal: « nappe maestrichienne ». BRGM, Paris, 105 p.
- BADJI, J.E., 1996. Impact des feux de brousse sur la végétation dans le département de Bignona. Mémoire de DEA, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 52 p.
- BERHAUT, J., 1967. Flore du Sénégal. Édition Clairafrique, Dakar, 487 p.
- CONDAMIN, M., 1988. Dégénération anthropique des forêts de Basse Casamance. *Notes de Biogéographie*, 3 - Dép. de géo., Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, p. 115-120.
- DPS (Direction de la prévision et de la statistique) 1992. Recensement général de la population et de l'habitat de 1988. Rapport régional, Ziguinchor, 45 p.
- GUEYE, M., 1995. Sécheresses hydro-climatiques et modifications du milieu naturel dans le bassin de la Casamance. Mémoire de maîtrise, Université de Saint-Louis du Sénégal, 116 p.
- GUEYE, M., 1999. Transformation du système de production agricole et crise de l'environnement dans le département de Bignona (Sénégal méridional). Eléments pour une gestion durable des ressources naturelles agricoles. Mémoire de DES, Université de Liège, 78 p.
- PELISSIER, P., 1966. Les paysans du Sénégal : les civilisations du Cayor à la Casamance. Ed. Saint Yrieux, Imprimerie Fabrègue, 954 p.
- POSNER, J., KAMUANGA, M. and LO, M., 1991. Lowland cropping systems in the lower Casamance of Senegal : results of four years of agronomic research (1982-1985). MSU International Development Papers, 129 p.
- ROOSE, E., 1977. Érosion et ruissellement en Afrique de l'ouest. Vingt ans de mesures en petites parcelles expérimentales. ORSTOM, *Série Travaux et Documents*, n° 78, 108 p.
- SGD (Service géographique de Dakar) 1957. Carte topographique de l'Afrique de l'ouest. Feuilles Ziguinchor 4a, 4c et 4d.
- VANDEN-BERGHEN, C., 1994 : La culture itinérante sur des brûlis, en Basse Casamance occidentale (Sénégal méridional) L'évolution de la végétation. In LEJEUNIA, Nouvelle série n°144, p. 1-26.
- WELE, A., 1996. Contribution à l'étude de la phytogéographie et de l'écologie des espèces ligneuses de la Basse Casamance (Sénégal). Mémoire de DES, Université de Liège, 60 p.

16

Utilisation des indices décrivant la forme des spectres pour l'évaluation de la dégradation des sols d'un milieu semi-aride au sud-est de l'Espagne

DRISS HABOUDANE ¹, FERDINAND BONN ¹, ALAIN ROYER ¹,
STEFAN SOMMER ² et WOLFGANG MEHL ²

¹ CARTEL, Université de Sherbrooke, 2500 boul. de l'Université, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1; téléphone : +1 (819) 821-8000 poste 1042; télécopieur : +1 (819) 821-7944; courriel : driss.haboudane@hermes.usherb.ca

² Environment and Geoinformation, Space Applications Institute, Joint Research Centre, I-21020 Ispra (VA), Italie; téléphone : +39-332-789631; télécopieur : +39-332-789469; courriel : stefan.sommer@jrc.it

Résumé

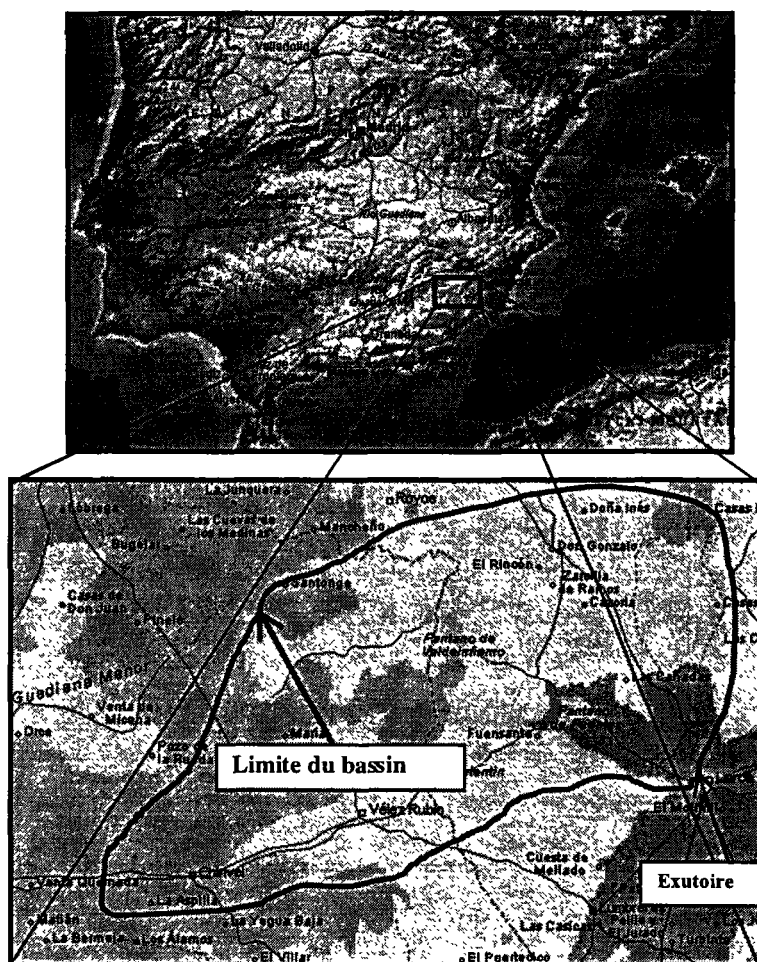
Dans les milieux arides et semi-arides où la végétation verte est généralement peu couvrante, les sols nus occupent la majeure partie de l'espace et leurs propriétés spectrales dominent le signal télédétekté. La variation de ces propriétés exprime les changements majeurs affectant les sols lors des phénomènes de dégradation, d'où la présente recherche dans laquelle on vise à utiliser les techniques de télédétection pour caractériser la dégradation des sols selon deux approches : l'utilisation d'indices décrivant la forme des spectres et l'analyse par déconvolution spectrale. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'indices spectraux intégrant des bandes du moyen infrarouge (TM5 et TM7) permet de mieux discriminer différents niveaux de dégradation des sols et que la déconvolution spectrale possède un potentiel élevé pour la caractérisation de la dégradation des sols et l'identification des unités de terrain susceptibles à la dégradation. L'approche adoptée a permis de dégager les conclusions suivantes : 1) les propriétés optiques de la

surface du sol peuvent être utilisées comme indicateurs de l'état de dégradation des milieux semi-arides, 2) l'intégration des bandes du moyen infrarouge dans la description de la forme des spectres permet une meilleure caractérisation des conditions des sols et 3) l'interprétation des résultats doit être effectuée par des spécialistes possédant une bonne connaissance de l'environnement étudié.

1. Introduction

Le bassin de la Guadalentin, notre zone d'étude, est situé dans le sud-est de l'Espagne (figure 1). Il présente les caractéristiques des paysages méditerranéens vulnérables face aux processus de dégradation des sols. Il est l'un des sites du projet MEDALUS (*Mediterranean Desertification And Land Use*) retenus pour l'étude, le contrôle et le suivi intensif des processus de dégradation des sols et de désertification dans les régions méditerranéennes de l'Europe (GEESON and THORNES, 1996). Ces dernières sont caractérisées par des écosystèmes où la croissance de la végétation naturelle est limitée par l'action conjointe des températures élevées et du déficit hydrique des périodes estivales. Elles font l'objet, depuis quelques millénaires, d'une activité humaine intense ayant abouti à une destruction irréversible de la végétation naturelle et à un développement progressif des surfaces dénudées. Cette évolution engendre des écosystèmes sujets aux processus de dégradation des sols et aux risques de désertification. Dans ces environnements, les sols occupent une surface plus importante que le couvert végétal et leur contribution au signal télédétekté est prépondérante. C'est pourquoi de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'élimination des effets du sol sur le signal issu de la végétation (HUETE, 1988; ESCADAFAL et HUETE, 1991; BANNARI *et al.*, 1996), tandis que d'autres (ESCADAFAL *et al.*, 1994; ESCADAFAL and BACHA, 1995; MOUGENOT et CAILLEAU, 1995) se sont intéressés au rehaussement de l'information sur les sols. Les propriétés spectrales de ces derniers vont varier avec les conditions de surface du sol telles que la couleur, le niveau de dégradation, la structure, la composition et l'humidité.

L'expression de la couleur de la surface du sol en termes de réflectances aiderait à l'identification et à l'estimation des propriétés intrinsèques du sol au moyen des techniques de télédétection. En effet, tout comme les variables texture, matière organique et humidité, la couleur des sols est en relation directe avec sa réflectance. Celle-ci résulte directement de la composition et de la couleur des sols. Les variations de cette dernière peuvent être déterminées en termes d'intensité (I), de saturation (S) et de teinte (H) qui correspondent à la description numérique de la brillance, de l'étendue spectrale de la couleur et de la vivacité de la couleur. Ces transformations expriment des caractéristiques importantes des spectres de sols (ESCADAFAL, 1993) : I correspond au niveau moyen de réflectance tandis que S et H caractérisent l'allure générale du spectre. Par ailleurs, il a été démontré que la teinte H est reliée uniquement aux formes des signatures spectrales d'un triplet de bandes (LIU and MOORE, 1990) et qu'elle est le paramètre de couleur le plus déterminant dans l'identification et la discrimination des sols et des formations lithologiques (LIU and MOORE, 1990; MATTIKALLI, 1997).



(document extrait de l'encyclopédie cartographique *Encarta* de Microsoft, 1997)

Figure 1. Localisation de la zone d'étude.

2. Matériel et méthode

2.1. Données spectrales

Les données spectrales sur la zone d'étude proviennent de deux sources : des mesures spectroradiométriques effectuées sur le terrain et des images satellitales du capteur TM de Landsat. Les spectres, représentant les signatures spectrales des objets au sol, ont été obtenus à l'aide du spectroradiomètre GER-IRIS lors de la campagne de mesures effectuée dans le bassin de la Guadentín entre le 19 et le 24 juin 1994 par nos partenaires de l'unité EGEO (*Environment and GeoInformation*) du Centre commun de recherche (CCR) de la Commission européenne à Ispra en Italie. Le GER-IRIS couvre des longueurs d'onde allant

de 0,4 à 2,5 μm et possède des résolutions spectrales de 0,0015 μm dans le visible et le proche infrarouge (0,4 - 1,0 μm) et de 0,0045 μm dans le moyen infrarouge (1,0 - 2,5 μm). Les mesures spectroradiométriques ont été réalisées sur différents types de sols et de roches ainsi que sur diverses espèces végétales. Elles caractérisent, donc, différents états des sols (évolués, dégradés, etc.) et de la végétation (verte, sèche, bois gris, etc.). Quant aux images satellitales, elles comprennent deux images du capteur TM acquises durant le mois de juillet des années 1989 et 1992; les deux images ne contiennent pas de couverture nuageuse.

2.2. Traitement des données

Les données-images ont été transformées en réflectances en suivant la chaîne classique de traitement d'images, à savoir : la correction des distorsions géométriques (déplacement induit par le relief inclus) et la correction combinée des effets atmosphériques et topographiques (HILL *et al.*, 1995). Ensuite, la méthode de déconvolution spectrale (ADAMS *et al.*, 1989) a été mise en œuvre pour déterminer les abondances relatives des différentes unités d'occupation du sol telles que la végétation, les formations géologiques et les sols. Les fractions représentant les sols seront utilisées à titre de comparaison avec les résultats des indices décrivant la forme des spectres.

Les équations de calcul des variables décrivant la forme des spectres sont inspirées des transformations des couleurs du système RGB (rouge, vert, bleu) au système IHS (intensité, teinte, saturation) (SCHOWENGERDT, 1983; LIU and MOORE, 1990). Nous présentons ici les formulations simplifiées de l'intensité (équation 1) et des indices de coloration (équation 2) et de forme (équation 3) dans le cas des surfaces naturelles et des bandes visibles de TM (ESCADAFAL *et al.*, 1994):

$$I = \frac{1}{\sqrt{3}}(TM1 + TM2 + TM3) \quad (1)$$

$$IC31 = \frac{TM3 - TM1}{TM3} \quad (2)$$

$$IF321 = \frac{2.TM3 - TM2 - TM1}{TM2 - TM1} \quad (3)$$

Ces indices de forme ont été utilisés pour étudier la dégradation des milieux naturels dans le visible et proche infrarouge (ESCADAFAL *et al.*, 1994). Toutefois, certains traits caractéristiques de la pédogenèse sont plutôt décelables dans la région du moyen infrarouge (BAUMGARDNER *et al.*, 1985). En plus, la région spectrale dédiée à l'identification lithologique est bien celle comprise entre 2,0 et 2,5 μm . Par conséquent, nous nous sommes penchés sur l'évaluation de l'apport d'indices de forme intégrant des bandes du moyen infrarouge.

Étant donné que la notion de couleur est strictement réservée au domaine du visible, les indices spectraux qui en sont dérivés, et qui décrivent la forme du spectre, peuvent être appliqués dans tout le domaine du spectre solaire. Ainsi, I (équation 1), IC (équation 2) et IF (équation 3) peuvent être utilisés pour une évaluation quantitative de la dégradation du sol. En effet, I, qui exprime le niveau moyen de la réflectance, peut renseigner sur la présence ou l'absence de la matière organique, tandis que IC, qui définit la pente de la

courbe spectrale, et IF, qui décrit la forme générale de la courbe de réflectance, peuvent caractériser la présence ou l'absence des autres indicateurs de la pédogenèse : les oxydes de fer et les minéraux argileux.

3. Résultats et interprétation des résultats

Avant d'appliquer les indices I, IC et IF aux données-images, nous avons utilisé les spectres mesurés aux sols dont nous connaissons le niveau de dégradation. Ainsi, et de manière générale, nous avons constaté que, plus le sol est dégradé, plus les valeurs de I sont élevées (figure 2) et plus celles des indices IC et IF sont faibles (figure 3). Étant donné que nous nous intéressons à la forme du spectre pour caractériser la dégradation des sols, nous allons axer l'analyse des résultats sur l'indice IF qui est représenté en fonction de I (figure 2) et de IC (figure 3).

L'indice IF utilisant les bandes du visible (figures 2a et 3a) ne permet pas de distinguer clairement les sols dégradés des sols développés. Il ne révèle pas de tendance quelconque permettant de caractériser la dégradation des sols. Par contre, l'introduction des bandes du moyen infrarouge (TM5 et TM7), en combinaison avec celles du domaine visible à proche infrarouge (TM1, TM3 et TM4), permet de mieux séparer les nuages de points représentant les différents degrés de dégradation (figures 2b et 3b).

La représentation des sols dans l'espace *IF versus I* (figure 2b) dégage une tendance générale qui permet de caractériser différents niveaux de dégradation des sols, avec un degré de discrimination satisfaisant. Par ailleurs, l'espace *IF versus IC* montre la même tendance, mais la distribution des valeurs entre les deux indices (figure 3b) est mieux dispersée : elle traduit donc les phénomènes de dégradation de façon globale. Ainsi, les nuages de points représentant les degrés de dégradation sont disposés le long d'un axe plus ou moins parallèle à la bissectrice de l'angle formé par les axes principaux (abscisse, ordonnées). Les points correspondant au même degré de dégradation vont former un nuage dont l'axe principal est plus ou moins perpendiculaire à l'axe précédent. Par conséquent, dans le diagramme de dispersion *IF versus IC*, plus le sol est dégradé, plus son nuage de points se trouve près de l'origine du diagramme et, plus le sol est développé, plus son nuage s'éloigne de l'origine le long de la diagonale.

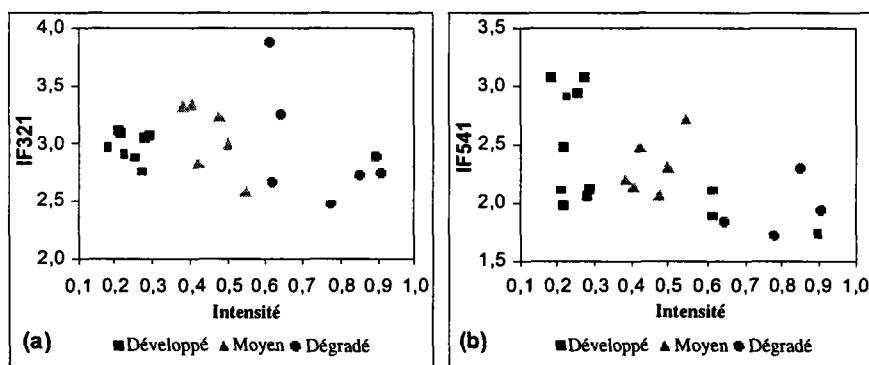


Figure 2. Indices de forme, avec des données au sol, combinant les bandes TM 3, 2 et 1(a) et les bandes TM 5, 4 et 1 (b) en fonction de l'intensité pour des sols développés, peu développés et dégradés.

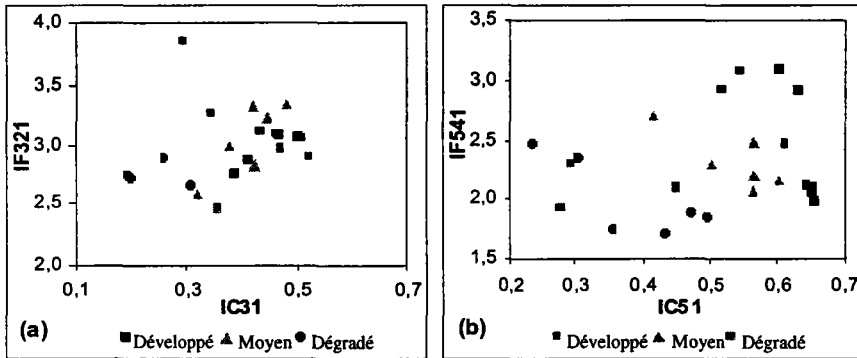


Figure 3. Indices de forme, avec des données au sol, en fonction des indices de coloration combinant les bandes TM 3, 2 et 1(a) et les bandes TM 5, 4 et 1 (b) pour des sols développés, peu développés et dégradés.

Par la suite, nous avons appliqué les indices décrivant la forme des spectres aux données-images. Pour ce faire, nous avons extrait les signatures spectrales de sols représentant trois classes de dégradation similaires à celles définies par les mesures de terrain. L'identification de ces classes est basée aussi bien sur la comparaison avec les signatures mesurées au sol (appuyée par nos connaissances sur la zone d'étude) que sur les évidences spectrales et contextuelles des images utilisées (zones agricoles, sols nus, indices de brillance et de végétation). Environ 320 signatures, à peu près également réparties sur les trois groupes de sols, ont été retenues et utilisées pour la caractérisation de la dégradation des sols de la Guadalentin.

La distribution des valeurs de ces sols dans l'espace *IF* versus *I* est illustrée sur la figure 4, alors que leur répartition dans le diagramme de dispersion *IF* versus *IC* est représentée sur la figure 5. Les résultats présentés sur ces figures viennent confirmer les tendances révélées par les données au sol : les indices intégrant les bandes spectrales du visible et de l'infrarouge proche et moyen (figures 4b et 5b) distinguent mieux les différents niveaux de dégradation que leurs homologues déterminés uniquement à partir des bandes du visible et proche infrarouge (figures 4a et 5a). Ils décrivent donc mieux la forme générale des spectres dont les traits caractéristiques (pente, bandes d'absorption, amplitude de la réflectance) expriment la présence ou l'absence des processus pédogénétiques.

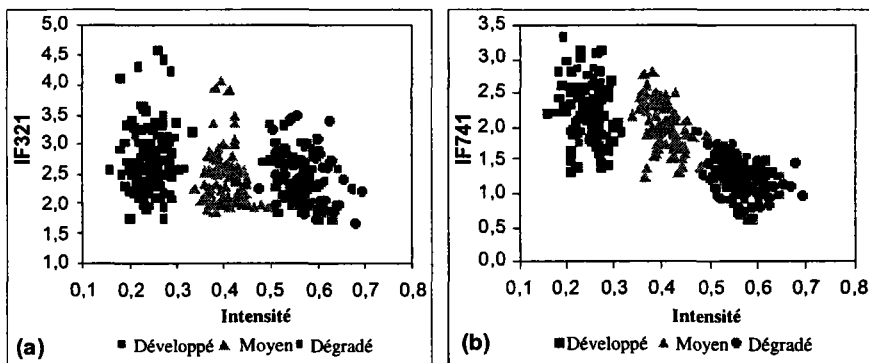


Figure 4. Indices de forme, avec des données-images, combinant les bandes TM 3, 2 et 1(a) et les bandes TM 5, 4 et 1 (b) en fonction de l'intensité pour des sols développés, peu développés et dégradés.

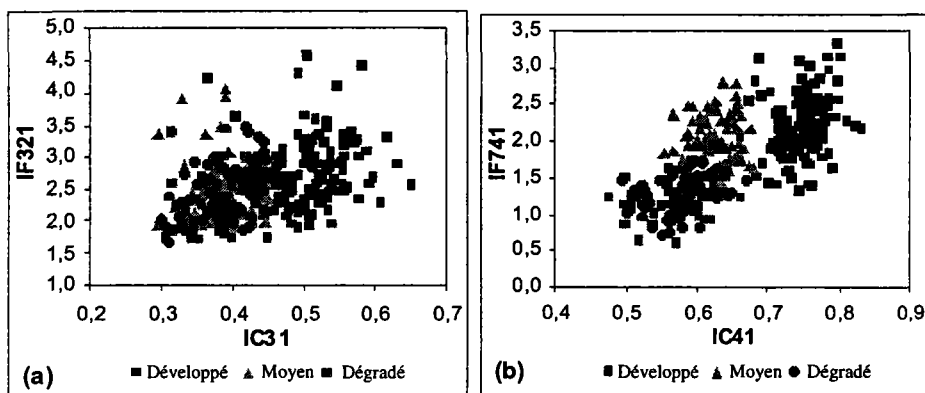


Figure 5. Indices de formes, avec des données-images, en fonction des indices de coloration combinant les bandes TM 3, 2 et 1(a) et les bandes TM 5, 4 et 1 (b) pour des sols développés, peu développés et dégradés.

En guise de récapitulation, les données utilisées montrent une grande variation des indices décrivant la forme des spectres avec le degré de dégradation. Ils représentent donc des indicateurs révélateurs des changements qui peuvent affecter la surface des sols. *A priori*, leur application aux images satellitales permettrait de cartographier l'état de l'environnement en général et le niveau de détérioration des sols en particulier. En effet, comme on le montre sur la figure 16-6 (voir cahier couleur), l'utilisation conjointe de ces trois variables permet une bonne discrimination des différents états de la végétation et du sol. En effet, les différentes conditions de surface des unités d'occupation du sol sont identifiées par des couleurs distinctives.

En ce qui concerne la végétation, trois états ont été mis en évidence : des forêts denses, la végétation éparse et la végétation irriguée. Ils sont représentés sur l'image par le vert clair, le vert foncé et le vert turquoise (cyan), respectivement. Quant aux conditions du sol, nous pouvons distinguer les niveaux de dégradation suivants : développé, peu développé, dégradé et dénudé. Ils correspondent, sur l'image, aux couleurs jaune, orangé, magenta et bleu respectivement. Par ailleurs, dans la zone paléozoïque, il y a une nette différenciation entre les secteurs phylliteux et schisteux. Dans le premier, représenté par des couleurs très foncées, la végétation est peu développée et les sols se font rares, tandis que, dans le deuxième, la végétation est couvrante sur une majeure partie du territoire et l'état du sol est présenté comme étant peu développé. Cela est dû au fait que, dans la zone des schistes, les sols se développent davantage le long des fissures des schistes et sont, souvent, partiellement couverts par les fragments rocheux qui les protègent contre l'érosion. Quant à la végétation, elle doit sa croissance à ces fissures qui abritent à la fois les sols développés et les petits réservoirs d'eau d'infiltration.

Par ailleurs, l'analyse des images d'abondance relative des sols et des formations rocheuses (marnes, gypse, calcaires, etc.) produites par déconvolution spectrale a permis d'apprécier l'état de dégradation des sols. Les résultats obtenus sont similaires à ceux révélés par l'application des indices spectraux décrivant la forme des spectres.

5. Conclusion

Ce travail exploratoire a révélé que les indices spectraux intégrant les bandes spectrales du moyen infrarouge sont de bons indicateurs des phénomènes de dégradation affectant la surface des sols. L'interprétation des changements soulignés par ces indices devrait, toutefois, être effectuée par des spécialistes possédant une bonne connaissance des phénomènes observés en relation avec leur environnement. La présente étude a permis de mettre en évidence le potentiel des indices décrivant la forme des spectres en termes de diagnostic de l'état de l'environnement des écosystèmes semi-arides, et de démontrer l'intérêt de les étendre au domaine du moyen infrarouge dont certaines bandes permettent de détecter des propriétés spectrales révélatrices des processus pédogénétiques.

6. Remerciements

Les auteurs remercient le consortium inter-universitaire des laboratoires de télédétection du Québec (COLUTEQ) pour son support financier pour le séjour de D. Haboudane au Centre commun de recherche (CCR) de la Commission Européenne à Ispra. Ils remercient aussi le CRSNG du Canada et le FCAR (subvention de F. Bonn) pour leurs soutiens financiers, ainsi que le projet MEDALUS qui a offert les données utilisées dans cette recherche.

7. Références

- ADAMS, J. B., SMITH, O. M. and GILLESPIE, A. R. 1989. Simple models for complex natural surfaces : A strategy for the hyperspectral era of remote sensing. *Proceedings of IGARSS'89 Symposium*, 10-14 July 1989, Vancouver, Canada, p. 16-21.
- BANNARI, A., HUETE, H. R., MORIN, D. et ZAGOLSKI, F. 1996. Effets de la couleur et de la brillance sur les indices de végétation. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, n° 10, p. 1885-1906.
- BAUMGARDNER, M. F., SYLVA, L. F., BIEHL, L. L. and STONER, E. R. 1985. Reflectance properties of soil. *Advances in Agronomy*, vol. 38, p. 1-44.
- ESCADAFAL, R. and BACHA, S. 1995. Strategy for the dynamic study of desertification. *Proceedings of the ISSS International Symposium (Working Groups RS and MD)*, Ouagadougou, Burkina Faso, 6-10 February 1995, p. 19-34.
- ESCADAFAL, R., BELGHITH, A. et BEN MOUSSA, H. 1994. Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride. *Sixième Symposium International « Mesures physiques et signature spectrale en télédétection »*, 17-21 janvier 1994, Val d'Isère, France, p. 253-259.
- ESCADAFAL, R. 1993. Remote sensing of soil color : principles and applications. *Remote Sensing Reviews*, vol. 7, p. 261-279.
- ESCADAFAL, R. et HUETE, A. 1991. Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. *C. R. Acad. Sci., Paris*, tome 312, Série II, p. 1385-1391.

- GEESON, N. A. and THORNES, J. B. 1996. MEDALUS II : Mediterranean Desertification and Land Use. Executive summary phase II. European Commission, DG XII, Environment and Climate Programme.
- HILL, J., MEHL, W. and RADELLOF, V. 1995. Improved forest mapping by combining corrections of atmospheric and topographic effects in Landsat TM imagery. *In Sensors and environment applications of remote sensing*, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 143-151.
- HUETE, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, n° 25, p. 295-309.
- LIU, J. G. and MOORE, J. M. 1990. Hue image RGB composition. A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, n° 8, p. 1521-1530.
- MATTIKALLI, N.M. 1997. Soil color modeling for the visible and near-infrared bands of Landsat sensors using laboratory spectral measurements. *Remote Sensing of Environment*, n° 59, p. 14-28.
- MOUGENOT, B. et CAILLEAU, D. 1995. Identification par télédétection des sols dégradés d'un domaine sahélien au Niger. *Proceedings of the ISSS International Symposium (working groups RS and MD)*, Ouagadougou, Burkina Faso, 6-10 February 1995, p. 19-34.
- SCHOWENGERDT, R. A. 1983. *Techniques for image processing and classification in remote sensing*. Academic Press, New York, p. 117-126.

17

Essai de corrélation, par traitement d'une image HRV (XS) de SPOT, entre la dégradation des milieux naturels et les densités de population autour du Parc national du mont Péko en Côte d'Ivoire forestière

YAO BERTIN KOUADIO¹, AUGUSTIN TIYEGBO TOURÉ² et BI ZUELI KOLI¹

¹ *Institut de géographie tropicale (IGT), Université de Cocody-Abidjan, 22 B.P. 744 Abidjan 22, Côte d'Ivoire; téléphone : (225) 22 44 81 60; télécopie : (225) 22 44 14 07; courriel : kouadiyb@hotmail.com*

² *Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Université de Cocody-Abidjan, 22 B.P. 521 Abidjan 22, Côte d'Ivoire; téléphone : (225) 22 44 52 70; télécopie : (225) 22 44 52 84; courriel : Tiyegbo@hotmail.com*

Résumé

L'étude présentée ici a trait au débat sur les rapports entre la densité de population et la dégradation des milieux naturels. Elle part de l'hypothèse que l'extension des cultures est liée au croît démographique et qu'il est alors possible d'établir un lien direct entre la densité de population et le niveau de déforestation. L'image HRV(XS) de SPOT (1994) utilisée couvre le Parc national du Mont Péko en zone de forêt dense soumise à une forte pression humaine. Après une classification dirigée et un filtrage laplacien sur des fenêtres de cinq pixels sur cinq, équivalents à des parcelles de 100 m de côté, l'image montre le niveau de forestation et, inversement, celui de la déforestation de 1973 à 1994. Sa superposition à une carte du bilan de l'évolution des densités de population révèle, qu'au-delà de 30 hab./km²,

le déboisement élimine les strates de recrûs forestiers. La végétation est une mosaïque dominée par *Chromolaena odorata* et les graminées de savane guinéenne. Sa signature spectrale ne permet pas d'isoler des variantes sur l'image. Une relation d'effet existe donc entre la densité et l'état de la végétation et elle peut aider à valider l'interprétation des images.

1. Introduction

En Côte d'Ivoire, la déforestation et ses conséquences (BROU *et al.*, 1998) s'ajoutent à la modification des savanes (KOUADIO, 1998) et replacent le pays dans le contexte africain des changements environnementaux. Cette situation pose le problème des rapports entre la population, l'agriculture et la modification des milieux naturels, et exige la recherche de cas illustratifs.

L'étude vise à produire une cartographie faisant ressortir le rapport entre la déforestation et la densité de population. Partant de l'hypothèse que l'augmentation de la densité de population justifie l'extension des cultures et conduit à la déforestation, on pense que la superposition d'une carte du bilan des densités de population à une image montrant l'état de la forêt doit révéler des stades de déforestation répartis suivant les densités de population.

2. Méthode

L'image utilisée [HRV (XS) de SPOT de 1994] couvre le Parc du Mont Péko et sa périphérie, soit une forêt dense peuplée d'immigrants agriculteurs. Sa résolution de 20 m permet de distinguer les zones de forêt de celles qui ne le sont pas, sur la base d'un contraste suffisant entre ces deux types de surfaces. À l'aide de parcelles-témoins identifiées sur le terrain en fonction de leur contenu végétal ou cultural, nous avons appliqué une classification dirigée et un filtrage laplacien sur des fenêtres de 5 x 5 pixels; la superficie minimum acceptée est d'un hectare.

Les densités de population sont calculées à partir d'un carroyage de 4 km de côté de la zone d'étude suivant les coordonnées UTM, en considérant que l'aire d'emprise d'une localité a un rayon de 4 km, égal à la distance moyenne entre les localités. Les intersections obtenues par ce carroyage sont des points cotés par le quotient entre le total de la population (DIRECTION DE LA STATISTIQUE, 1975 et 1988) des localités rencontrées (INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE, 1995) dans chaque cercle centré sur un point et la superficie réelle du cercle, soit 50,26 km². Autour du parc et du fleuve Sassandra, seule la fraction de cercle à l'extérieur de ces entités fut considérée. Les points cotés ont servi au tracé des lignes d'isodensité.

3. Résultats et discussion

En 1975 (figure 1), les fortes densités suivent les routes où sont établies les localités. L'ouest, le sud, le nord du parc et l'espace entre le fleuve Sassandra et l'axe Guinglo-

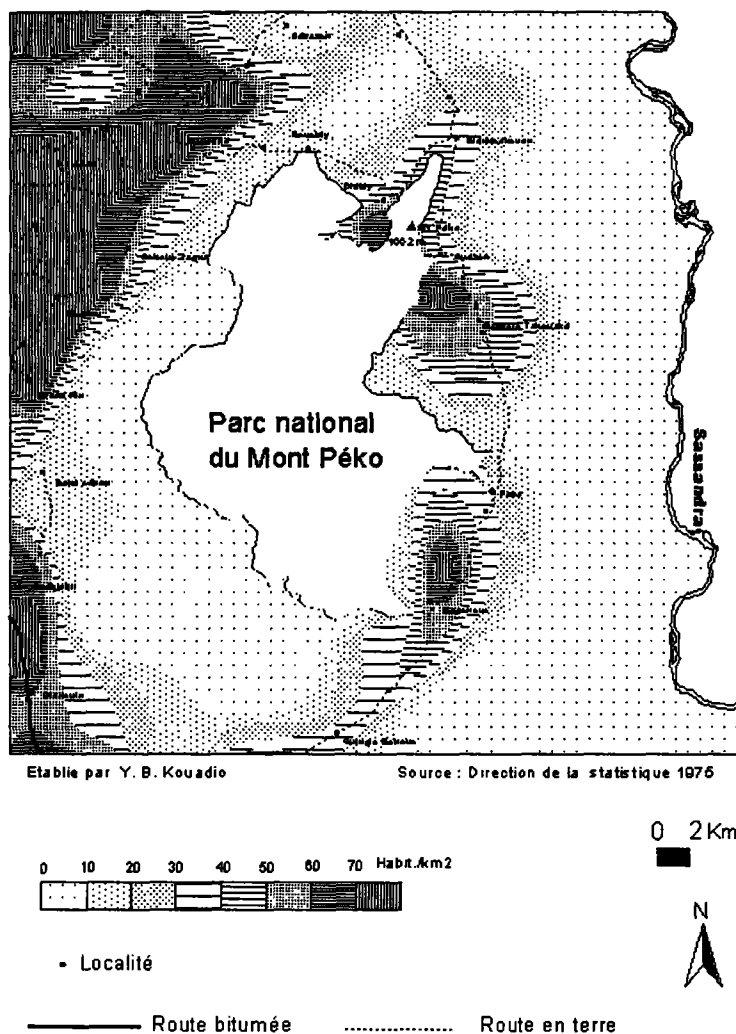


Figure 1. Densités de population en 1975

Bléniméhouen sont vides. Mais, en 1995, à l'est du parc, les densités sont supérieures à 30 voire 40 hab./km² (figure 2). Seules trois enclaves vides restent au sud, à l'ouest et au nord du parc. De 1975 à 1995, l'évolution spatiale des densités se voit donc à la position des lignes d'isodensité 30 et 40 hab./km² (figure 3). Sur le côté ouest du parc, la ligne 50 se déplace peu mais la ligne 40 est tronquée. La ligne 30 avance vers le parc au sud où la ligne 40 reste presque figée. L'ouest du fleuve fut peuplé dans les années 1980.

La superposition des densités de population à la végétation de 1973 (INSTITUT GÉOGRAPHIQUE DE CÔTE D'IVOIRE, 1973) révèle que la forêt dense est extérieure aux zones de plus de 30 hab./km² (figure 4). Au sud du parc, l'intégration des populations des campements à celles des villages lors du recensement de 1975 explique les faibles densités. L'image traitée présente deux types de forêt, un de savane, cinq états dus à l'action humaine

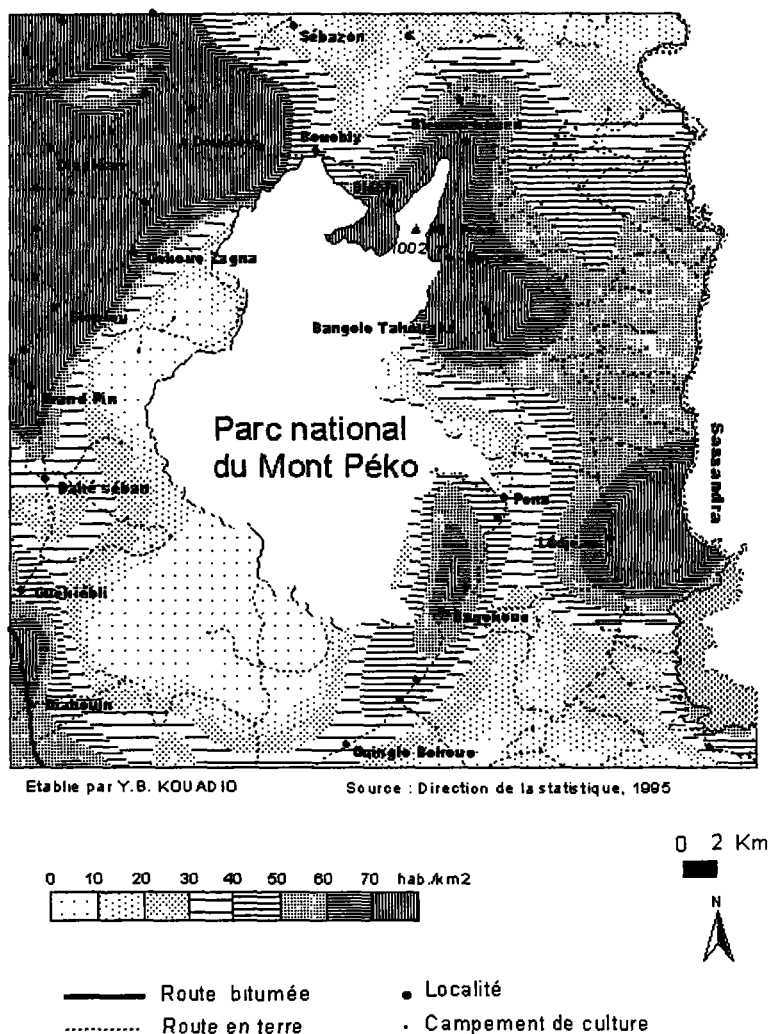


Figure 2. Densités de population en 1995

et les rochers nus (figure 17-5) (voir cahier couleur). La forêt couvre le parc et se dégrade à mesure qu'on s'en éloigne. Les savanes sont sur les rochers ou proche des localités. Au contraire de ces thèmes, les jachères sont constituées de pixels de différentes valeurs radiométriques. Leur structure, malgré une homogénéité d'ensemble, ne permet pas de dégager des sous-secteurs.

La superposition de la carte du bilan des densités à l'image révèle, qu'en 1995, la ligne 30 hab./km² souligne la limite entre la zone des forêts secondaires et fourrés à recrûs forestiers et celle des jachères et cultures.

L'étude révèle un lien entre la densité de population et la dégradation de la végétation et établit à 30 hab./km², la densité à partir de laquelle la forêt disparaît totalement. FILLERON (1990) fixe ce seuil à 29 hab./km², en utilisant des photographies aériennes.

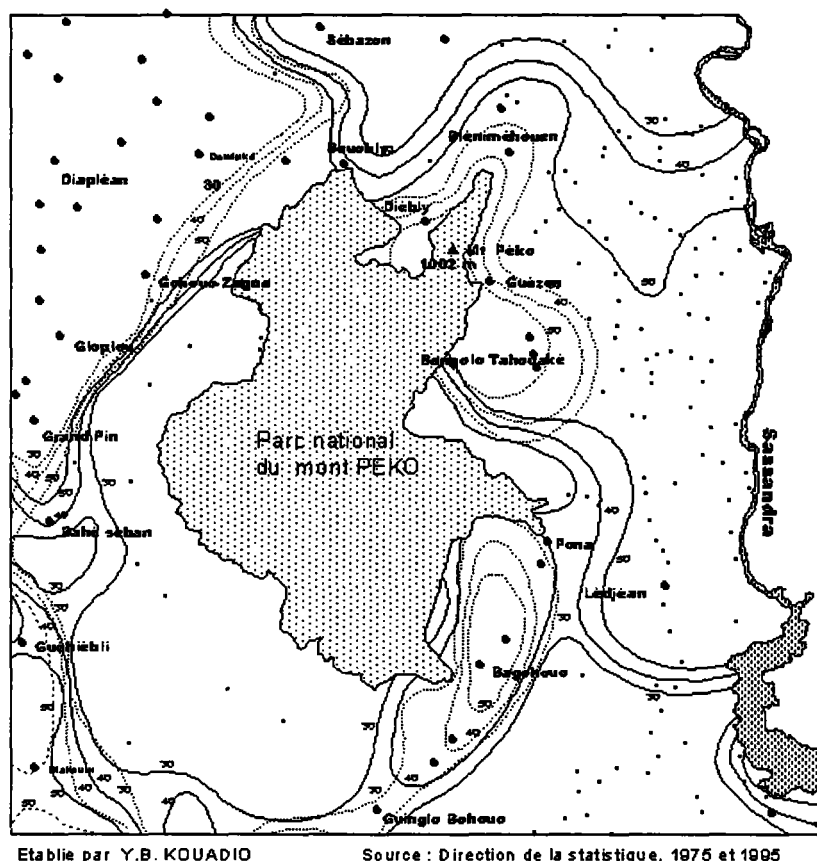
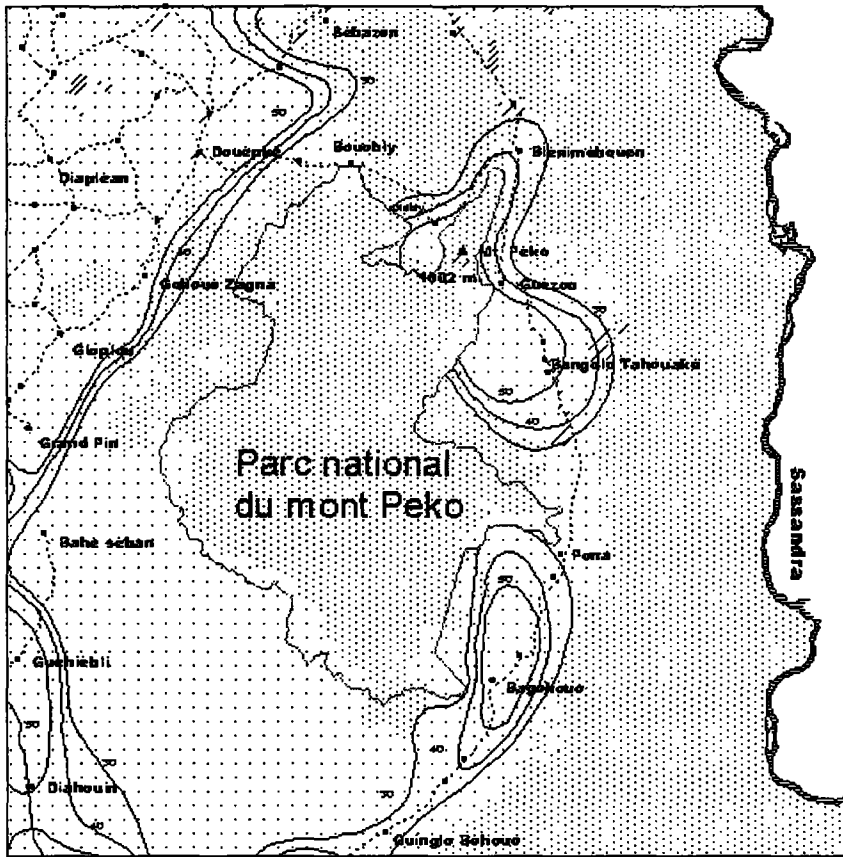


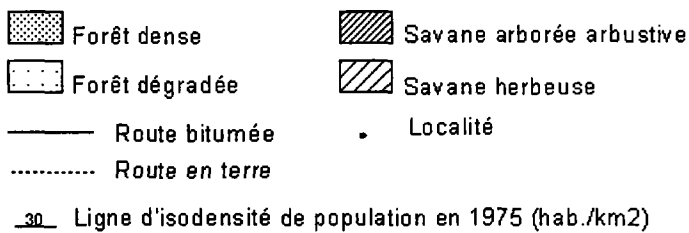
Figure 3. Synthèse de l'évolution des densités de population de 1975 à 1995

L'expression des jachères sur l'image est due à leur composition, une mosaïque de vieilles jachères, de bosquets boisés et de graminées de savanes guinéennes intégrés dans des terrains de *Chromolaena odorata*. La densité de population peut donc être un indicateur dans le traitement d'image de zones en déforestation (CHATELAIN, 1996). Au-delà de 30 hab./km², il semble difficile de raisonner en termes de forêt, à moins d'un changement d'échelle (PUECH, 1998).



Etablie par Y.B. KOUADIO

Source : Direction de la statistique 1975, Institut géographique de Côte d'Ivoire 1973



0 2 Km



Figure 4. Densités de population et état de la végétation en 1975

4. Conclusion

La forêt se dégrade suivant la densité de la population. Au-delà de 30 hab./km², la dégradation devient presque irréversible. Ce résultat corrobore celui des travaux antérieurs et est acceptable. Les densités sont un indicateur utile au traitement d'image pour le suivi de l'évolution des milieux naturels. La méthode devra être appliquée à d'autres zones pour une généralisation.

5. Références

- BROU, Y.T., SERVAT, E. et PATUREL, J.-E. 1998. Activités humaines et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien. *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Variabilité des Ressources en Eau en Afrique au XX^{ème} Siècle)*. International Association of Hydrological Sciences, IAHS publication n° 252, p. 365-373.
- CHATELAIN, C. 1996. Possibilités d'application de l'imagerie satellitaire à haute résolution pour l'étude des transformations de la végétation en Côte d'Ivoire forestière. Thèse de doctorat, Université de Genève, 206 p.
- DIRECTION DE LA STATISTIQUE. 1975. Recensement Général de la Population 1975. Abidjan.
- DIRECTION DE LA STATISTIQUE. 1988. Recensement Général de la Population et de l'Habitat 1988. Abidjan.
- FILLERON, J.-C. 1990. Potentialités du milieu naturel, densités de population et occupation du sol dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire. in J.-F. Richard (réd.) *La dégradation de paysages : actes du colloque de Dakar*, Presses universitaires de Dakar, p. 253-263.
- INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE. 1995. Cartes des localités des départements de Man et de Duékoué, 1 : 200 000.
- INSTITUT GÉOGRAPHIQUE DE CÔTE D'IVOIRE. 1973. Cartes de Man et Guiglo. 1 : 200 000.
- KOUADIO, Y.B. 1998. Paysages et utilisation du sol dans un front pionnier de savanes sub-soudanaises : dynamique des milieux naturels en pays malinké de Dianra (nord-ouest Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Cocody-Abidjan, 212 p.
- PUECH, C. 1998. Décomposition du pixel et changement d'échelle. Réflexions autour de la structure forestière. *Photo-interprétation*, n° 1998-1, vol. 36, numéro spécial Séminaire télédétection et végétation, p. 20-24.

18

Suivi de la désertification au Maroc à partir d'images AVHRR de NOAA

ABDELLAH LEMSANNI ¹, MOHAMED AÏT BELAÏD ², MOHAMMED-FAOUZI SMIEJ ² et NASSER EL YAMINE ¹

¹ *Université Mohammed V, École Mohammadia d'ingénieurs (EMI), avenue Ibn Sina, B.P. 765-Rabat-Agdal; téléphone : 212-7 19 05/06; télécopieur : 7-77 88 53; courriel : lemsanni33@hotmail.com ; elyamine@emi.ac.ma*

² *Centre royal de télédétection spatiale (CRTS), 16 bis, avenue de France, Agdal, Rabat, Maroc; téléphone: 212-7 77 63 05/06 ; télécopieur : 7-77 63 00; courriel : aitbelaid@crt.s.gov.ma ; smiej@crt.s.gov.ma*

Résumé

Notre article a pour objectif de rendre compte d'une méthodologie adaptée pour l'étude et l'évaluation du phénomène de la désertification au niveau national en utilisant les capteurs de faible résolution géométrique tel que AVHRR de NOAA. Certains paramètres géophysiques (albédo, indice de végétation et température de surface) sont produits régulièrement et couvrent la période de 1987 à 1996 à raison d'une image par mois. L'étude des différences d'images basée sur l'exploitation d'un seul paramètre surtout l'indice de végétation a permis de caractériser la dynamique spatio-temporelle de l'état de la végétation. La combinaison de ces paramètres deux à deux, en particulier AL-TS et NDVI-TS, a permis respectivement la caractérisation de l'état hydrique et de l'état de la végétation. La synthèse de l'ensemble des résultats sous un système d'information géographique (SIG), ainsi que leur confrontation avec d'autres types de données ont permis de cartographier l'état de la désertification selon cinq degrés (très élevé, élevé, modérée, faible et stable) ainsi que sa dynamique spatio-temporelle. Ces résultats sont indispensables pour l'identification des zones à risques et l'élaboration des plans de suivi et de lutte contre la désertification.

1. Introduction

L'importance et la gravité du phénomène de la désertification au Maroc ont conduit les autorités à élaborer un plan national de lutte contre la désertification (PNLCD), en 1986, sous forme de plans et de programmes sectoriels concernant la lutte contre la dégradation des forêts, des parcours et des terres pluviales, ainsi que contre la sécheresse, l'ensablement et l'érosion hydrique (AÏT BELAÏD *et al.*, 1998).

Actuellement, les départements concernés procèdent à l'actualisation de ce PNLCD, en tenant compte des principales dispositions prévues par la Convention internationale de lutte contre la désertification (CCD) notamment l'évaluation des plans existants, l'introduction de nouvelles technologies et la participation active des populations.

2. Suivi d'indicateurs environnementaux au niveau national par télédétection

L'étude et le suivi de la désertification, au moyen de la télédétection, au niveau national passent par l'examen de différents paramètres dérivés de l'imagerie AVHRR de NOAA (albédo, indice de végétation et température de surface).

L'outil de traitement est un module AVHRR intégré dans l'environnement de traitement d'images ERDAS. Ce module est développé par l'Institut des applications de la télédétection spatiale du Centre commun de recherches (CCR d'Ispira) mais adapté et mis à jour au Centre royal de télédétection spatiale (SMIEJ et MERDAS, 1999).

Les indicateurs cités ci-dessus ont été exploités pour le suivi de l'état de la végétation, la localisation des zones à stress hydriques et la caractérisation des zones sensibles à la désertification.

2.1. Approche utilisant un seul paramètre géophysique (NDVI)

Les méthodes de cartographie des changements par imagerie spatiale se basent, entre autres, sur l'exploitation de la différence des indices de végétation de deux périodes (WARREN and BAGLY, 1992; MULLINS and CIHLAR, 1993).

La cartographie des milieux est très dépendante de la date d'acquisition de l'image, car le cycle phénologique varie selon les espèces végétales et les conditions climatiques. Ainsi, cette cartographie reflète donc l'état particulier de la végétation à un moment donné.

Pour remédier au problème des fluctuations phénologiques à l'intérieur de l'année, les images de synthèse annuelle basées sur le maximum de l'indice de végétation sont utilisées pour le suivi de l'évolution inter-annuelle des états de surface.

La dynamique spatio-temporelle des différents états de surface peut être suivie par l'utilisation des différences d'images de synthèse annuelle, selon cinq types d'évolution :

- progression importante : augmentation de NDVI de 60 à 100 %;
- progression moyenne : augmentation de NDVI de 20 à 60 %;
- identique : variation de NDVI de ± 20 %;
- régression moyenne : diminution de NDVI de 20 à 60 %;
- régression importante : diminution de NDVI de 60 à 100 %.

La figure 18-1 (voir cahier couleur) illustre la comparaison des synthèses annuelles de NDVI entre les années 1994 et 1996, qui sont similaires du point de vue volume de

précipitations. Globalement, on constate une régression importante dans la couverture végétale en 1996 par rapport à 1994. Cependant, l'évolution est remarquable dans trois grandes régions :

- la région du Souss a subi une progression importante de couverture végétale, en opposition avec la tendance générale;
- la région du nord-ouest a connu une régression importante de la végétation de la même manière qu'au niveau national malgré les fortes précipitations de l'année 1996 qu'a connues cette région;
- la région de l'Orientale montre une régression importante due à un déficit pluviométrique en 1996 par rapport à 1994.

En conclusion, cette approche réitérée sur plusieurs années permet donc la caractérisation de l'évolution des états de surface d'une année à l'autre et sur de longues périodes jusqu'à la détection des changements irréversibles.

2.2. Approche utilisant la combinaison de deux paramètres géophysiques

L'approche développée se compose de trois étapes :

- combinaison des paramètres AL et TS,
- combinaison des paramètres NDVI et TS,
- élaboration de la carte de désertification par la synthèse des résultats des deux premières étapes.

2.2.1. Utilisation conjointe de l'albédo et de la température de surface

Pour compléter les informations sur la caractérisation des différents états de surface, on a utilisé simultanément l'évolution conjointe de l'albédo (AL) et de la température de surface (TS). Pour cela, on s'est servi d'un histogramme bidimensionnel de l'image à deux canaux (AL et TS) qui nous a fourni une représentation imagée pour chaque état de surface. L'histogramme bidimensionnel (figure 2), dans la majorité des images étudiées, fait ressortir une forme géométrique en cloche que l'on peut segmenter en trois parties :

- les zones stables à « logique hydrique », couvertes de végétation et à alimentation en eau normale;
- les zones désertiques à « logique radiative », dénudées et à alimentation en eau limitée;
- « zones intermédiaires », montrant le passage entre les deux logiques, définit les zones à risque modéré de désertification.

La segmentation de l'histogramme est utilisée comme base de classification de l'image à deux canaux, permettant ainsi de produire une carte de l'état hydrique (figure 18-3) (voir cahier couleur) selon les trois classes citées ci-dessus. La comparaison de ces cartes de l'état hydrique avec les données pluviométriques annuelles et les images NDVI des mêmes dates confirme bien ces résultats.

L'élaboration systématique de ce document permettra le suivi annuel de l'état hydrique des différents états de surface. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par de nombreux auteurs dans différentes régions (WENDLER and EATON, 1983; SEGUIN, 1987; BECKER *et al.*, 1988), en utilisant des méthodologies et des nomenclatures plus ou moins semblables.

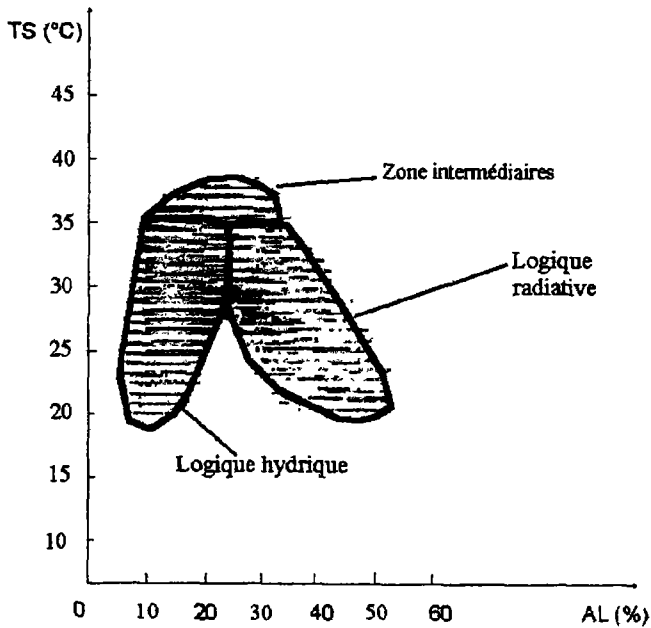


Figure 2. Histogramme de l'albédo et de la température de surface de l'image du 03-03-1987.

2.2.2. Utilisation conjointe de l'indice de végétation et de la température de surface

La présence ou l'absence de la végétation est reflétée par le comportement thermique des sols, provoquant des différences significatives dans la répartition de la température de surface.

La confrontation de l'indice de végétation et de la température de surface, avec la même approche citée ci-dessus permet également d'identifier trois classes suivant leur état végétatif : recouvrement élevé, recouvrement moyen et zones dénudées à comportement désertique. On en déduit une carte de l'état de la végétation.

Sur l'histogramme réalisé (figure 4), on montre la variation de la température de surface en fonction de l'indice de végétation. On y note la dispersion des points et donc une hétérogénéité de comportement des différents états de surface avec une température comprise entre 10 et 50 °C et un indice de végétation entre 0,5 et 0,65.

La segmentation de l'histogramme est utilisée comme base de classification de l'image à deux canaux (NDVI-TS), permettant ainsi de produire une carte de l'état de la végétation (figure 18-5) (voir cahier couleur) en fonction des trois classes citées ci-dessus. La comparaison des cartes de l'état de la végétation avec les images NDVI de mêmes dates confirme bien ces résultats.

En effet, pour les sols nus, le NDVI est faible et la TS est élevée. Par contre, en zones de végétation, la TS décroît avec la croissance du NDVI. Cette relation NDVI et TS s'explique en termes de flux de chaleur latente associé à l'évapotranspiration de la végétation.

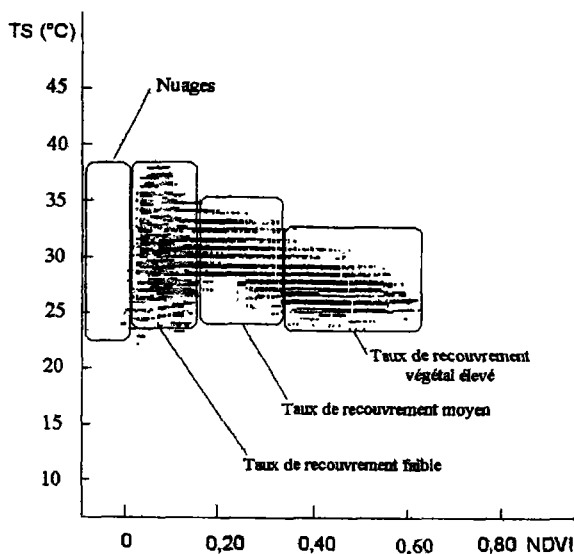


Figure 4. Histogramme de l'indice de végétation et de la température de surface de l'image du 03-03-1987 .

Les deux approches utilisées ci-dessus ont abouti à des résultats plus au moins stables, conformes entre eux et avec d'autres données exogènes telles la carte forestière, la carte des cultures pluviales et irriguées, etc.

3. Élaboration de la carte de désertification

L'élaboration de la carte des risques de désertification (figure 18-6) (voir cahier couleur) est basée sur la synthèse d'une base de données émanant des deux approches précédentes basées respectivement sur la combinaison de AL-TS et NDVI-TS. Cette base de données contient une série décennale de cartes d'état hydrique et de végétation à raison de deux cartes par année correspondant aux saisons de printemps et d'été de 1987 à 1996. Elle contient également des données pluviométriques pour la validation des résultats. La procédure de l'élaboration de la carte de désertification développée sous le SIG ARCVIEW, comporte les étapes suivantes :

- numérisation des limites des trois classes contenues dans les cartes d'état hydriques et de végétation,
- superposition des 20 cartes d'état hydrique pour en déduire la carte décennale de l'état hydrique,
- superposition des 20 cartes d'état de végétation pour en déduire la carte décennale de l'état de la végétation,
- combinaison des deux cartes décennales pour générer la carte de désertification selon cinq niveaux.

La confrontation de cette carte de désertification avec les données de précipitation et d'autres documents existants (carte forestière, carte des périmètres irrigués, etc.) confirme bien ce résultat.

4. Conclusion

Les différents résultats, concernant aussi bien le suivi pluriannuel de la dynamique de la végétation par l'exploitation des différences annuelles d'images NDVI, le suivi de l'état de la végétation (par l'exploitation de NDVI et TS) ainsi que l'état hydrique (par l'exploitation de AL et TS), sont cohérents entre eux. Leur intégration a permis l'élaboration d'une carte synthétique de risque de désertification. La confrontation de cette carte avec les données de précipitation et d'autres documents existants (carte forestière, carte des périmètres irrigués, etc.) confirme bien ce résultat. Ces résultats nécessitent une validation au moyen de données conventionnelles. Leur intérêt pour les décideurs n'est plus à démontrer et ce à plusieurs niveaux :

- dresser le diagnostic de l'état de la désertification au niveau national,
- identifier les zones à risques,
- préparer les plans d'actions et aménagements dans le cadre de la mise en œuvre de la CCD,
- élaborer un système d'information sur la désertification.

La méthode développée est pratique et opérationnelle du fait qu'elle est basée essentiellement sur les données AVHRR de NOAA et les données météorologiques qui ne sont pas coûteuses. Elle peut donc s'appliquer facilement dans d'autres pays ou régions ayant des situations similaires.

6. Références

- AÏT BELAÏD, M., LEMSANNI, A. et SMIEJ, M.F. 1998. Le suivi de la désertification au Maroc : une approche globale. Photo-interprétation. (Sous presse).
- BECKER, F., BOLLE, H. J. and ROWNTREE, P.R. 1988. The International Satellite Land-Surface Climatology Project (ISLSCP). United Nations Environmental Programme ISLSCP Secretariate, Berlin, 92 p.
- MULLINS, D.W. and CIHLAR, J. 1993 . Monitoring rangeland change using Landsat MSS data. Remote Sensing of Environment, n° 1993-3, p. 1968-1971.
- SEGUIN, B. 1987. Application de la télédétection dans l'infrarouge thermique à la détermination de l'évaporation et de l'humidité du sol. Étude de la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique (DGRST), Station de bioclimatologie de l'INRA, Avignon, 10 p.
- SMIEJ, M.F. et MERDAS, M. 1999. Application de la télédétection aux statistiques agricoles. Projet AGRIMA, Action 1, Zonage et suivi des principales cultures à partir des données AVHRR, Rapport final, 36 p.
- WARREN, S.T. and BAGLY, C.F. 1992 . Spot imagery and GIS in support of Military Land Management. Geocarto International, n° 1992-1, p. 35-43.
- WENDLER, G. and EATON, F. 1983. On the desertification of the Sahel zone. Part 1 : Ground observations, Climate Change, n° 1983-5, p. 365-380.

19

Utilisation de l'imagerie aérienne et satellitale pour l'analyse de la mutation des espaces ruraux : cas de la sous-préfecture de Mandélia dans le département de Hadjer Lamis au Tchad

HUBERT N'DJAFI OUAGA ¹ et MARIE-FRANÇOISE COUREL ²

¹ *Centre national d'appui à la recherche (CNAR), Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, B.P. 1228, N'Djaména, Tchad; téléphone : (235) 52.25.15; télécopieur : (235) 52.32.14; courriel : cnaruser@sntcd.undp.org*

² *Laboratoire UMR/PRODIG du CNRS, 191, rue Saint - Jacques, 75005 Paris, France; téléphone : 0144321481; télécopieur : 0143296383 ou 0143296383; courriel : Courel@univ-paris1.fr.*

Résumé

Avec plus des deux-tiers de son territoire érigé en une réserve de faune par décret présidentiel datant de 1967, la sous-préfecture de Mandélia est, en principe, un territoire protégé. Les effets néfastes de la sécheresse (1973-1974 et 1983-1984), aggravés par un fort afflux de populations au cours de cette période et la situation de guerre civile qu'a connue le pays, ont fortement ébranlé l'équilibre fragile des écosystèmes de cet espace. Depuis lors, l'environnement de cet espace connaît une véritable mutation. En effet, d'après les données du recensement démographique, la population du canton s'est accrue de plus de 340 % entre 1968 et 1993. Il s'en est suivi une forte pression sur le milieu avec, pour conséquence, la lutte pour l'accès à la terre et aux ressources naturelles. D'un espace fermé, protégé par la loi de la République, le canton est aujourd'hui ouvert avec le retour à une gestion traditionnelle. L'utilisation de l'imagerie aérienne de 1974 et satellitale de 1994 pour une étude diachronique a permis d'évaluer et de suivre la mutation de cet espace.

Nous sommes parvenus à montrer l'état de l'occupation du sol à chacune de ces années, les niveaux d'évolution en terme d'utilisation différentielle de l'espace, de dégradation du sol, de régénération du milieu et, enfin, la segmentation du territoire. En somme, avec cette étude, on relève qu'en réalité la réserve de faune de Mandéla, n'est qu'une vue de l'esprit aujourd'hui. Elle a disparu depuis l'arrivée massive de migrants installés par l'État et le Secours catholique pour le développement (SECADEV), une ONG catholique, suite à la grande sécheresse de 1983-1984. C'est dans un contexte marqué par la désarticulation du tissu social, la spéculation foncière et l'intégration à l'économie de marché que les populations rurales se doivent d'adapter leur système de production pour satisfaire leurs besoins dans un monde de plus en plus monétariste.

1. Introduction

La sous-préfecture de Mandéla (2584 km²) est située à la sortie sud de la capitale tchadienne entre les fleuves Chari et Logone dans la zone sahélo-soudanienne et reçoit à peine 450 mm de pluie par an (figure 1). En 1967, un décret présidentiel érige près des deux tiers de ce territoire en réserve de faune dite de Mandéla avec l'intention de créer une ceinture faunique autour de la capitale (N'Djaména). Il était question de tempérer le mouvement des animaux sauvages vers la réserve camerounaise de Waza.

D'après le recensement démographique, la population est passée de 23 597 hab. en 1968 à 84 615 hab. en 1994. Cet accroissement de la population, fruit de plusieurs années de migration, est à l'origine des luttes au sein des communautés rurales pour l'occupation du sol et engendre la dégradation des ressources naturelles, l'enjeu étant la satisfaction des besoins tout aussi alimentaires que monétaires des familles.

La proximité d'un marché de consommation que représente la ville de N'Djaména (plus de 700 000 habitants) stimule la dynamique paysanne en matière de diversification des activités de production génératrices de revenus. Il y a donc lieu de s'interroger sur la problématique de l'occupation du sol en regard de l'état actuel de l'exploitation des ressources naturelles et des moyens de régulation mis en œuvre par les acteurs du développement. Pour le moment, à partir de la cartographie dynamique, nous chercherons à évaluer l'impact réel de cette emprise humaine sur cet espace et en déduire la tendance de son évolution.

2. Matériel et méthode

Nous disposons de deux types d'interprétation spatiale : les prises de vue aériennes (PVA) de 1974-1975, des missions de l'Institut géographique national (IGN) à l'échelle du 1 : 50 000 et de deux images HRV de SPOT du 29 et du 30 novembre 1994. Pour leur traitement, nous avons bénéficié des équipements informatiques du CNAR (Centre national d'appui à la recherche), à N'Djaména au Tchad, alors que le suivi scientifique en était assuré par le laboratoire Unité mixte de recherche /Pôle de recherche d'organisation et de diffusion de l'information géographique du CNRS, à Paris en France.

Les logiciels utilisés sont Multiscope pour le traitement d'images et GéoConcept Expert pour la cartographie et le système d'information géographique (SIG). Avant d'entamer le traitement de ces supports cartographiques, nous nous sommes interrogés sur les informations utiles et nécessaires à la compréhension des mutations des espaces ruraux et ce que nous

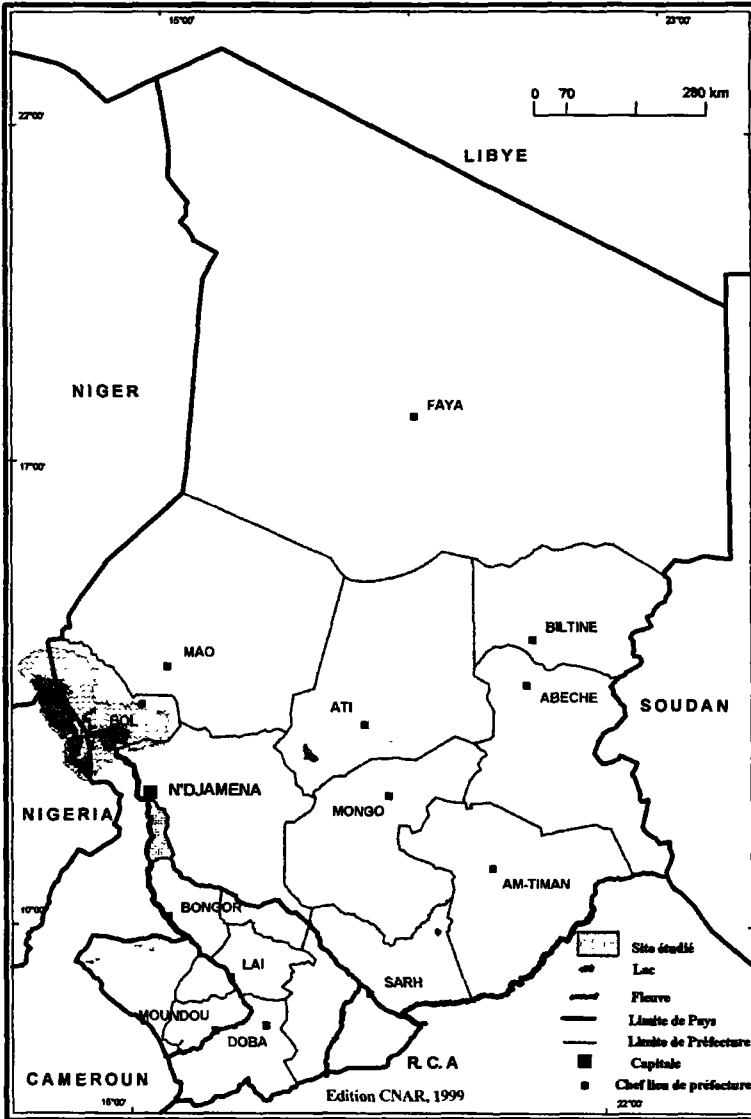


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

souhaiterions que ces supports nous révèlent. Notre préoccupation dans cette étude, il faut le rappeler, est de faire ressortir toutes les informations relatives à l'occupation du sol en un temps t , afin de suivre son évolution spatio-temporelle, pour ensuite en déduire d'autres cartes thématiques. Il nous fallait donc au préalable déterminer, de façon théorique et assez exhaustive, le contenu de la légende cartographique. Aussi, la légende retenue aborde-t-elle deux domaines thématiques qui se juxtaposent dans l'espace : les zones occupées (cultures, jachères, mosaïque de cultures et de jachères, habitat groupé et dispersé, vergers ou reboisement, voies de communication, etc.) et les zones non occupées (savane arborée, savane arbustive, forêt galerie, prairie herbeuse, sols nus, réseau hydrographique, etc.).

Les thèmes retenus ont guidé notre approche méthodologique pour l'interprétation des supports cartographiques et l'élaboration des cartes de l'occupation du sol en nous appuyant sur la réalité de terrain issue de nos propres observations. La méthode utilisée varie en fonction du support à traiter. Au total, 51,5 photographies aériennes utiles ont été interprétées au stéréoscope. Malheureusement, ces photographies n'étaient pas géométriquement corrigées. Nous avons alors procédé à des manipulations préalables, notamment la triangulation, pour essayer de les corriger. Après interprétation, l'assemblage des minutes a abouti au montage de la maquette de base partiellement corrigée dans le plan de référence spatiale. Après ce travail préliminaire, nous étions ensuite confrontés à une autre difficulté, celle de porter les coordonnées géographiques permettant le calage de ce fond analogique sur la table à numériser. Pour obtenir ces coordonnées géographiques, nous avons fait un agrandissement au 1 : 50 000 de la carte topographique de IGN de 1958 à l'échelle du 1 : 200 000.

Cet agrandissement a permis le report des coordonnées métriques. La cartographie assistée par ordinateur de cette maquette a été réalisée à l'aide du logiciel GéoConcept Expert au Centre national d'appui à la recherche (CNAR) pour élaborer la carte de l'occupation du sol en 1974. Le traitement des images HRV pour l'obtention des compositions colorées a été effectué avec le logiciel Multiscope. Une sortie de ces compositions colorées à l'échelle de 1 : 100 000 a été utilisée comme document de base pour le repérage des points d'appui (amers) sur le terrain et leurs coordonnées géographiques relevées au GPS (système mondial de radiorepérage) qui ont servi à la correction géométrique des images. Plusieurs missions sur le terrain ont été organisées par la suite pour la recherche de la réalité de terrain par l'observation de quelques transects localisés sur ces compositions colorées en tenant compte de la structure, de la couleur et de la texture des zones relativement homogènes et aussi de leur accessibilité.

À ces transects sont associés la description géographique des types de formations végétales, des espaces cultivés et, enfin, des sols nus, soigneusement notés sur des fiches de terrain. L'extrapolation de ces descriptions à d'autres zones relativement uniformes et présentant les mêmes caractéristiques a permis l'interprétation des images. Pour éviter de faire une classification automatique par la radiométrie des objets, ce qui aboutit à des résultats parfois erronés, nous avons choisi d'interpréter visuellement sur calque la composition colorée d'après la réalité de terrain.

Cette interprétation visuelle consiste à reprendre le contour des objets sachant, au préalable, à quel thème cartographique ils appartiennent. Ainsi, deux fonds analogiques ont pu être établis à partir de deux images satellitaires. Cette maquette a été numérisée dans deux fichiers différents avec le logiciel GéoConcept Expert. Puis, l'assemblage a abouti à la cartographie de l'occupation du sol de 1994. Le logiciel Multiscope n'a servi que pour le traitement numérique et la production des compositions colorées, mais pas comme assistance à l'interprétation visuelle.

3. Résultats

La méthode mise en œuvre a permis la réalisation de deux cartes de l'occupation du sol, celles de 1974 et de 1994. Le croisement de ces deux cartes a donné une carte de l'évolution de l'occupation du sol en deux décennies d'où est déduite une autre dite de segmentation du territoire. Outre leurs multitudes fonctions, l'utilisation d'un logiciel SIG a cet avantage de fournir des données statistiques (superficies et distances) pour une analyse quantitative et qualitative des thèmes cartographiés.

4. Analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol et discussion

Les cartes thématiques que nous avons obtenues, à la suite des différents traitements appliqués aux supports originaux, permettent quelques réflexions sur la situation de l'occupation du sol dans la sous-préfecture de Mandéla au cours de ces deux décennies.

4.1. Analyse de l'occupation du sol en 1974 et 1994

Rappelons que l'année 1956 (fin de la décennie 1950-1960) correspond au début de la crise climatique dans les pays du Sahel. Les effets physiques de cette crise n'ont commencé à se faire véritablement sentir sur l'environnement qu'au début des années 1970, puis le point culminant de la catastrophe écologique a été atteint avec la sécheresse de 1983-1984. Avant cette date et aux dires des paysans, la région se caractérisait par une pluviométrie relativement abondante, donc suffisante au développement de la végétation. Par ailleurs, selon les informations recueillies auprès des populations autochtones, la pratique de l'élevage était tout à fait marginale.

De nos jours, les effets néfastes de la sécheresse commencent à peser sur l'état du couvert végétal et sur les activités de production, d'une part, ainsi que sur la pression humaine pour l'occupation des terres, d'autre part. Les données statistiques (tableau 1 et figure 2) qui en sont déduites, donnent à titre comparatif l'état de l'occupation spatio-temporelle de la sous-préfecture en 1974 et en 1994. Il apparaît un net recul de la superficie de la savane arborée (5 %), alors qu'elle était de (20 %) en 1974. Celle de la savane arbustive a légèrement baissé : elle est passée de (18 %) en 1974 à (16 %) en 1994. La superficie de la forêt galerie y a complètement disparu (2 %) en 1974. La prairie herbeuse est bien conservée. La conservation de la prairie trouve son explication dans le fait qu'il s'agit d'une unité du paysage au potentiel agricole médiocre (sols vertiques difficiles à travailler) utilisée comme un territoire halieutique, pastoral et pour l'exploitation du couvert herbacé à des fins artisanales (sékos ou charganiers).

Tableau 1. Récapitulatif de l'état d'occupation du sol dans la sous préfecture de Mandéla en 1974 et en 1994.

Unités cartographiées	Occupation du sol en 1974		Occupation du sol en 1994	
	surface		surface	
	ha	%	ha	%
Savane arbustive	47 700	18	41 900	16
Savane arborée	52 500	20	12 700	5
Prairie ou savane herbeuse	109 500	43	103 700	39
Forêt galerie	4 600	2	0	0
Mosaïque de cultures-jachères	-	-	76 600	28
Cultures	35 200	14	-	-
Jachères	3 700	3	-	-
Vergers	1 500	0,5	2 000	1
Sols nus	1 500	0,5	21 600	8
Total	256 200	100	268 100	100

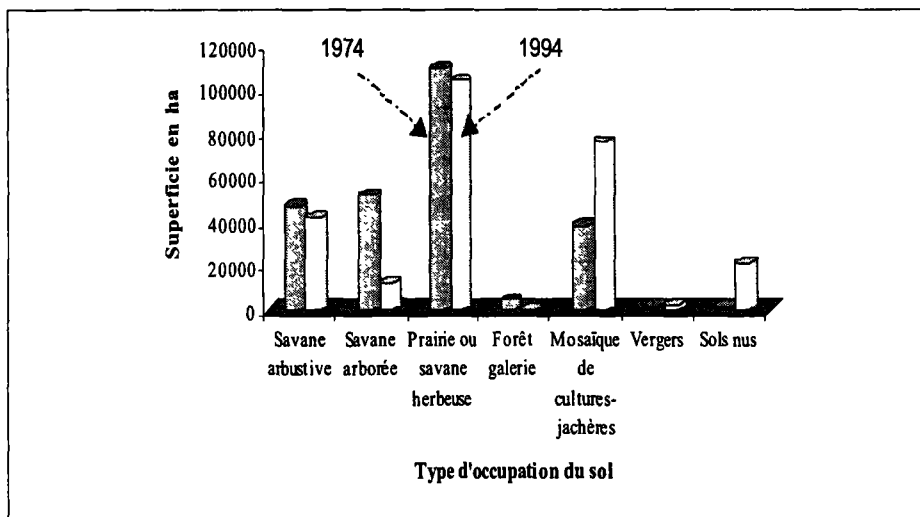


Figure 2. Occupation du sol dans la sous préfecture de Mandéla par interprétation de PVA de 1974 et d'images HRV du 29-11-1994 et du 30-11-1994. Figure établie d'après la photo-interprétation des PVA de 1974 et des images HRV (XS) du 29-11-1994 et du 30-11-1994.

Toutes ces mutations se sont certainement opérées au profit des espaces mis en culture et des sols nus, qui ont pris de l'ampleur dans la région. En effet, la mosaïque de cultures-jachères sur sols sablo-limoneux atteint 29 % en 1994 contre 17 % en 1974. Les sols nus ont conquis de vastes espaces (8 %) démontrant ainsi l'ampleur de la dégradation des sols (0,5 %) en 1974. Les marges d'erreur lors de l'évaluation des superficies à partir de ces supports sont de l'ordre du kilomètre carré, compte tenu de la méthode d'interprétation utilisée.

À ces observations, il convient d'ajouter la présence de nombreux vergers le long des fleuves du Chari et du Logone, non identifiés sur les images satellitaires et qui, du reste, ont certainement été inclus dans les formations végétales.

4.2. Analyse de l'évolution de l'occupation du sol en deux décennies

L'analyse est basée sur les résultats statistiques obtenus de l'évolution de cet espace en deux décennies (figures 4 et 19-3 et 19-5, voir cahier couleur). On distingue grosso modo sept grandes tendances de mutations au cours de cette période et cela est le fait de l'exploitation différentielle du milieu par les populations.

La première tendance correspond aux zones de stabilité du milieu naturel (SMN). Elle représente la vaste plaine inondable du Logone qui est restée bien conservée par son ampleur et par son contenu (40 % du territoire) durant ces deux décennies, même si les feux de brousse, l'exploitation à des fins pastorales par les éleveurs et l'artisanat (les fabricants de séko ou charganiers) sont courants et périodiques sur cet espace.

La deuxième correspond aux zones de stabilité du milieu fortement anthropisé (SMFA) et couvre environ 10 % la superficie de la sous-préfecture. C'est l'ensemble des exploitations essentiellement agricoles et de ressources naturelles localisées en zone exondée depuis 1974 à 1994. À cause de leur exploitation continue, les sols sont quasiment improductifs (perte de fertilité).

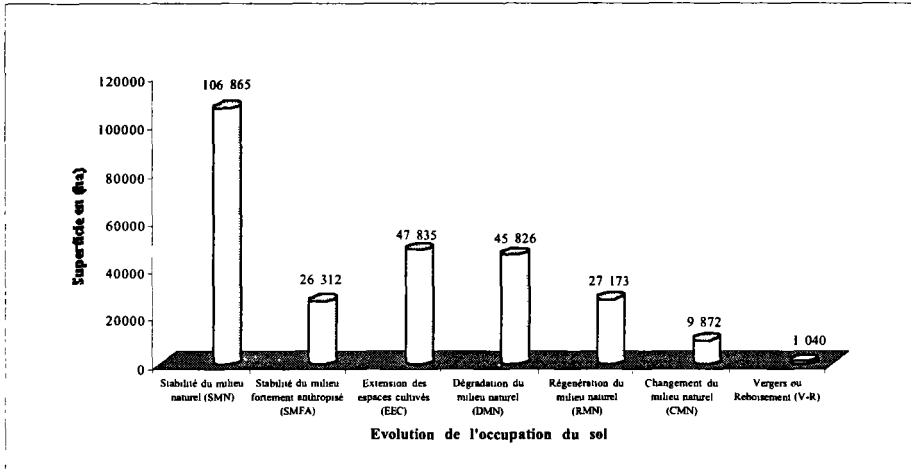


Figure 4. Évolution de l'occupation du sol dans la sous préfecture de Mandéla entre 1974 et 1994. Figure établie par croisement des cartes de l'occupation du sol de 1974 et 1994

La troisième correspond à l'extension des espaces de cultures après 1974 (EEC). Elle a pris des proportions importantes (18 %) de la superficie de la sous-préfecture au détriment des formations végétales, atteignant pratiquement le double de celles occupées en deux décennies. Cela atteste de la forte pression exercée sur le milieu. Leur cumul de 1974 à 1994 s'élève à plus de 73 000 ha, soit plus de 80 % de la zone exondée. On peut alors affirmer que cette unité du paysage (zone exondée) est très convoitée et qu'elle est presque entièrement occupée. Dans tous les cas, c'est à défaut d'obtenir de l'espace dans cette unité du paysage que certains paysans, notamment les migrants, se rabattent sur les terres marginales des bas de pente ou de bas-fonds.

La quatrième correspond à quelques hectares d'aménagements (vergers et reboisement) appartenant généralement aux personnes nanties résidant à N'Djaména et sont identifiés le long des cours d'eau.

La cinquième correspond aux zones de régénération du milieu naturel (RMN) et elle correspond à une faible reprise de la végétation (environ 10 %) et concerne essentiellement les anciennes zones cotonnières autour du village de Kalgoa et quelques mises en défens réalisées dans le cadre des projets de développement.

La sixième correspond aux zones de dégradation du milieu naturel (DMN) ou « naga » ou sols dépourvus de végétation. Ces zones ont atteint plus de 17 % de la sous-préfecture de Mandéla en 1994. Ceci équivaut à la même proportion des terres mises en exploitation à partir de 1974. Ces sols nus ne peuvent plus être mis en culture à moins d'un aménagement particulier. C'est dire que ces terres improductives sont hors d'usage et sont un indicateur sérieux de la dégradation des sols.

Enfin, la dernière correspond aux milieux à hydromorphie semi-permanente (MHS-P), qui représentent près de 4 % de la superficie du canton, qui a changé complètement de caractéristiques physiques.

5. Conclusion

Au terme de cette étude, il a été possible de diagnostiquer et de suivre la mutation de cet espace au cours de ces deux décennies. On peut affirmer que la superficie des espaces cultivés ont connu un accroissement au détriment des formations végétales. En effet, en 20 ans, les espaces mis en culture et les sols nus ont quasiment doublé. On note surtout la forte proportion de terres utilisées entre 1974 et 1994, ce qui fait bien ressortir la tendance générale à la réduction de la durée des jachères et, d'une façon générale, la segmentation de ce territoire.

D'après la cartographie, le territoire de la sous-préfecture de Mandéla se structure et se segmente en quatre sous-espaces ruraux (figure 5) que sont :

- le sous-espace rural périurbain influencé par la capitale N'Djaména;
- le sous-espace rural en voie de saturation;
- le sous-espace convoité ou la région de Mandéla;
- et, enfin, le sous-espace de la plaine inondable du Logone non cultivée, mais exploitée par les pêcheurs pendant les crues et les pasteurs à la décrue.

Aujourd'hui, la sous-préfecture de Mandéla a atteint un niveau de dégradation du fait de son exploitation à tel point que les conflits d'occupation du sol et de gestion des ressources naturelles entre acteurs du développement sont courants (bagarres intercommunautaires et même morts d'hommes).

Quels enseignements tirer de cette esquisse d'analyse :

- le premier est que les deux facteurs (démographie et climat) jouent un rôle déterminant dans le façonnement du paysage actuel de la sous-préfecture de Mandéla;
- le deuxième est, qu'à cette allure et en projetant les résultats actuels, la sous-préfecture de Mandéla présentera dans les prochaines années la physionomie suivante : la disparition des formations végétales au profit des zones de cultures qui, elles-mêmes, déboucheront sur des jachères de courtes durées et de sols nus; on assistera à l'apparition de savanes-parcs et à la segmentation du territoire; la réserve de faune de Mandéla n'est plus qu'un lointain souvenir, dans la mesure où il n'y existe quasiment plus d'animaux sauvages.

6. Remerciements

Nos remerciements vont à l'endroit de toutes les bonnes volontés qui nous soutiennent dans ce travail de thèse de doctorat de géographie. Nous remercions en particulier la Mission de coopération et d'action culturelle, particulièrement Mr N. Fornage et M. S. Bourgeade; le directeur du CNAR Dr El Baba Mallah et le responsable de la cellule de Télédétection et SIG du CNAR, Mr J. Libar; la direction scientifique assurée par M. F. Courel de l'UMR/PRODIG du CNRS.

Nous remercions également les responsables du Centre international de recherche en agronomie pour le développement (CIRAD-TERA), particulièrement J. P. Tonneau et G. Faure pour l'attention qu'ils ne cessent de porter à notre travail.

Enfin, nous remercions l'Agence universitaire de la Francophonie qui a bien voulu faire partager nos résultats avec la communauté scientifique en nous invitant aux VIII^e journées scientifiques du Réseau Télédétection tenues du 22 au 25 novembre 1999, à Lausanne en Suisse.

7. Références

- COUREL, M.-F. 1985. Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. IBM France, Paris, 440 p.
- COUREL M.-F. 1985. L'adaptation de la végétation sahélienne à la sécheresse récente : la contraction des ligneux. Photo-interprétation, n° 1985-1-2, p. 9-15.
- N'DJAFI OUAGA. H. 1996. Étude spatio-temporelle de l'occupation du sol (1974-1994) de la région de Mandéla dans le canton Madiago (TCHAD). Mémoire de DEA, Université de Paris, 75 p.
- N'DJAFI OUAGA. H. 1998. Appréhension des stratégies paysannes dans la mutation des espace ruraux. Cas du canton Madiago (Chari-Baguirmi), Rapport du 1^{er} stage de thèse de doctorat, UMR/PRODIG-CNRS, Universités de Paris I, 14 p. + annexes.
- N'DJAFI OUAGA. H. 1999. Appréhension des stratégies paysannes et mutations des espace ruraux. Cas du canton Madiago dans la zone de concentration du 6^e F.E.D. Rapport du 2^{ème} stage de thèse de doctorat, UMR/PRODIG-CNRS, Université de Paris I, France, 13 p. + annexes.
- IGN. 1958. Carte topographique de Mogroum à l'échelle du 1 : 200 000^e, feuille NC-33-XXII, Paris.

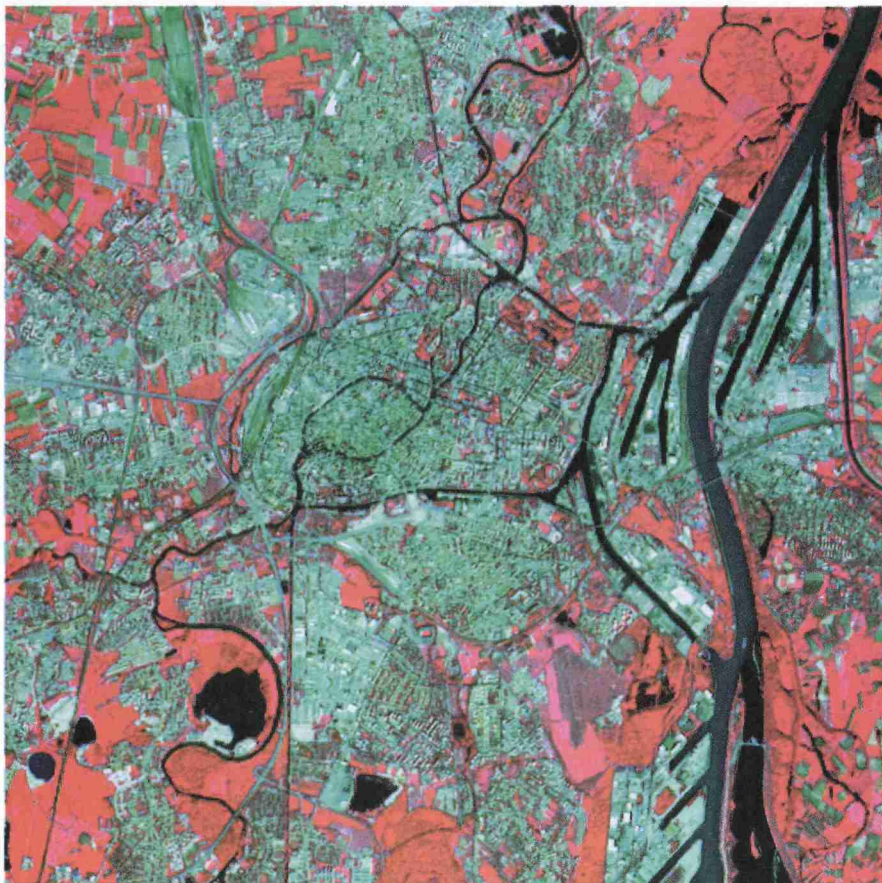
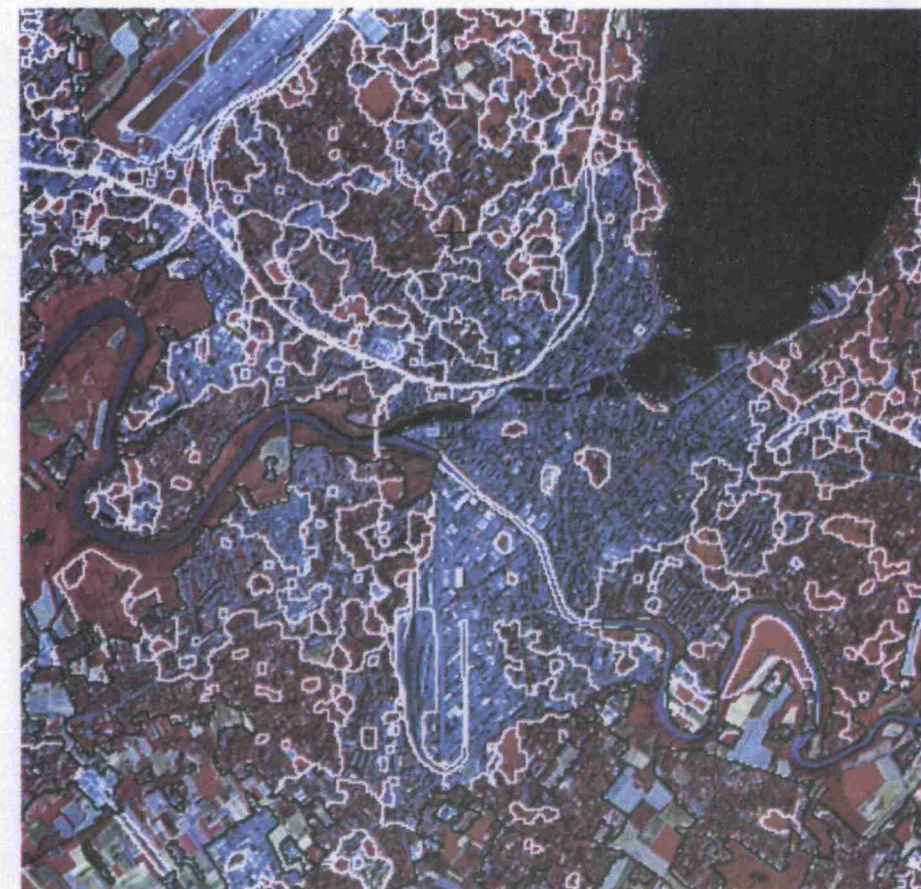


Figure 5-1. Fusion d'images HRV (XS) de juillet 1992 et P de mars 1992 de SPOT sur le centre de l'agglomération de Strasbourg par la méthode de fusion HPF.



(d'après TERRETTAZ, 1998, p. 256)

== Contours des segments

— Contour du bâti

Figure 5-3. Segmentation de l'enveloppe bâtie de l'agglomération de Genève à l'aide de la méthode « PVI-MM-VOI ». Les limites ont été superposées à la composition colorée issue de la fusion des bandes HRV (XS et P) de SPOT par la méthode HPF.

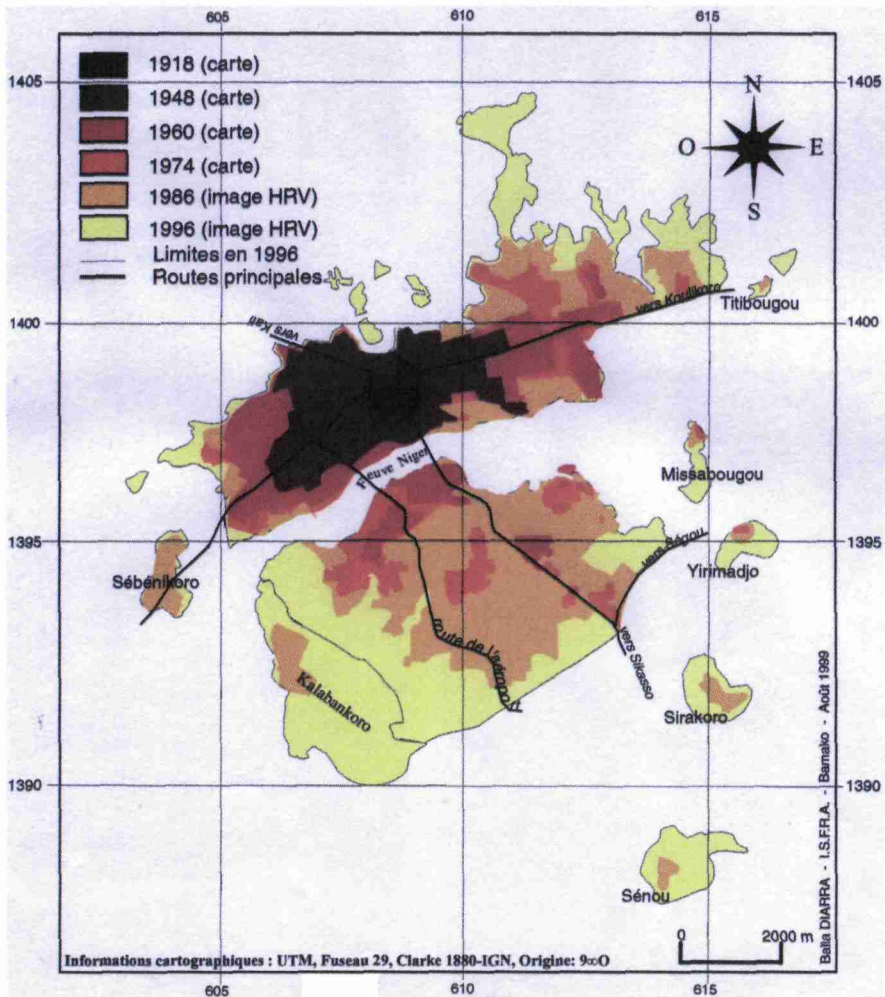


Figure 6-2. Carte résumant l'évolution de Bamako et des villages étudiés, de 1918 à 1996

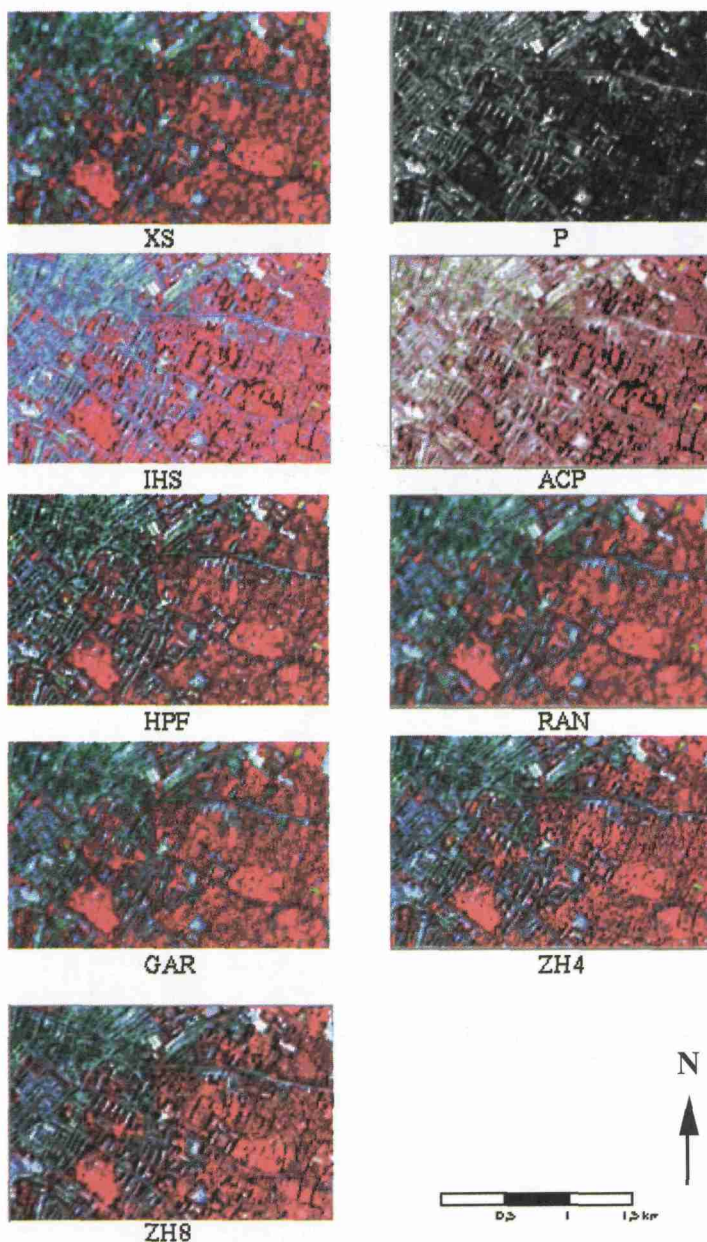
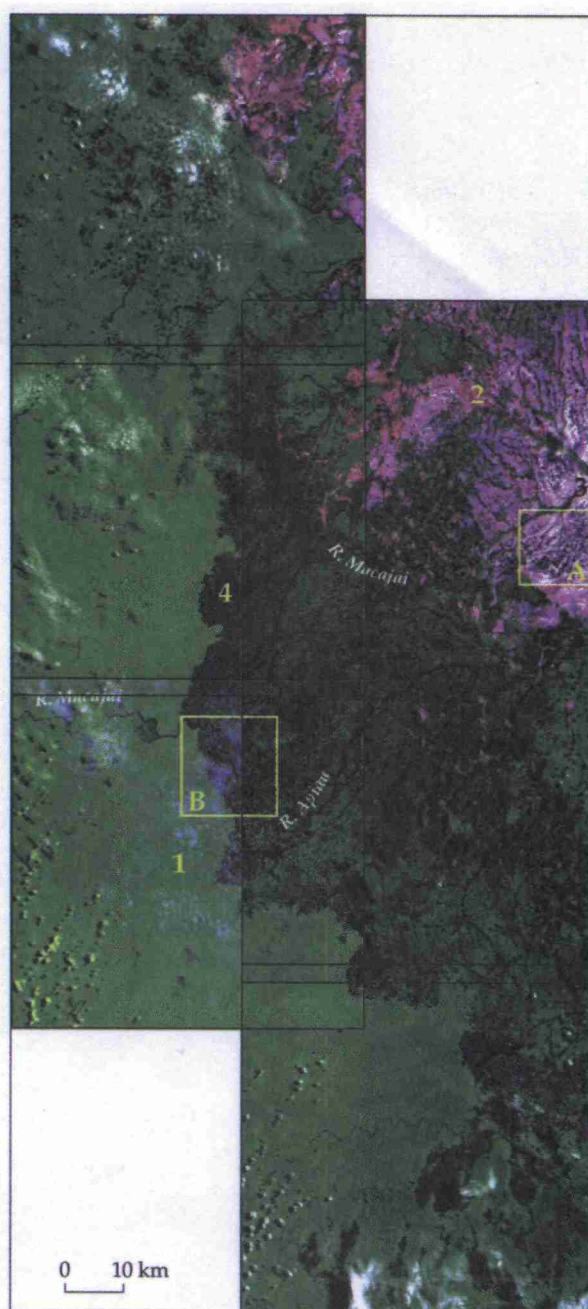


Figure 9-6. Compositions colorées des imagettes de fusion obtenues à partir des différentes méthodes. Sur cette figure, XS désigne la composition colorée des bandes originales; P l'image panchromatique; IHS, ACP et HPF compositions colorées obtenues respectivement à partir des méthodes de l'IHS, de l'ACP et de l'HPF; RAN et GAR compositions colorées obtenues par la méthode des ondelettes respectivement suivant l'approche de Ranchin et de Garguet; enfin ZH4 et ZH8 compositions colorées obtenues à partir de la méthode des ondelettes suivant l'approche de ZHOU avec niveau de décomposition égal respectivement à 2 et à 3.



1. Végétation très dégradée et cultures
2. Forêt de plaine, sempervirente saisonnière brûlée
3. Savane semi-saisonnière brûlée
4. Forêt de plaine, saisonnière sempervirente non touchée par le feu
5. Forêt tropicale dense sempervirente
6. Nuages

Figure 13-2. Image VGT du Roraima, 21 avril 1998, composition colorée – Rouge : canal 4 (MIR), Vert : canal 3 (PIR), Bleu : canal 1 (Bleu).



- | | |
|---------------------------------|------------------|
| 1 : Forêt | 3 : Sable sec |
| 2 : Sols secs, végétation sèche | 4 : Forêt brûlée |

Figure 13-3. Scènes HRVIR couvrant la ZED (voir fig. 1), 21-4-98. Compositions colorées - Rouge : canal 4 (MIR), Vert : canal 3 (PIR), Bleu : canal 2 (Rouge).

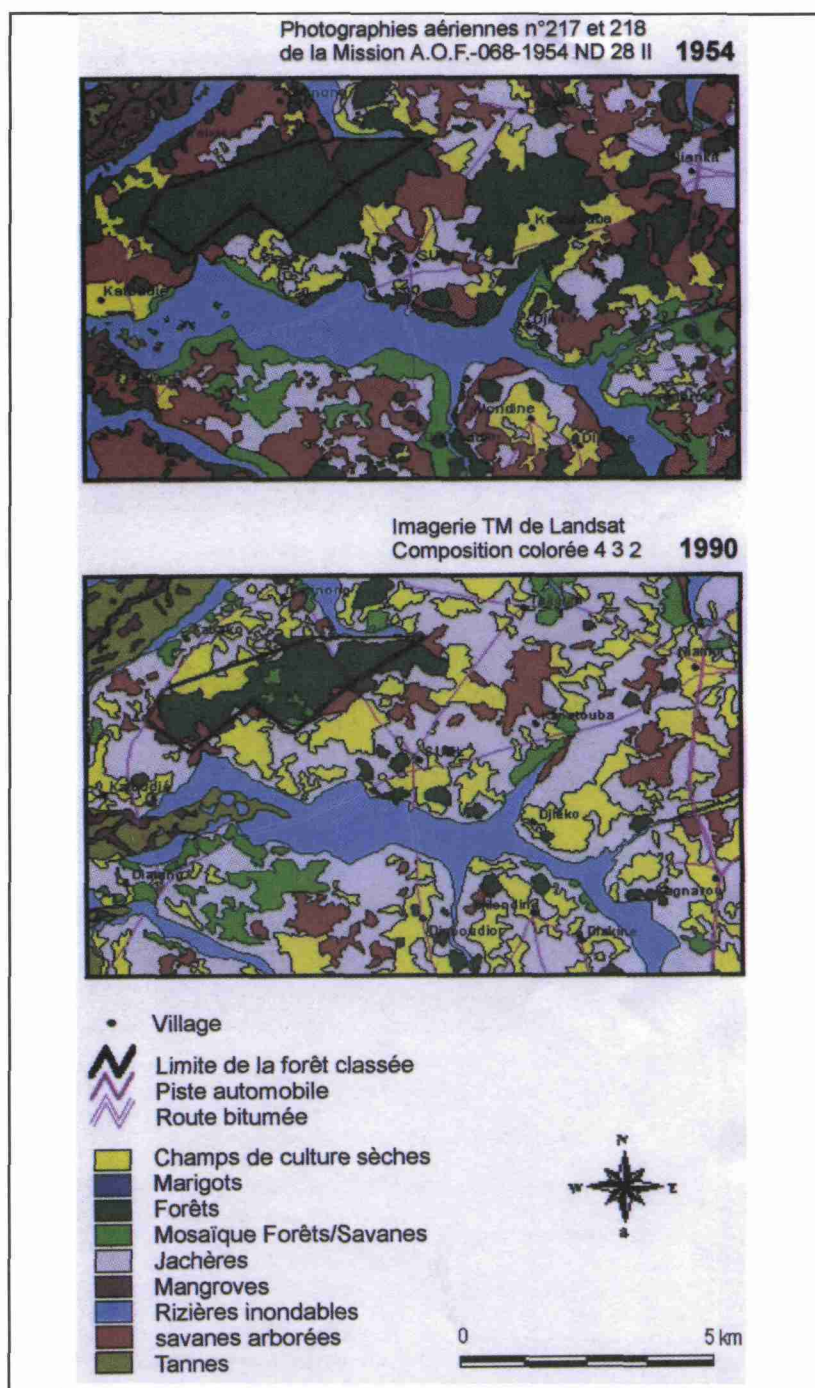


Figure 15-3. Évolution de l'occupation du sol entre 1954 et 1990 dans le terroir de Suel et ses environs.

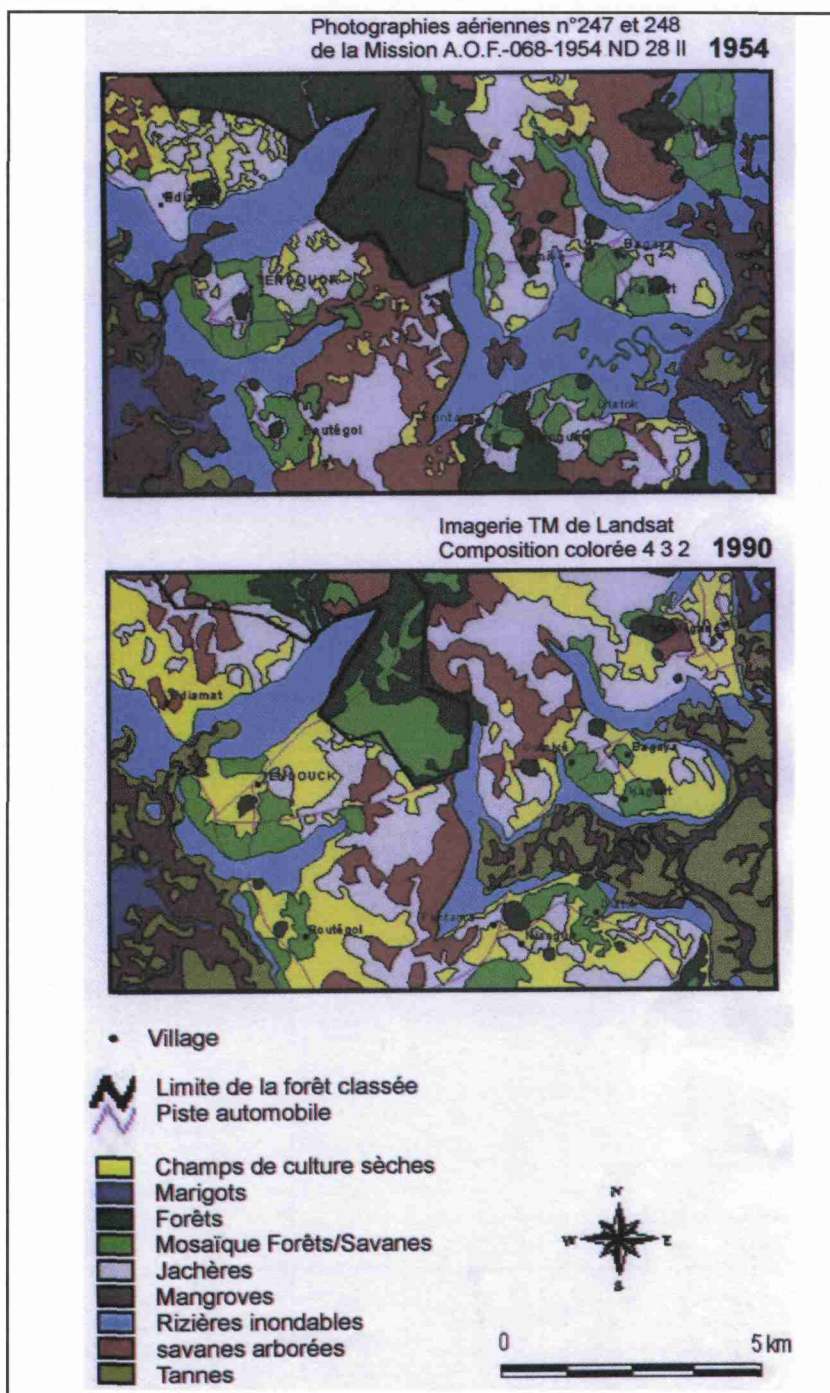


Figure 15-4. Évolution de l'occupation du sol entre 1954 et 1990 dans le terroir de Tendouck et ses environs.

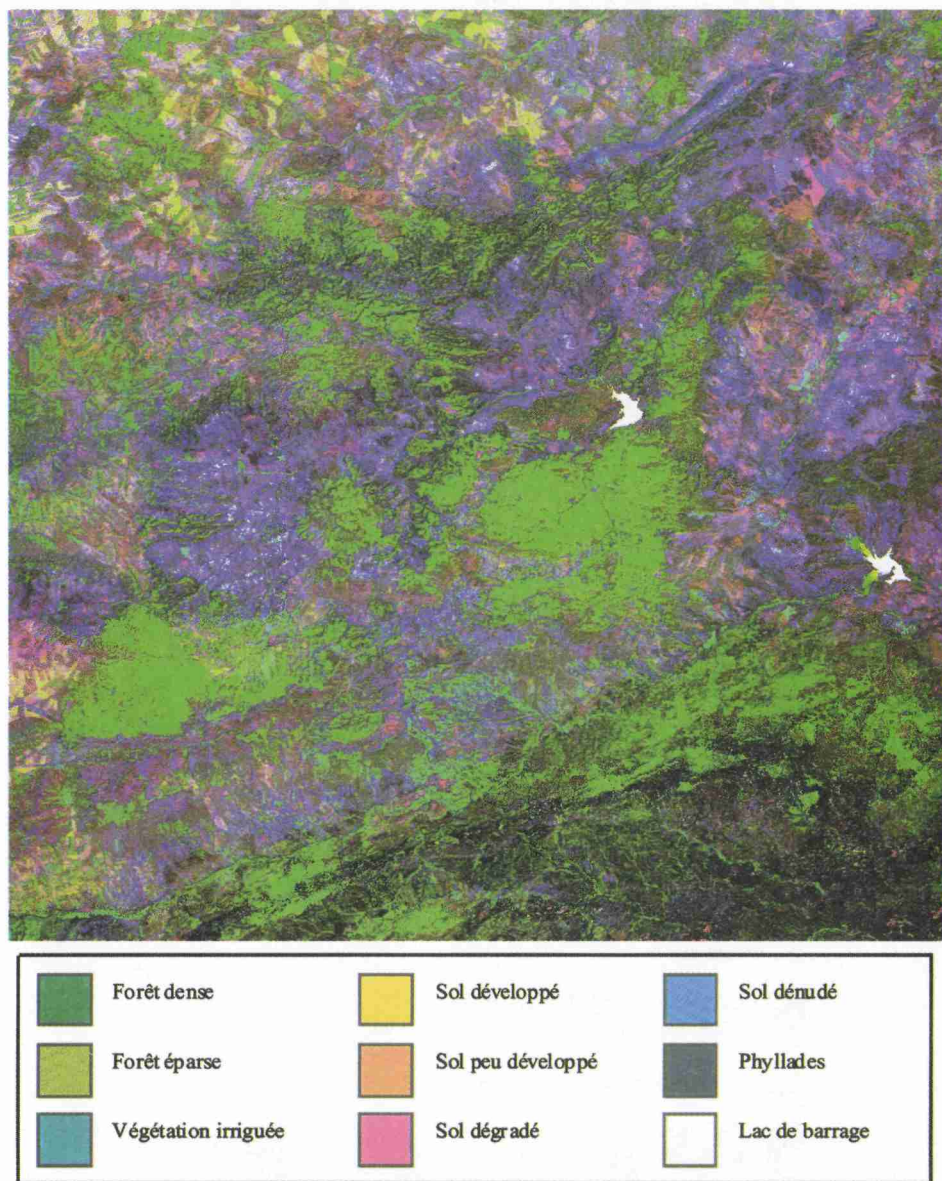


Figure 16-6. Image fausse couleur représentant les conditions de surface de la zone d'étude, produite par codage de la teinte dans le rouge, la saturation dans le vert et l'intensité dans le bleu. Cas des bandes TM7, TM4 et TM1. Image de 45 km par 45 km.

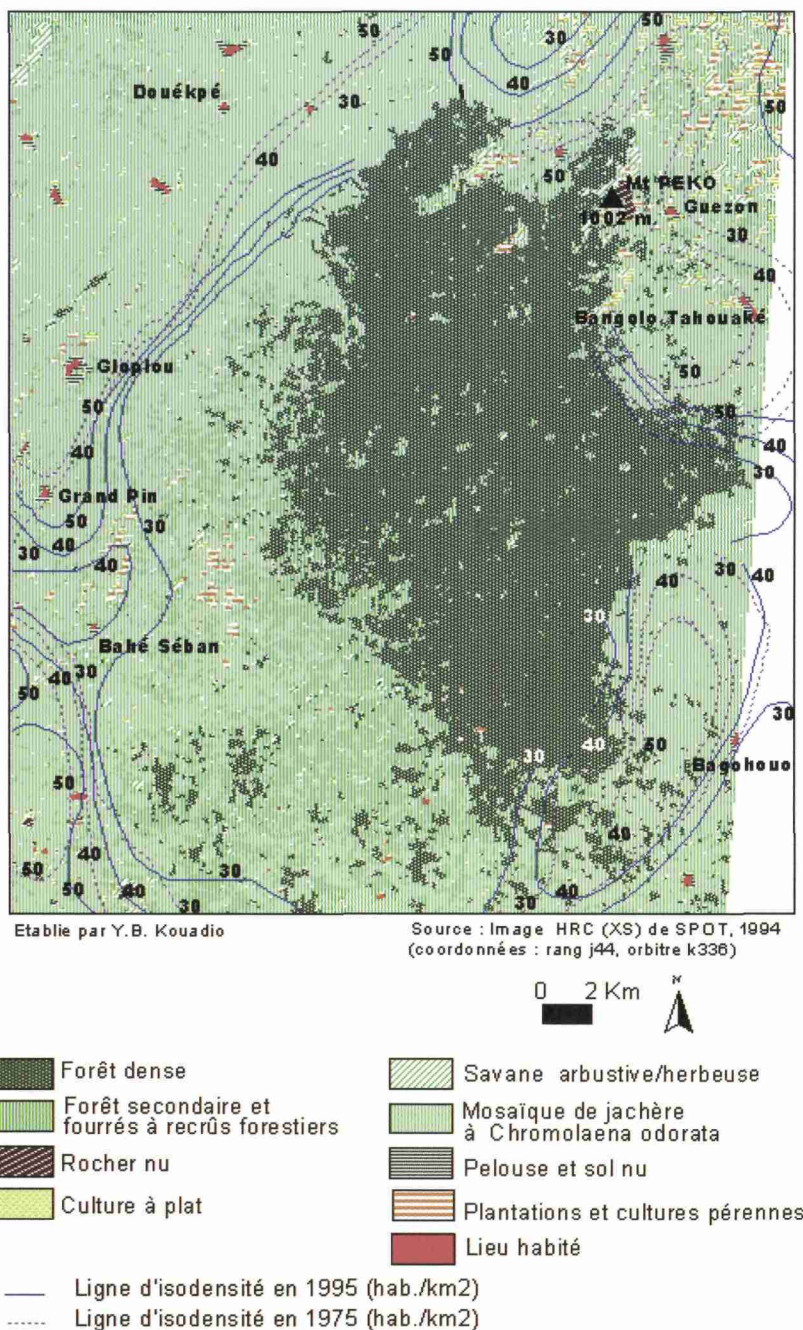


Figure 17-5. Densités de population et état de l'occupation du sol en 1995.

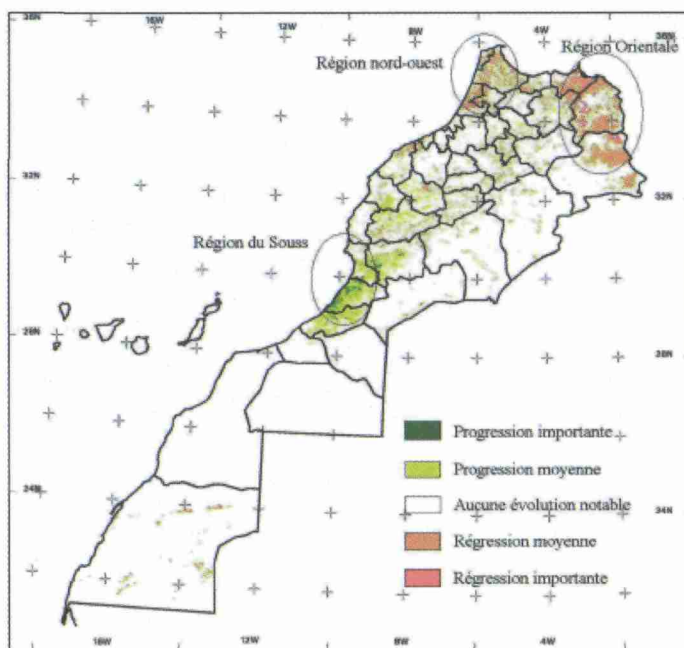


Figure 18-1. Comparaison des synthèses annuelles de NDVI entre les années 1994 et 1996.

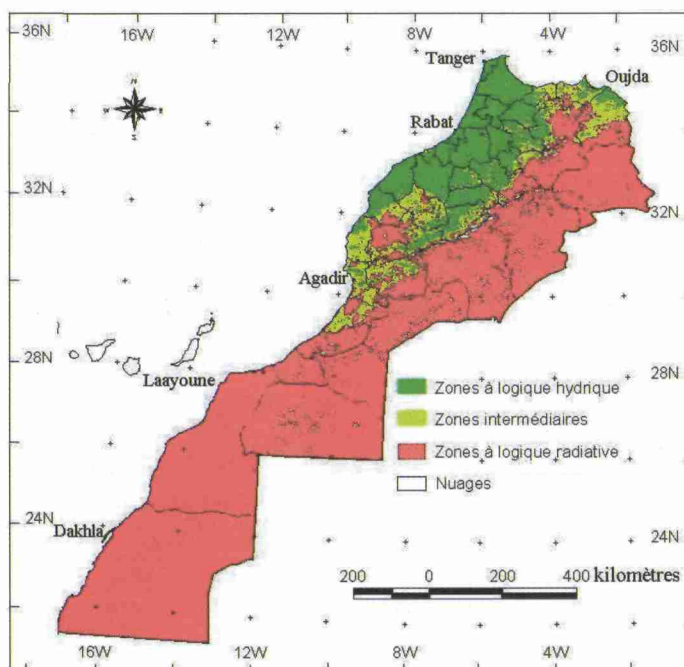


Figure 18-3. Résultat de l'approche basée sur le calcul de l'albédo et de la température de surface à partir de l'image du 03-03-1987 : caractérisation de l'état hydrique.

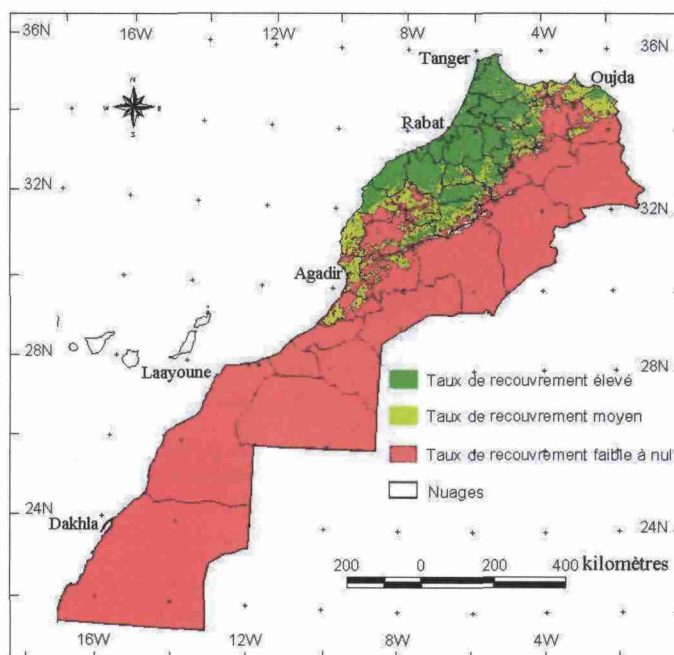


Figure 18-5. Résultat de l'approche basée sur le calcul de l'indice de végétation et de la température de surface à partir de l'image du 03-03-1987 : caractérisation de l'état de la végétation.

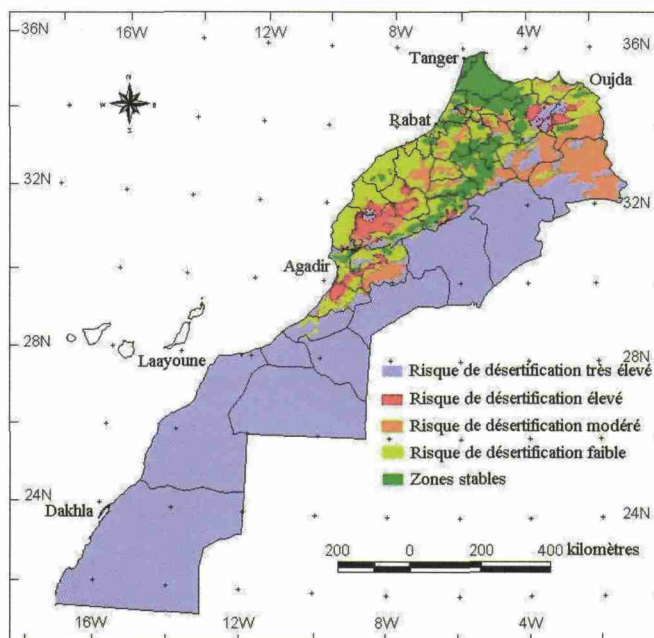


Figure 18-6. Carte synthétique du risque de désertification au Maroc.

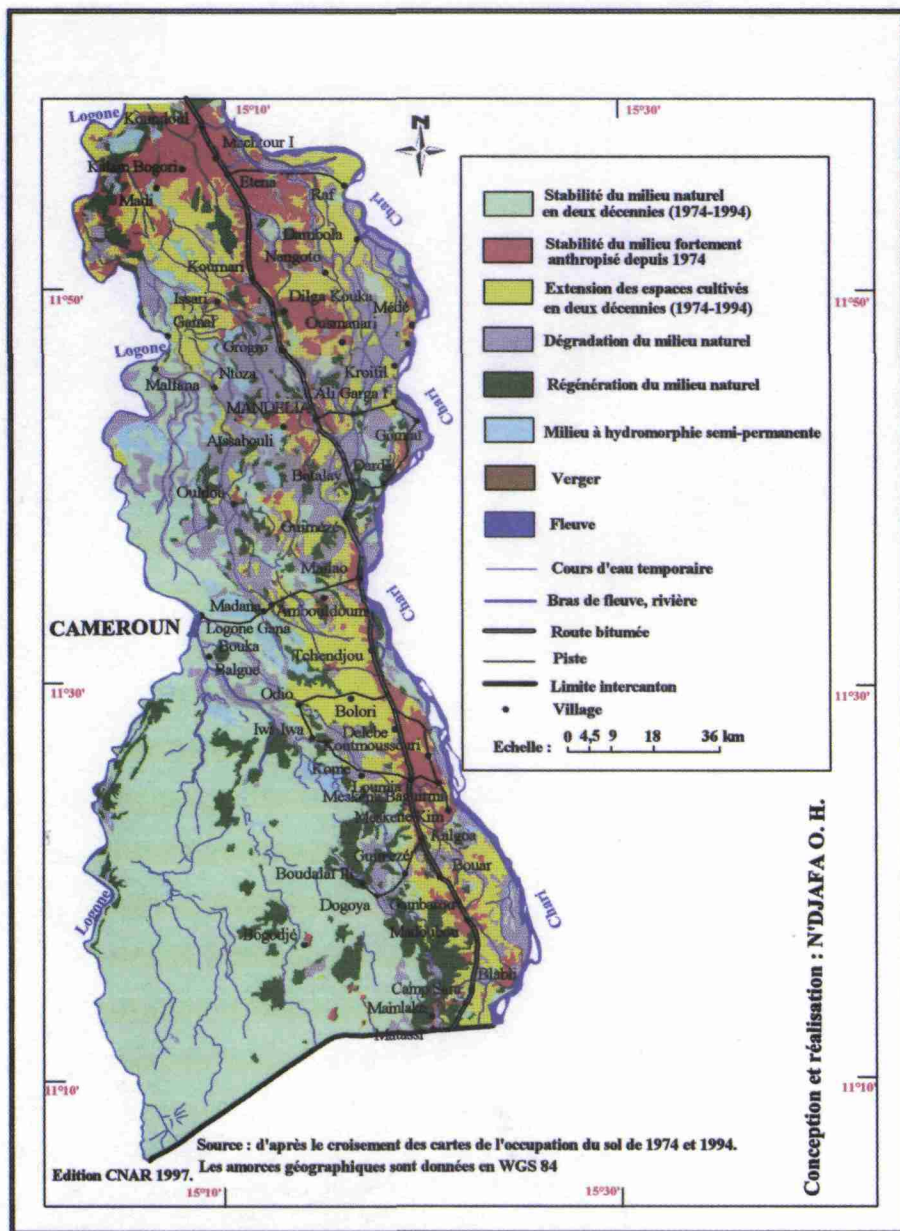


Figure 19- 3. Évolution de l'occupation du sol dans la sous préfecture de Mandéla entre 1974 et 1994.

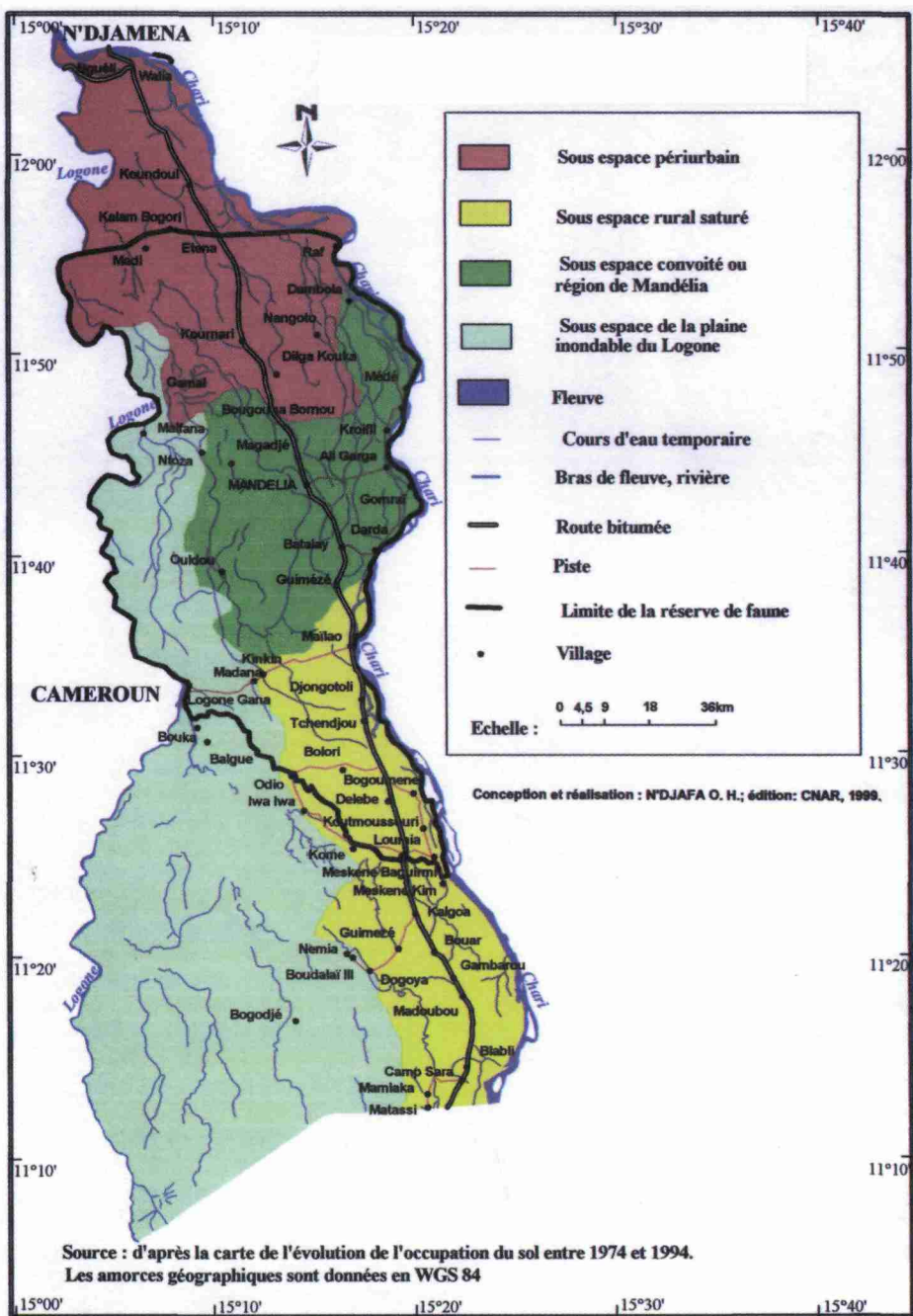


Figure 19- 5. Segmentation de la sous préfecture de Mandéla

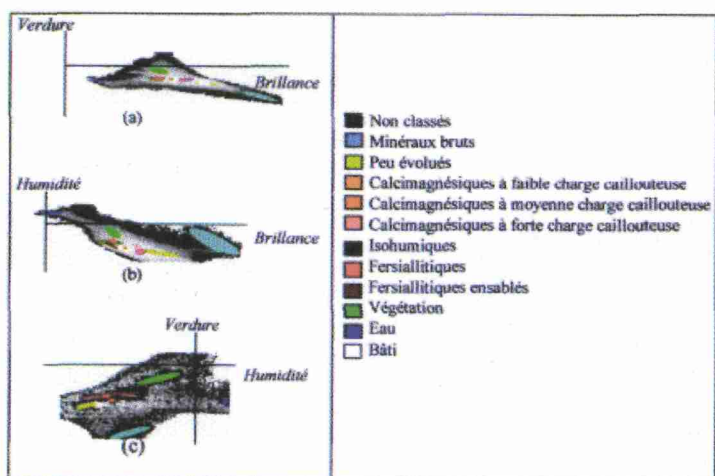


Figure 21-3. Projection des différentes classes de sol sur les plans de la végétation (a), des sols (b) et de la transition (c), issues de l'application de la transformation du chapeau haut-de-forme sur la zone étudiée.

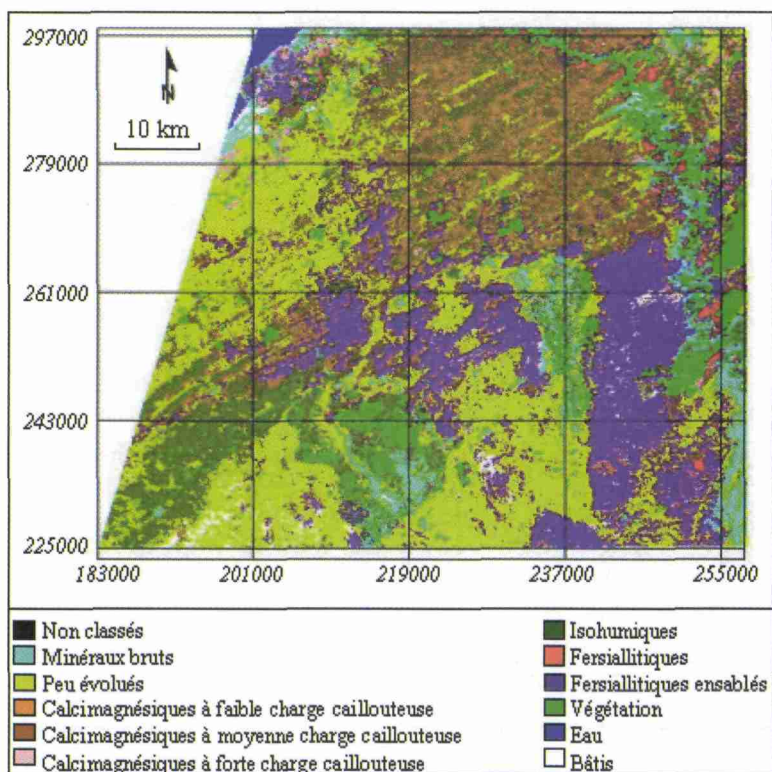


Figure 21-4. Carte des sols obtenue par classification dirigée de l'image TM de la zone d'étude.

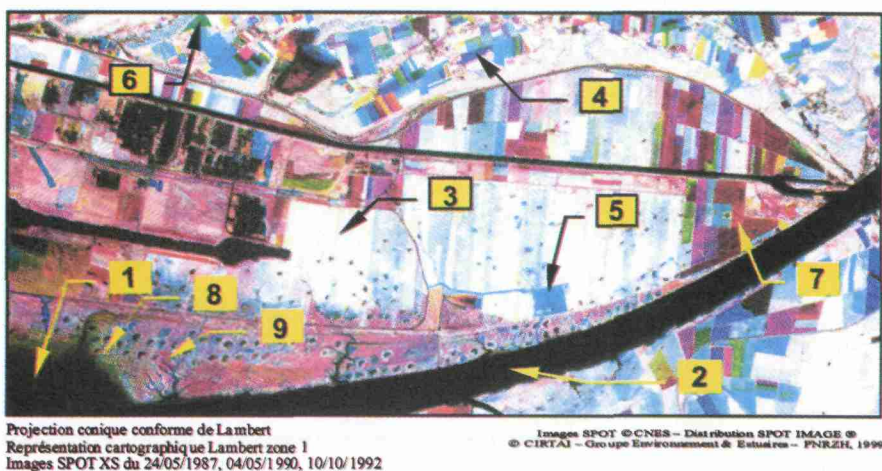


Figure 22-2. Appréhension de la cinématique paysagère à l'aide du NDVI : 1) vase nue; 2) eau; 3) formation végétale qui n'a pas évolué; 4) espace encore végétalisé en mai 1987 mais qui a été transformé en surface artificialisée dès 1990; 5) secteur dont la minéralisation est postérieure à mai 1990; 6) surface qui n'a été recouverte de végétation qu'en 1990; 7) surface qui n'a été recouverte de végétation qu'en 1992; 8) premier secteur colonisé par les roselières au détriment des vases nues; 9) vasière expérimentale.

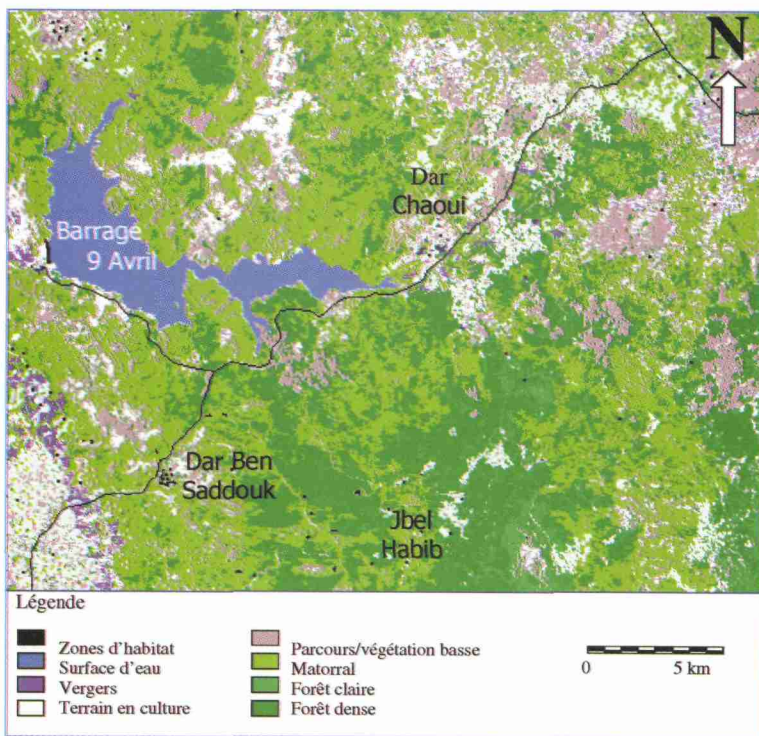


Figure 23-4. Carte de l'occupation du sol à partir de l'image HRV du 28-04-1998

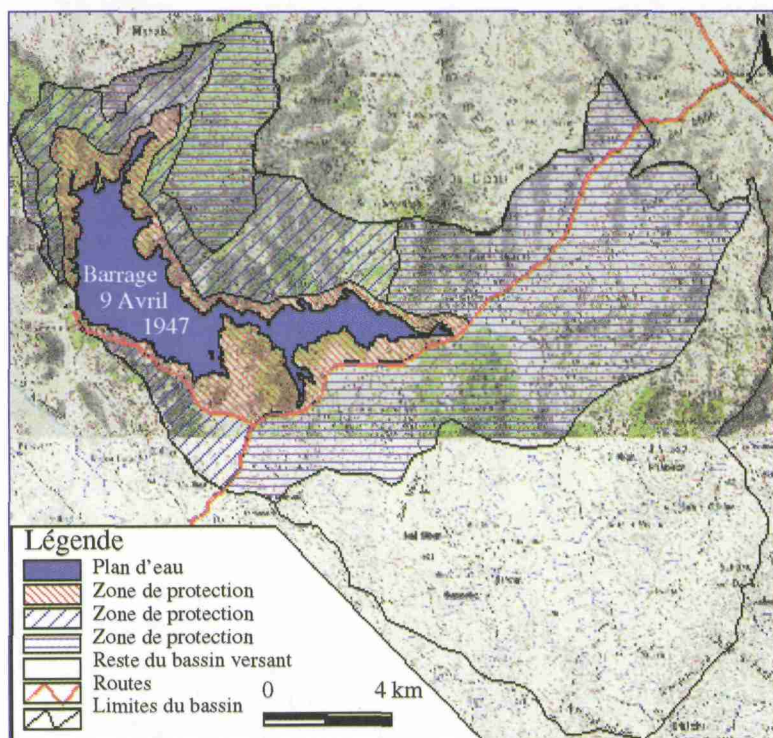


Figure 23-5. Carte de la délimitation des zones de protection des ressources en eau

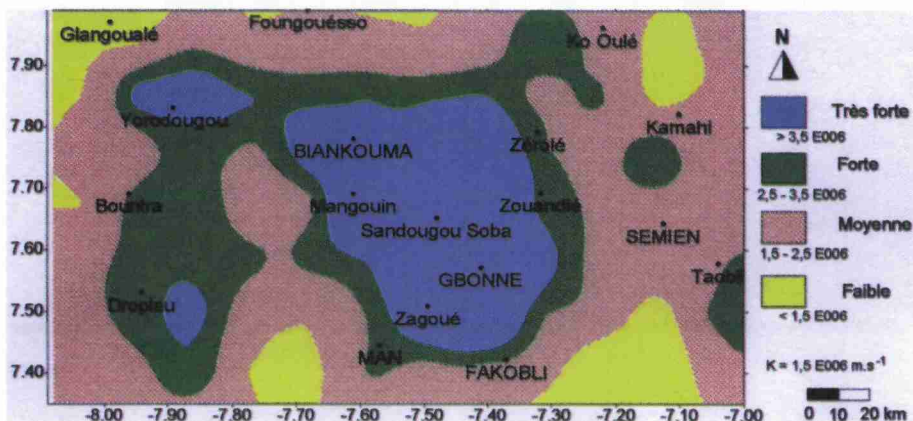


Figure 25-3. Carte de la perméabilité induite moyenne de la région semi-montagneuse de Man-Danané

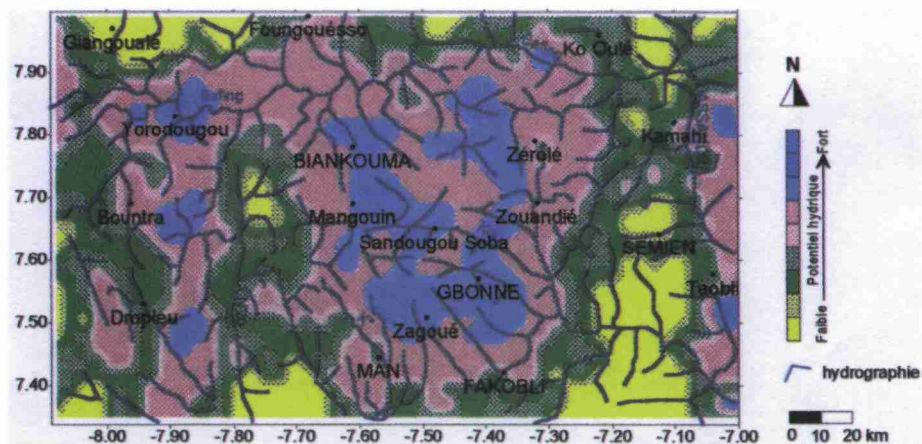
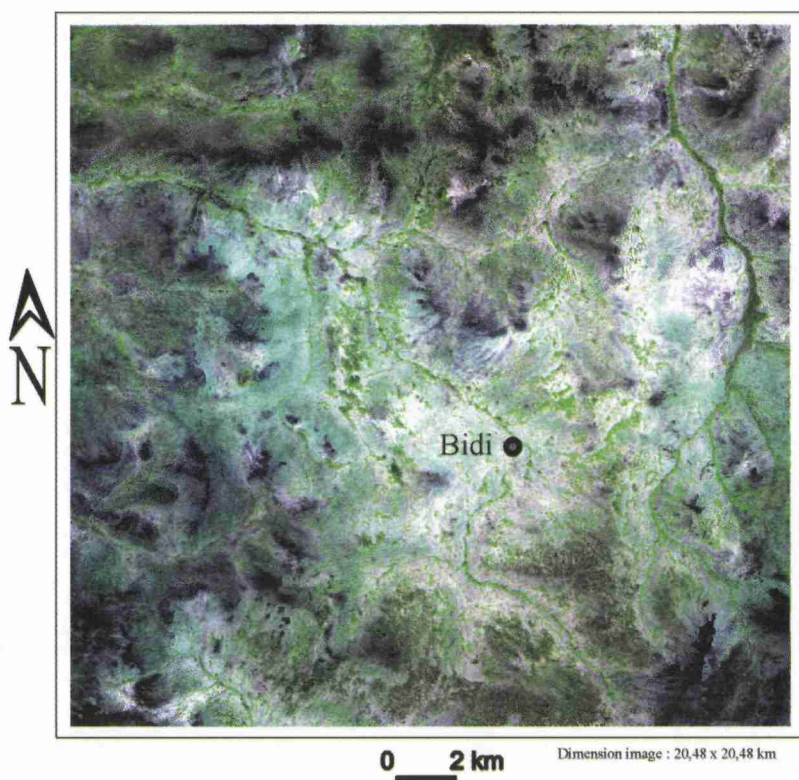
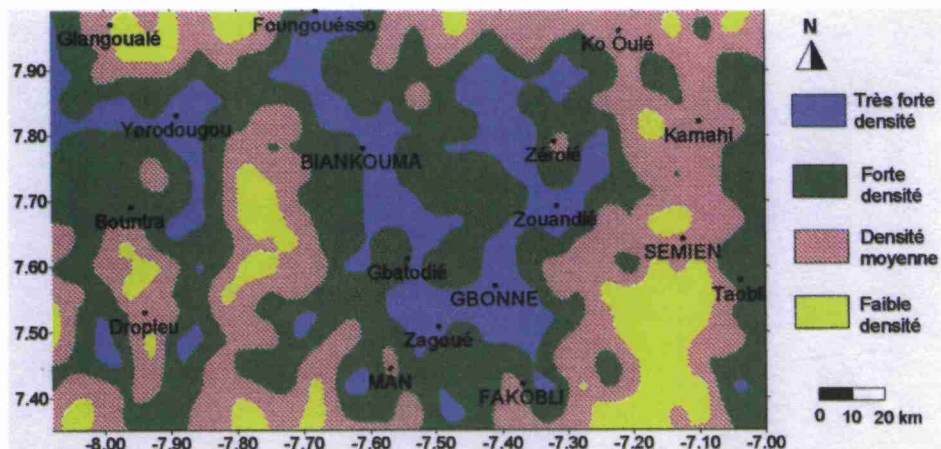


Figure 25-4. Relation de type alimentation-drainage entre les couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines et les principaux cours d'eau de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire.



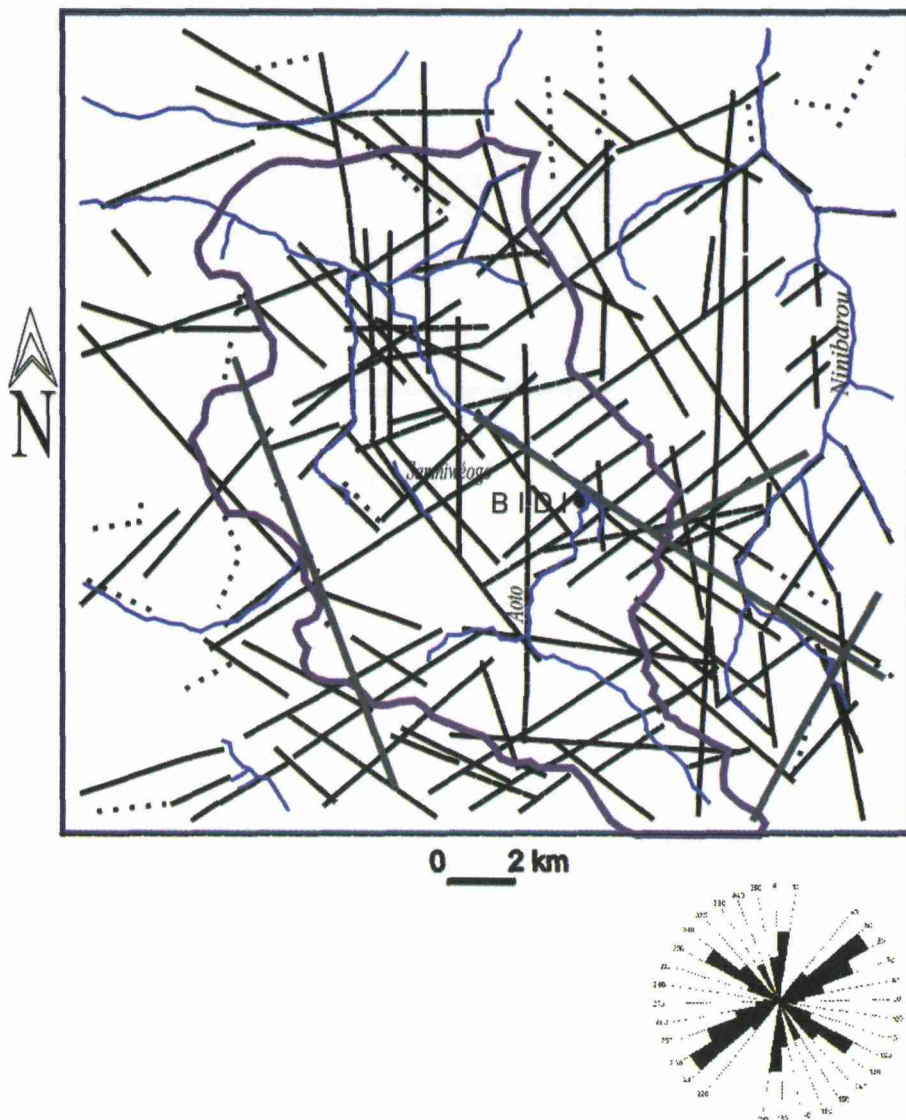


Figure 27-4. Carte linéaire de l'image HRV de SPOT (scène 051/322, juillet 1988)
 Légende : tiretés = type A (alignement de végétation); traits pleins = type B (contraste de tonalité et de texture); pointillés = type C (corniche de cuirasse latéritique); trait épais continu = limite du bassin de Bidi; trait fin continu = réseau hydrographique

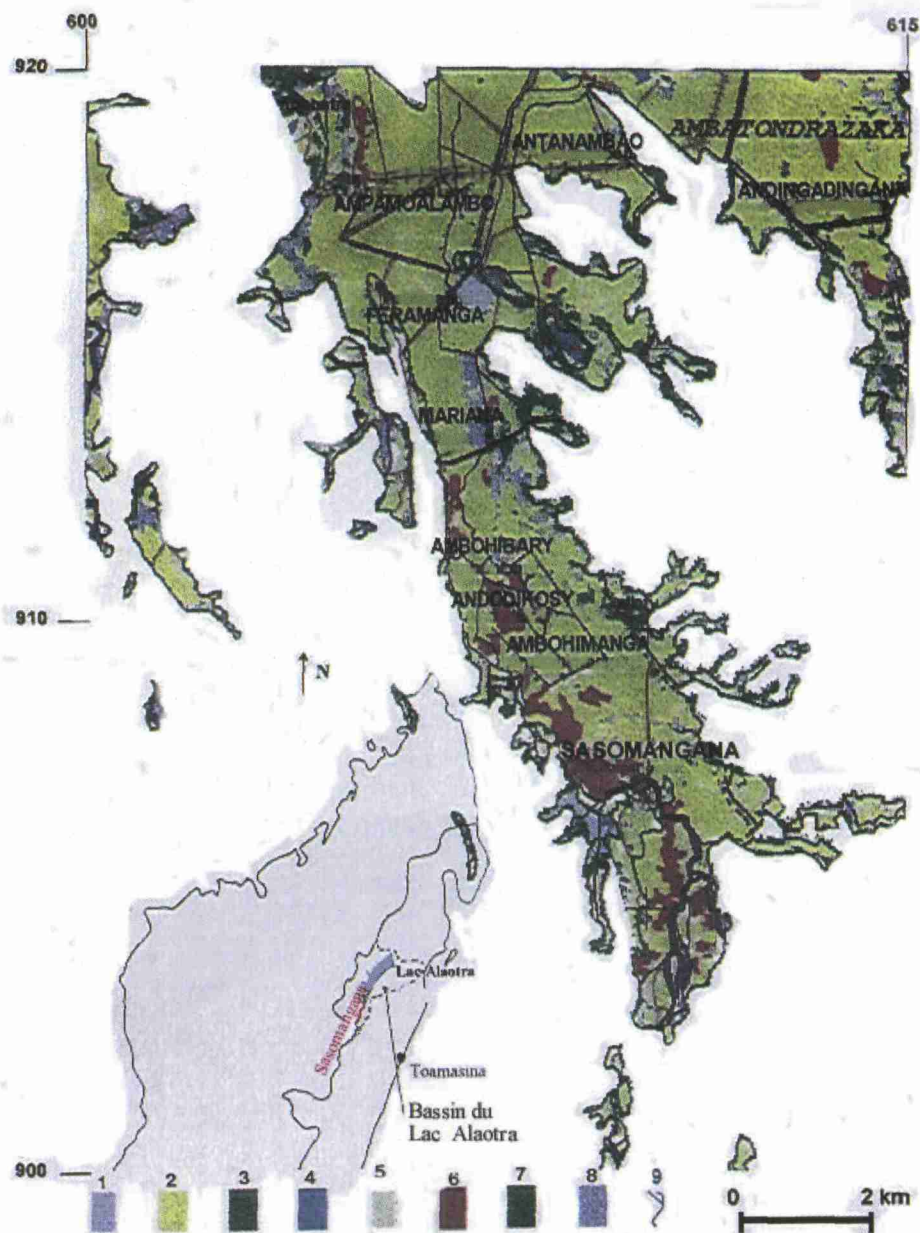


Figure 28-2. Carte de l'occupation du sol (plaine rizicole de Sasomangana) obtenue par analyse numérique de la composition colorée effectuée sur les données initiales et générée à partir des canaux TM2, TM3 et TM4. Classification dirigée au maximum de vraisemblance; masque sur le domaine extérieur à la plaine. Résolution 25 m. Légende : 1) plans d'eau (mares, lacs), 2) rizières, 3) forêt ripicole, 4) prairie à *Cynodon dactylon*, 5) prairies à *Digitaria humberti*, 6) sols nus à sable sec, 7) forêt primaire, 8) sols mouillés des marais à Cypéracées, 9) cours d'eau.

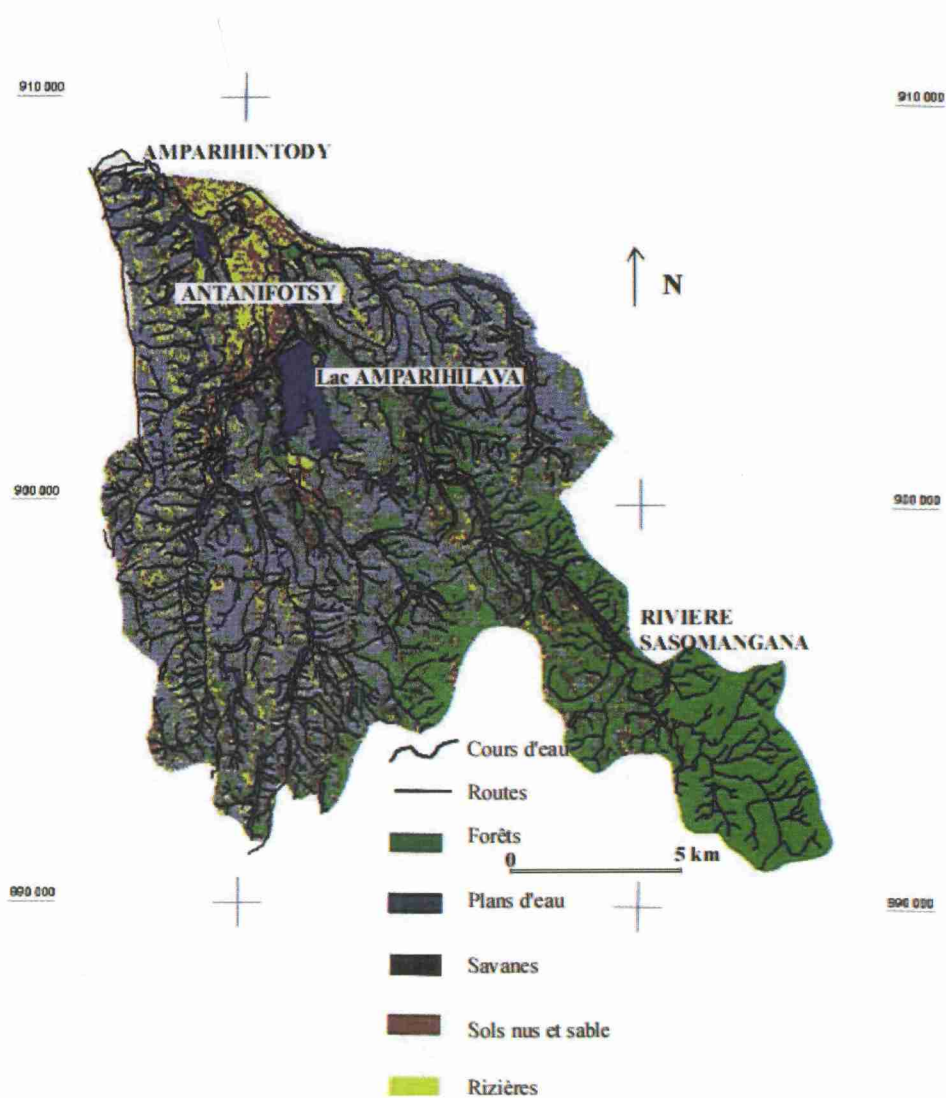


Figure 28-3. Carte de l'occupation du sol (bassin versant de Sasomangana) obtenue par les mêmes traitements numériques décrits pour la figure 2 et classification en 5 thèmes au lieu de 8.

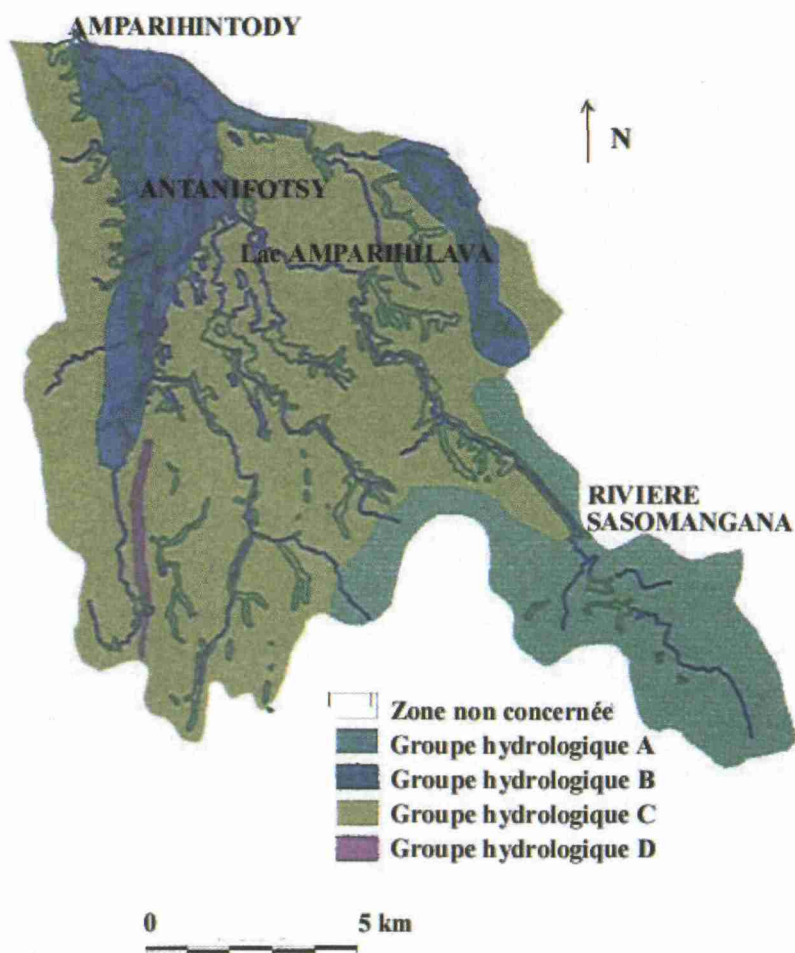


Figure 28-4. Carte des sols par groupe hydrologique résultant de la classification des sols selon leur aptitude au ruissellement et leur capacité d'infiltration (modèle SCS).

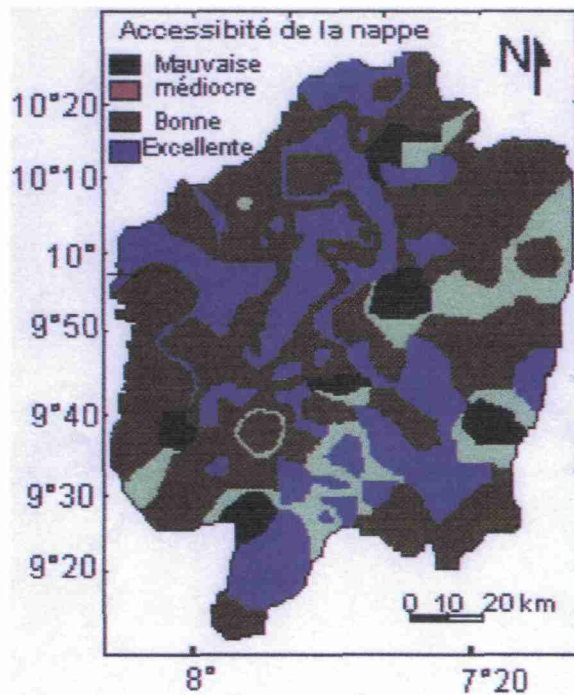


Figure 29-5. Carte d'accessibilité de la nappe souterraine d'Odienné

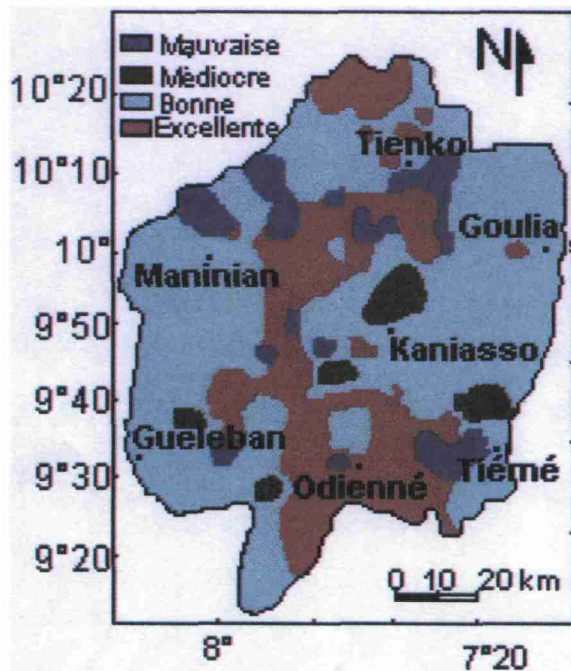
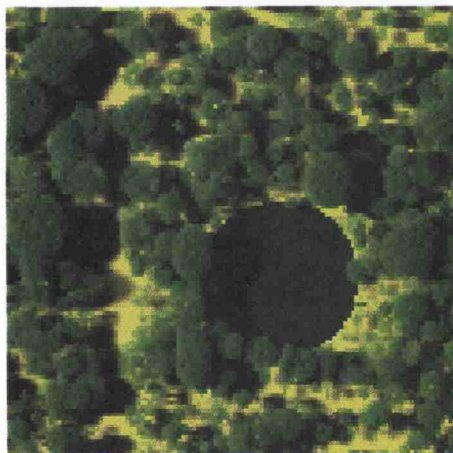


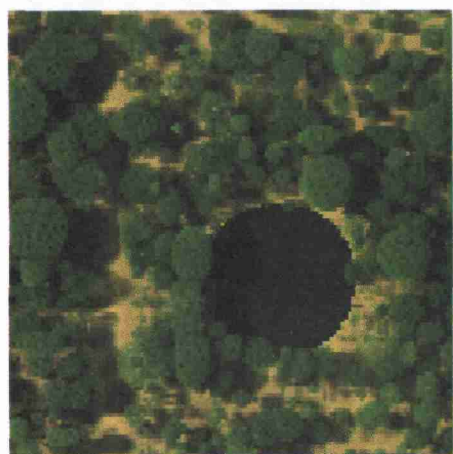
Figure 29-6. Carte d'exploitabilité de la nappe d'Odienné



a) Bas de l'atmosphère - Eclairage direct



b) Bas de l'atmosphère - Eclairage diffus

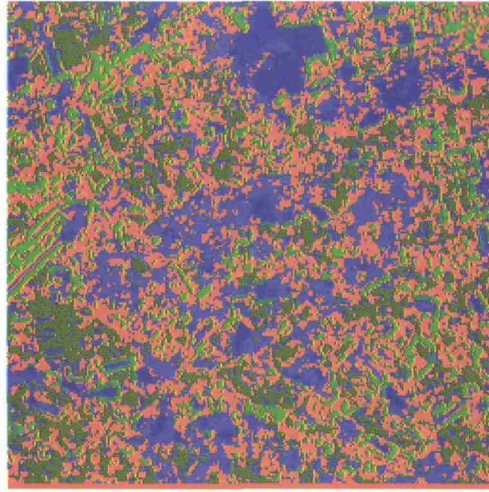


c) Bas de l'atmosphère - Éclairage mixte (a+b)



d) Haut de l'atmosphère

Figure 31-2. Rôle de l'atmosphère. Elle modifie la réflectance ρ_c (bleu, vert, rouge), car elle diminue les ombres (moins d'ombre en b qu'en a). En haut de l'atmosphère, la réflectance apparente est $\approx \rho_a + T \cdot \rho_c$ où T est la transmittance atmosphérique et ρ_a la réflectance atmosphérique qui donne la teinte bleue des images (d).



Échelle : 1 : 100 000

Figure 33-8. Image résultante de classification mutibande avec les images du sous-ensemble qui a donné la plus petite valeur de S_k .

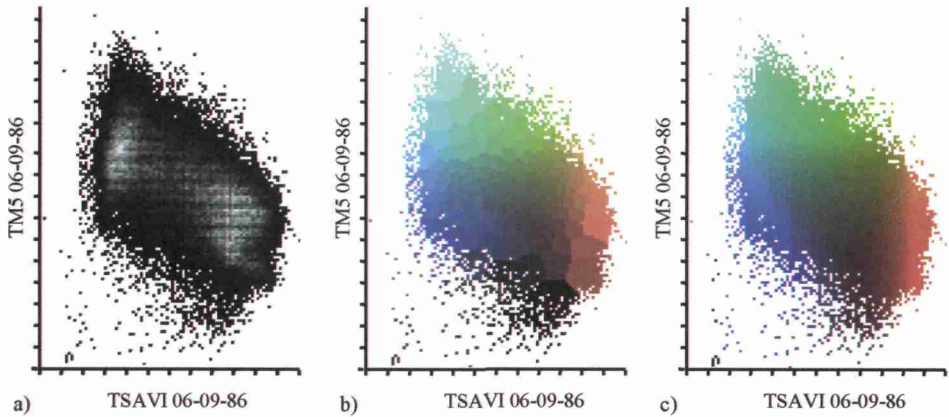


Figure 34-1. Base de décision formée par a) un histogramme bivarié, b) un scattérogramme thématique selon une classification non dirigée et c) un scattérogramme thématique selon une classification point par point

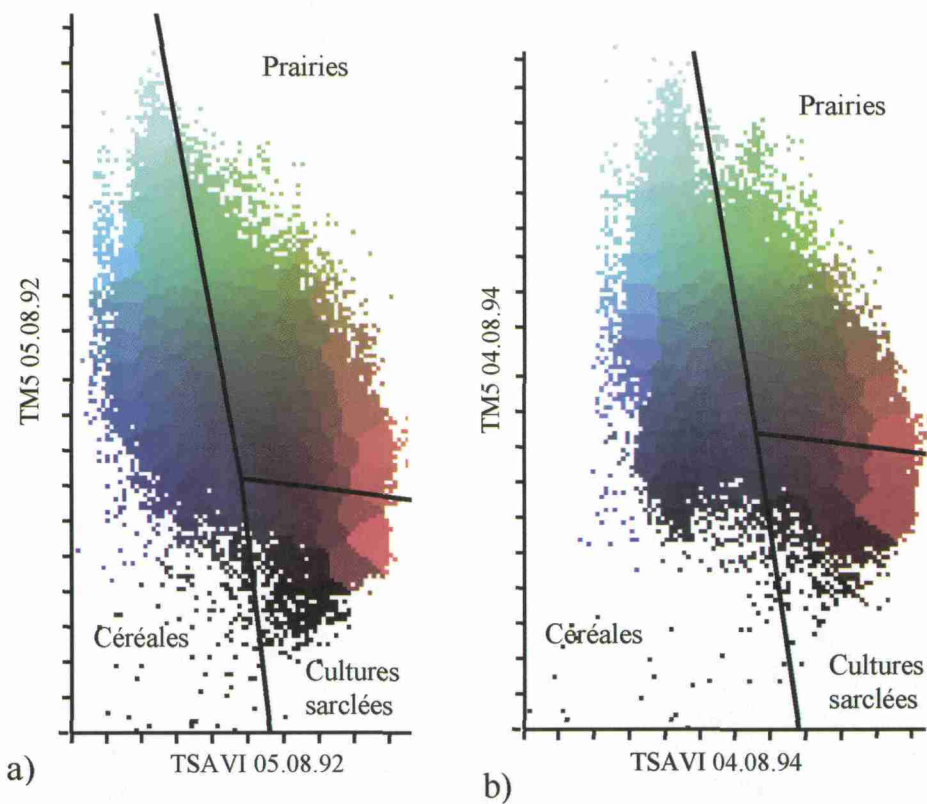


Figure 34-4. Partition de l'espace des attributs : a) pour 1992 et b) pour 1994

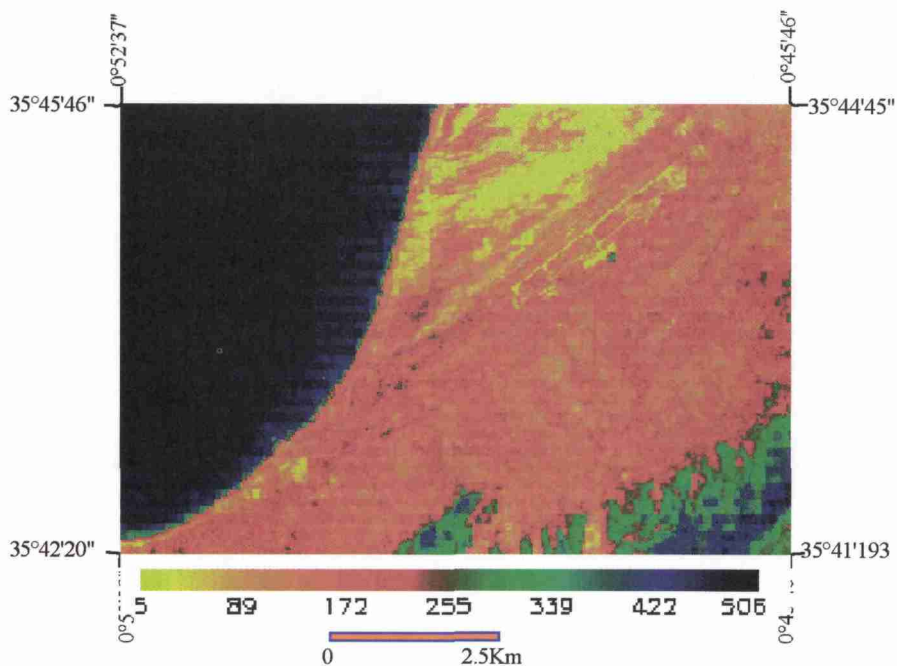


Figure 37-3. Image de la densité de flux de chaleur latente : plaine de Bousfer

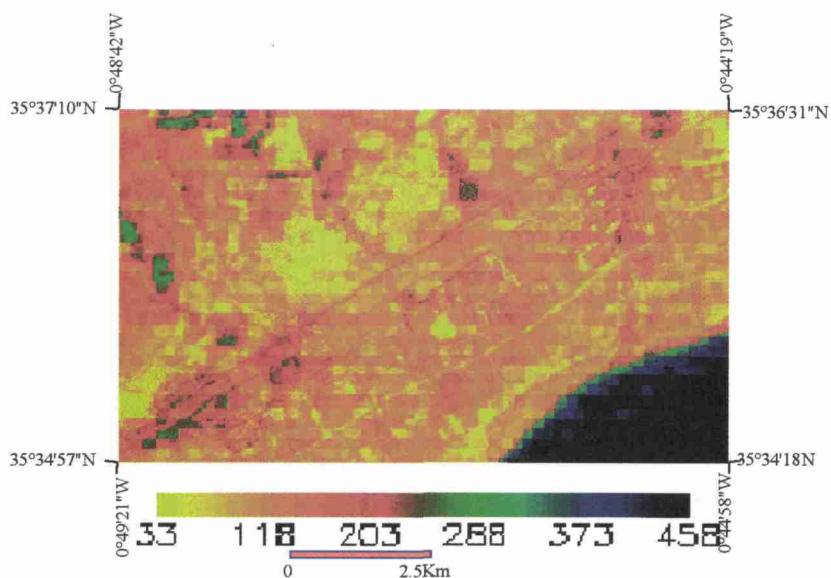


Figure 37-4. Image de la densité de flux de chaleur latente : plaine de Misserghine

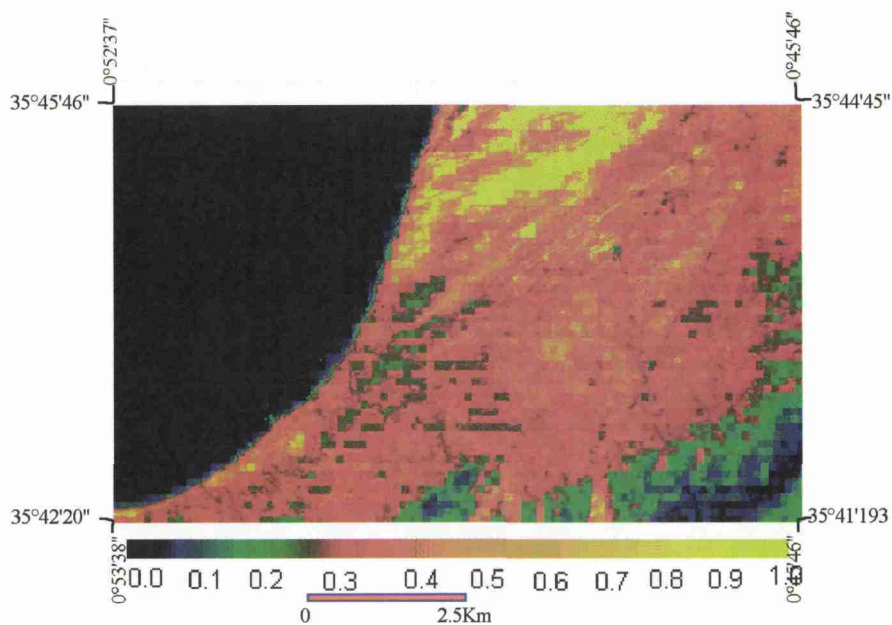


Figure 37-5. Image de l'indice de stress hydrique (CWSI) : plaine de Bousfer

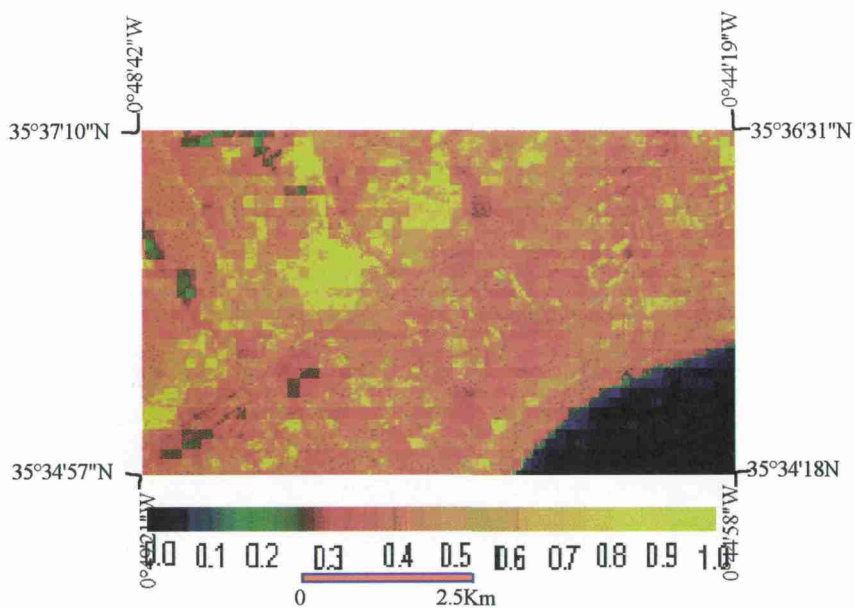


Figure 37-6. Image de l'indice de stress hydrique (CWSI) : plaine de Misserghine

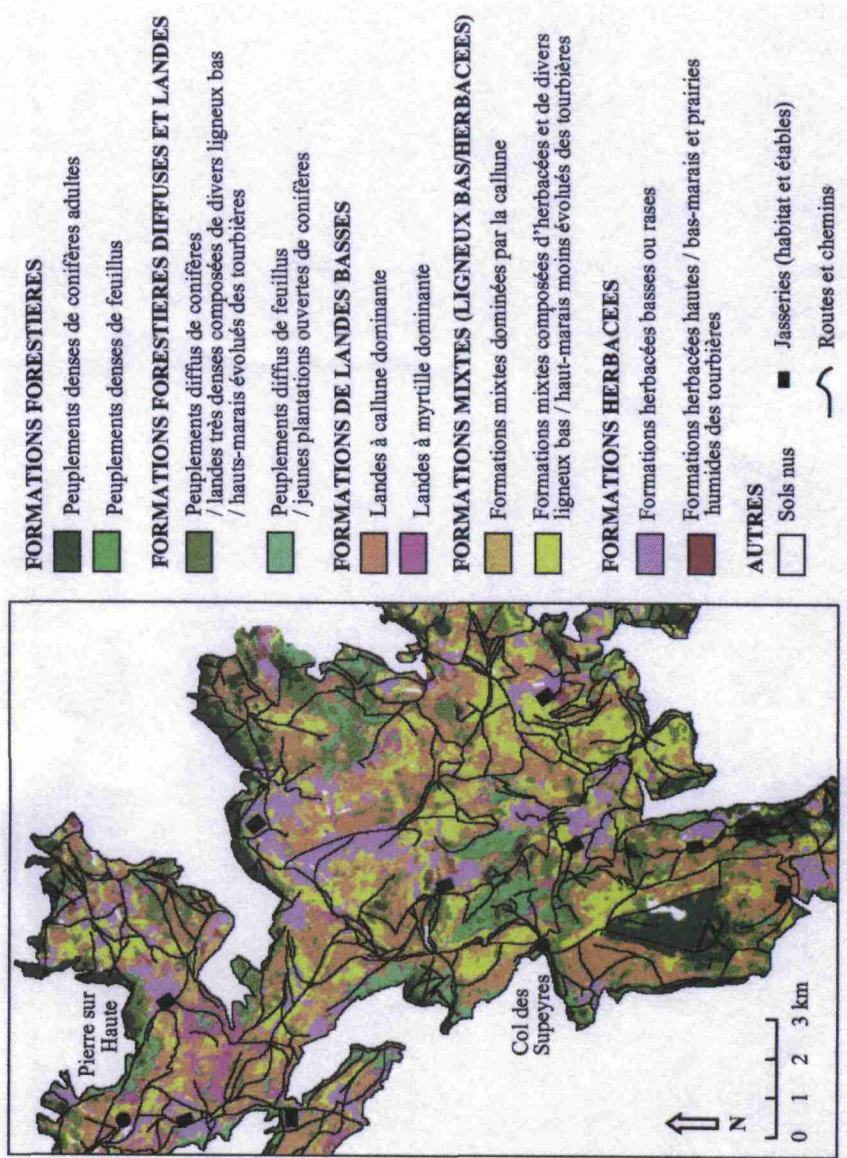


Figure 38-2. Extrait de la carte des formations végétales des Hautes-Chaumes (Massif Central français) d'après une image HRV de SPOT du 24 août 1994. (Source : BESSENAY, 1995)

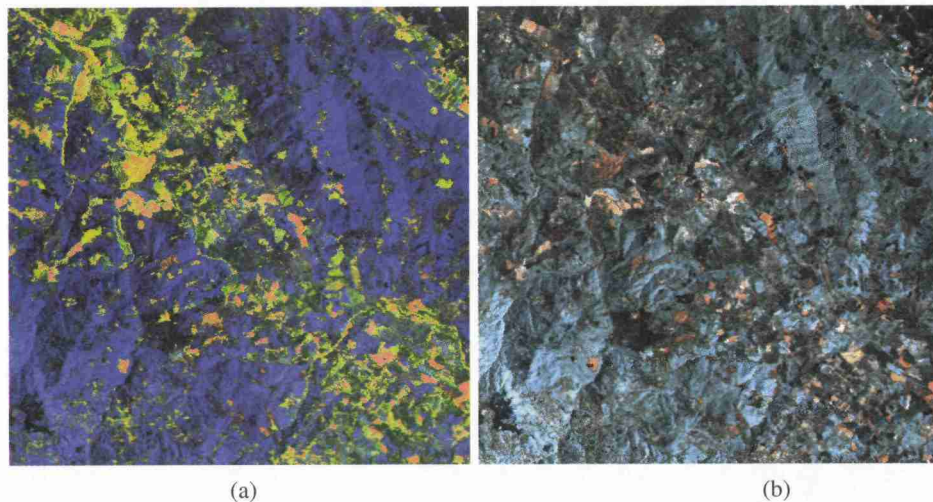


Figure 43-3. Correction topographique des images acquises dans le canal TM 4 (512 x 512 pixels) aux mois de juin (a) et de novembre (b).

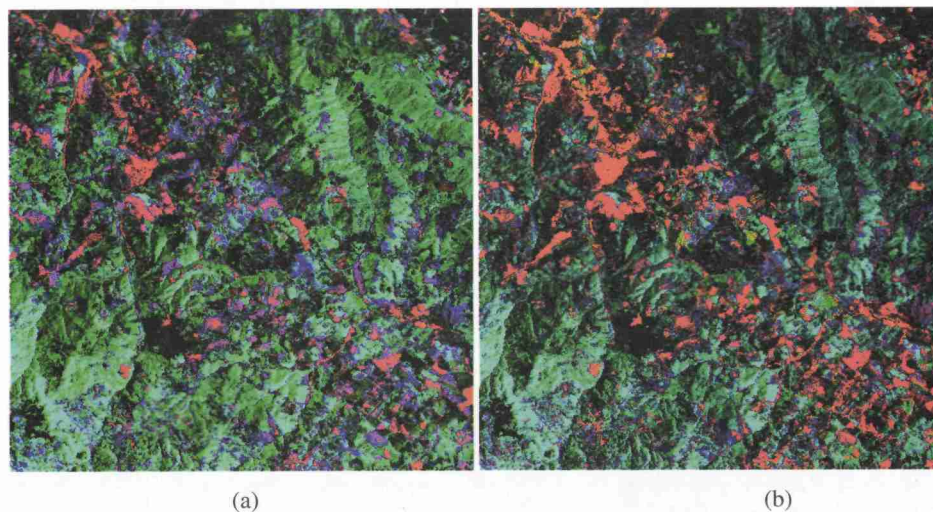


Figure 43-4. Composition colorée des images TM3, TM4 et TM5 (512 x 512 pixels) obtenues avant (a) et après (b) correction topographique.