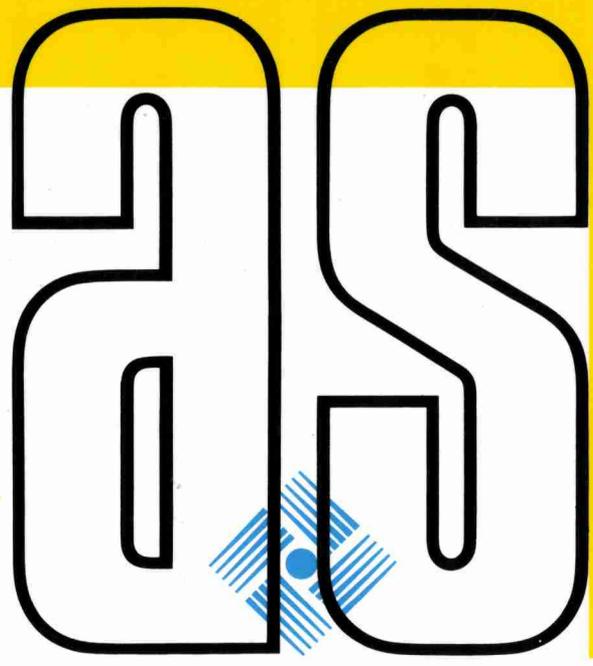


UNIVERSITÉS FRANCOPHONES

Pierre Lafrance
Jean-Marie Dubois

APPORTS
de la
TÉLÉDÉTECTION
à la **LUTTE**
CONTRE
la
SÉCHERESSE



actualité scientifique



AUPELF

JL John Libbey
EUROTEXT
PARIS · LONDRES



APPORTS DE LA TÉLÉDÉTECTION À LA LUTTE CONTRE LA SÉCHERESSE

British Library Cataloguing in Publication Data

Lafrance, Pierre

Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse

1. Télédétection

I. Dubois, Jean-Marie. II. Title.

ISBN 0-86196-261-3

Editions John Libbey Eurotext

6, rue Blanche, 92120 Montrouge, France.

Tél : (1) 47 35 85 52

John Libbey and Company Ltd

13 Smith Yard, Summerley Street, London SW18 4HR, England.

Tél : (81) 947 27 77

John Libbey CIC

Via Spallanzani 11,

00161, Rome, Italy

Tél : (06) 862.289

© 1990, Paris

Il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage — loi du 11 mars 1957 — sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français du Copyright, 6 bis, rue Gabriel-Laumain, 75010 Paris, France.

APPORTS DE LA TÉLÉDÉTECTION À LA LUTTE CONTRE LA SÉCHERESSE

Journées scientifiques de Thiès
21-24 novembre 1989

COMITÉ SCIENTIFIQUE :

- Pierre Lafrance (*coresponsable de l'édition*)
- Jean-Marie Dubois (*coresponsable de l'édition*)
- Abdelkader Abdellaoui
- Douada Badiane
- Régis Caloz
- Moustapha Mbaye
- Mamadou Sall
- Diadié Traore
- Fernand Verger



Les collections « *Universités francophones* » de l'UREF :

Un instrument nouveau pour consolider l'espace scientifique francophone

L'Université des Réseaux d'Expression Française (l'UREF) a créé un ensemble de collections « Universités francophones » qui sont les instruments nécessaires d'une vie scientifique de qualité dans l'espace scientifique francophone.

Fruit de la collaboration de chercheurs du Nord et du Sud, dans le cadre; notamment, des journées scientifiques et des colloques organisés par les réseaux de recherche partagée de l'UREF, ces « Actualités scientifiques » veulent, en consolidant la coopération scientifique entre tous les partenaires de la francophonie, contribuer à la promotion de la recherche en langue française.

Cette nouvelle collection est complétée par une collection de manuels universitaires et par une collection d'ouvrages scientifiques (« Sciences en marche »).

Professeur Michel Guillou

Délégué Général de l'UREF

Sommaire

Liste des auteurs	VII
1. Rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. Frédéric Achard et François Blasco	1
2. Suivi par télédétection des productions céréalières pluviales en pays sahéliens. Étienne Bartholomé	15
3. Intégration de données multisources pour l'étude du système hydrographique du delta de la Médjerda et de la sebkhet er Riana. Mohamed Rached Boussema	29
4. L'approche du CRDI dans la lutte contre la désertification en Afrique et l'apport de son programme en cartographie et télédétection. Alioune B. Camara, Gilles Cliche et Robert Valantin	35
5. Estimation de l'évaporation sur sol nu à partir de mesures hyperfréquences. André Chanzy et Laurent Bruckler	43
6. Étude intégrée des écosystèmes pastoraux du Sahel malien. François Cuq et Ibtissem Tounsi	55
7. Méthode d'évaluation quantitative de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir de données Landsat TM (Burkina Faso). Pierre Defourny	63
8. Le suivi intégré de l'environnement sénégalais. Peter Frederiksen	75
9. Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio Corubal (novembre 1987-décembre 1988). Jean-Marie Grégoire et Giovanni Ferrari	81
10. L'expérience communautaire en matière d'utilisation de la télédétection dans la lutte contre la sécheresse et la désertification en Afrique de l'Ouest. Robert Grégoire	95
11. Inondations au Bangladesh, étude préliminaire à l'aide de données SPOT 1. Daniel Guillemyn, Marie France Bellan et François Blasco	111
12. Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole au Sahel. Abdoul'Rhamane Iro, Michel Yergeau et Bertin Goze Bénéié	121
13. Des indicateurs morphologiques pour mesurer le changement des milieux sahéliens à partir des images satellitaires à haute résolution. Christine Jacqueminet	129
14. Les modelés éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphologie, note préliminaire. Salifou Karimoune, André Ozer et Michel Erpicum	145

15. Essai méthodologique de classement et cartographie des terres en vue de la conservation des sols et des eaux en zones semi-arides : apport de la télédétection. Abdelaziz Merzouk, Mohammed Badraoui, Driss Fassi, Hassan Akeskouss, Ferdinand Bonn, Mario Hinse et Hugh Gwyn	163
16. Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal, par imagerie satellitaire. Bernard Mougenot, Patrick Zante et Jean-Pierre Montoroi	173
17. Étude de l'évolution de la végétation du «V Baoulé» (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection. Kouakou Édouard N'Guessan	181
18. Étude par télédétection de l'évolution de l'environnement péri-lagunaire de Bingerville, Bassam et Ono. Kouakou Édouard N'Guessan, Youpo Orega et Mamadou Fofana.....	197
19. Un exemple de suivi diachronique de milieux soudano-sahéliens au Burkina Faso par télédétection. Jean-Marie Ouadba	209
20. Télédétection et identification des cultures dans le périmètre irrigué «Sistema Rio Bocono» (les llanos occidentaux au Venezuela). Jésus Pérez, Vincent Valles et M ^{me} Ducrot-Gambart	219
21. Essai de caractérisation géométrique des différentes unités d'un erg actif à l'aide des données satellitaires panchromatiques SPOT, application à l'erg Akchar (Mauritanie occidentale). Jean-Claude Pion, Yves Besnus, Hervé Yésou et Max Deynoux	229
22. Analyse spatiale de la pression animale comme facteur de désertification dans le nord du Sénégal. Yves Prévost	241
23. Cartographie du couvert sédimentaire dans le chott Jerid et ses environs (Sud tunisien) par télédétection. Mohamed Chédly Rabia et Foued Zargouni	253
24. Apport d'une nouvelle hypothèse de base en classification d'images satellitaires pour la cartographie de la couverture végétale. Jean-Paul Rasson, Françoise Orban-Ferauge, Jean-Marie Dawagne et Françoise Delpérée	265
25. Évaluation des images TM et SPOT pour le suivi de l'étalement du fleuve Niger (Mali) dans une perspective d'aménagement hydro-agricole. Keith P. B. Thomson, Paul Gilbert, Soumalia Samaké et Annick Jatou	273
26. Inventaire et aménagement des ressources au Sahel, un exemple de transfert de technologie en télédétection. Michel Yergeau, Bertin Goze Bénié, Christian Prévost, Réjean Simard, Ferdinand Bonn et Q. Hugh J. Gwyn	283

Liste des auteurs

- Achard, Frédéric**, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Ministère de l'agriculture, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France
- Akeskouss, Hassan**, Département des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B. P. 6202, Rabat, Maroc
- Badraoui, Mohammed**, Département des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B. P. 6202, Rabat, Maroc
- Bartholomé, Étienne**, Institut pour les applications de la télédétection, Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes, 21020 Ispra, Italie
- Bellan, Marie-France**, Institut de la carte internationale de la végétation, Unité associée 688 du Centre national de la recherche scientifique, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France
- Bénié, Bertin Goze**, Digim inc., 1 100, boulevard René-Lévesque Ouest, Montréal, Québec, Canada H3B 4P3; actuellement au Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1
- Besnus, Yves**, CNRS/GSTS, Institut de géologie, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France
- Blasco, François**, Centre national de la recherche scientifique et Université Paul-Sabatier, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France
- Bonn, Ferdinand**, Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1
- Boussema, Mohamed Rached**, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B. P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Bruckler, Laurent**, Institut national de la recherche agronomique, Station de science du sol, Domaine St-Paul, B. P. 91, 84140 Montfavet, France
- Camara, Alioune B.**, Centre de recherches pour le développement international, B. P. 11007, CD Annexe, Dakar, Sénégal
- Chanzy, André**, Institut national de la recherche agronomique, Station de science du sol, Domaine St-Paul, B. P. 91, 84140 Montfavet, France
- Cliche, Gilles**, Centre de recherches pour le développement international, B. P. 8500, Ottawa, Ontario, Canada K1G 3H9
- Cuq, François**, Laboratoires IMAGEO-UPR 30 et GDR 103, CNRS, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France
- Dawagne, Jean-Marie**, Département de mathématique, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rempart de la Vierge, 8, 5000 Namur, Belgique

- Defourny, Pierre**, Laboratoire de télédétection, Université catholique de Louvain, place Louis-Pasteur, 3, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique
- Delpérée, Françoise**, Département de mathématique, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rempart de la Vierge, 8, 5000 Namur, Belgique
- Deynoux, Max**, CNRS, Institut de géologie, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France
- Ducrot-Gambart, M^{me}**, Centre d'études spatiales des rayonnements, 9, avenue du Colonel-Roche, 31400 Toulouse, France
- Erpicum, Michel**, Laboratoire de géographie physique, Climatologie, Université de Liège, place du XX Août, 7, 4000 Liège, Belgique
- Fassi, Driss**, Département des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B. P. 6202, Rabat, Maroc
- Ferrari, Giovanni**, Institut des applications de la télédétection, Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes, Établissements d'Ispra, 21020 Ispra (Varese), Italie
- Fofana, Mamadou**, Service autonome de télédétection, Direction et contrôle des grands travaux, 04 B. P. 945, Abidjan 04, Côte d'Ivoire
- Frederiksen, Peter**, Centre de suivi écologique, Programme des Nations Unies pour le développement, B. P. 154, Dakar, Sénégal
- Gilbert, Paul**, Laboratoire de télédétection, Département des sciences géodésiques et télédétection, Université Laval, Ste-Foy, Québec, Canada G1K 7P4
- Grégoire, Jean-Marie**, Institut des applications de la télédétection, Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes, Établissements d'Ispra, 21020 Ispra (Varese), Italie
- Grégoire, Robert**, Direction générale du développement, Commission des communautés européennes, 200, rue de la Loi, 1049 Bruxelles, Belgique
- Guillemyn, Daniel**, Institut de la carte internationale de la végétation, Unité associée 688 du Centre national de la recherche scientifique, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France
- Gwyn, Q. Hugh J.**, Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1
- Hinse, Mario**, Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1
- Iro, Abdoul'Rhamane**, Direction de la topographie, B. P. 250, Ministère des finances, Niamey, Niger
- Jacqueminet, Christine**, ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex, France
- Jaton, Annick**, Laboratoire de télédétection, Département des sciences géodésiques et télédétection, Université Laval, Ste-Foy, Québec, Canada G1K 7P4

- Karimoune, Salifou**, Faculté de pédagogie, Université de Niamey, B. P. 10963, Niamey, Niger
- Merzouk, Abdelaziz**, Département des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B. P. 6202, Rabat, Maroc
- Montoroi, Jean-Pierre**, ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, B. P. 1386, Dakar, Sénégal
- Mougenot, Bernard**, ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy, France
- N'Guessan, Kouakou Édouard**, Faculté des sciences et techniques, Université d'Abidjan, 22 B. P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire
- Orban-Ferauge, Françoise**, Département de géographie, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rempart de la Vierge, 8, 5000 Namur, Belgique
- Orega, Youpo**, Service autonome de télédétection, Direction et contrôle des grands travaux, 04 B. P. 945, Abidjan 04, Côte d'Ivoire
- Ouadba, Jean-Marie**, Institut de recherche en biologie et écologie tropicale, Centre national de la recherche scientifique et technologique, B. P. 7047, Ouagadougou, Burkina Faso
- Ozer, André**, Laboratoire de géomorphologie et géologie du Quaternaire, Université de Liège, place du XX Août, 7, 4000 Liège, Belgique
- Pérez, Jésus**, Institut de géographie, Université Toulouse Le Mirail, 5, allées Antonio Machado, 31058 Toulouse cedex, France
- Pion, Jean-Claude**, ORSTOM/GSTS, Institut de géologie, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France
- Prévost, Christian**, Centre canadien de télédétection, 1 547, chemin Merivale, Ottawa, Ontario, Canada K1A 0Y7
- Prévost, Yves**, Centre de suivi écologique, Programme des Nations Unies pour le développement, B. P. 154, Dakar, Sénégal
- Rabia, Mohamed Chédly**, Institut national de la recherche scientifique et technologique, Université de Tunis II, B. P. 95, Hamam Lif 2050, Tunisie
- Rasson, Jean-Paul**, Département de mathématique, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rempart de la Vierge, 8, 5000 Namur, Belgique
- Samaké, Soumalia**, Direction nationale du génie rural, Ministère de l'agriculture, avenue Mohamed V, B. P. 155, Bamako, Mali
- Simard, Réjean**, Digim inc., 1 100, boulevard René-Lévesque Ouest, Montréal, Québec, Canada H3B 4P3
- Thomson, Keith P. B.**, Laboratoire de télédétection, Département des sciences géodésiques et télédétection, Université Laval, Ste-Foy, Québec, Canada G1K 7P4
- Tounsi, Ibtissem**, Laboratoires IMAGEO-UPR 30 et GDR 103, CNRS, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France

Valantin, Robert, Centre de recherches pour le développement international, B. P. 8500,
Ottawa, Ontario, Canada K1G 3H9

Vallés, Vincent, Laboratoire de pédologie et aménagement, École nationale supérieure
agronomique de Toulouse, 145, avenue de Muret, 31076 Toulouse cedex, France

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

Yésou, Hervé, CNRS/GSTS, Institut de géologie, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex,
France

Zante, Patrick, ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le
développement en coopération, B. P. 1386, Dakar, Sénégal

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

1

Rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par téledétection spatiale

FRÉDÉRIC ACHARD* ET FRANÇOIS BLASCO**

**École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Ministère de l'agriculture*

***Centre national de la recherche scientifique et Université Paul-Sabatier*

Adresse commune : 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France, téléphone : 61-53-02-35, télex : UNIPSAB 521 880 F

Résumé

Nous commençons par décrire les problèmes de déforestation dans deux pays : la Côte d'Ivoire et le Burkina Faso. La dégradation globale des milieux naturels a une influence directe sur les transformations climatiques planétaires.

Puis, nous avons utilisé trois images à haute résolution spatiale et un jeu d'images NOAA LAC (à 1 km de résolution, année 1986-1987) au cours de deux volets principaux :

1) délimitation et classification des différents types physionomiques : nous avons étudié très précisément trois sites-tests au contact forêt-savane à l'aide des données à haute résolution spatiale SPOT et Landsat TM;

2) étude des rythmes saisonniers des formations au contact forêt-savane : variations de l'activité chlorophyllienne et de la température de surface de la forêt dense semi-décidue, de la savane herbeuse et des cultures.

Nos conclusions suggèrent qu'il ne faut pas limiter l'utilisation des données satellitaires au seul paramètre «indice de végétation». La température de surface est un complément très utile au NDVI : ce paramètre permet, d'une part, de mieux différencier les types de végétation et apporte, d'autre part, une information supplémentaire sur l'état du couvert. Nous montrons aussi que les données fournies par le capteur AVHRR ne sont pas bien adaptées à l'approche conventionnelle de la description de la végétation dans l'état actuel de nos connaissances. Il faut développer les méthodes de cartographie de la végétation en y intégrant l'information satellitaire et progresser dans l'utilisation des données à faible résolution spatiale pour mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement des grands ensembles forestiers tropicaux.

1 Introduction

1.1 Objectif général et tendances d'évolution globale

Le principal objectif de cette étude est de suivre la dynamique saisonnière des formations végétales qui forment la limite entre la forêt dense et les différents types de savane en Afrique de l'Ouest. Cet objectif est justifié par le problème général d'inventaire des ressources forestières et de suivi de la déforestation dans les pays tropicaux (Malingreau et Tucker, 1988).

En effet, la déforestation, l'élargissement des zones dénudées, des périmètres irrigués ou simplement mis en culture font partie des transformations imputables aux sociétés humaines. Personne ne connaît précisément les conséquences de ces transformations de la biosphère continentale sur les composantes physico-chimiques de l'atmosphère et sur les changements climatiques. Il s'y ajoute, bien sûr, les combustions industrielles. La connaissance objective de ces transformations que subissent les régions chaudes est cependant une nécessité.

L'accroissement sensible et incontesté de la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère entretient en particulier la crainte d'un relèvement progressif de la température moyenne du globe.

Cette étude reprend les derniers résultats d'une thèse où sont étudiés les changements de la couverture végétale en région tropicale au moyen de la télédétection (Achard, 1989).

1.2 Dénudation et déforestation en milieu tropical

En ce qui concerne les grandes transformations intervenant à la surface du globe, cinq ont été identifiées comme essentielles au dernier colloque sur l'effet de serre (Wageningen, 14-18 août 1989) :

- accroissement de la riziculture;
- extension de la déforestation;
- extension des surfaces de savanes tropicales;
- extension de la désertification;
- réduction des zones à pergélisol.

Ces cinq types de transformations planétaires majeures devraient faire l'objet d'un contrôle continu par satellite.

Il faut donc se poser la question de savoir si les instruments spatiaux actuels sont adaptés au suivi de la dénudation des terres à l'échelle globale.

Les extensions de la déforestation, des surfaces de savanes tropicales et de la désertification sont vraisemblablement des transformations interdépendantes : il faut donc les étudier conjointement (Blasco et Achard, 1990).

Il existe aujourd'hui quelque 9 millions de km² de forêts denses humides qui jouent un rôle peu connu sur les grands équilibres de notre planète. Trois massifs sont immenses : la cuvette amazonienne (3,5 millions de km²), la cuvette congolaise (Zaire : 1 million de km²) et l'archipel de l'Asie du Sud-Est (Indonésie : 1,2 millions de km²).

On ne peut pas dire précisément quelle est l'évolution actuelle de ces surfaces forestières, même si l'on sait que la forêt indonésienne est en train de disparaître à une vitesse très élevée et qu'il en est de même dans certains états du sud du bassin amazonien au Brésil.

1.3 Surfaces forestières dans la zone d'étude

Notre zone d'étude recouvre en particulier la Côte d'Ivoire et le Burkina Faso où nos laboratoires ont acquis une bonne connaissance du milieu. De plus, les problèmes écologiques, climatiques et démographiques de cette partie du monde attirent l'attention de la communauté scientifique internationale.

1.3.1 En Côte d'Ivoire

Depuis une trentaine d'années, le développement économique est axé principalement sur l'exploitation des ressources du secteur forestier (économie du bois, plantations vivrières et commerciales, plantations agro-industrielles). Pour planifier le développement économique des années 1990-2000, les décideurs ivoiriens ont besoin des informations de surfaces de forêts intactes, dégradées ou occupées par les cultures.

Alors que l'estimation du massif forestier ivoirien en 1947 était de 14,5 millions d'hectares, les inventaires de 1966 conduisent à un chiffre de 8,98 millions d'hectares. En 1974, l'actualisation des inventaires de 1966 montre que la forêt dense intacte ne représente plus que 5,4 millions d'hectares tandis que 3,58 millions d'hectares sont en forêt dégradée. Enfin, un état évaluatif des surfaces de végétation ligneuse en 1980 donne 4,46 millions d'hectares de forêt dense feuillue non dégradée et 8,4 millions d'hectares de jachères forestières (FAO, 1988).

Les surfaces de forêts denses non encore exploitées ne dépassent pas quelques centaines de milliers d'hectares; les surfaces des forêts denses déjà exploitées représentent la quasi-totalité des forêts denses productives (3,094 millions d'hectares en 1980). Mais certaines zones n'ont été que très partiellement dégradées alors que d'autres l'ont été intensivement.

Les surfaces de forêt improductive pour des raisons physiques (0,515 millions d'hectares) sont principalement constituées de forêts denses sèches à *Anogeissus*. Les parcs nationaux constituent une surface importante de forêts denses improductives (0,648 millions d'hectares) ou de formations ouvertes improductives (1,150 millions d'hectares : parc de la Comoé). Il existe aussi des forêts classées où une exploitation forestière est autorisée mais où les défrichements agricoles sont interdits. Ce «domaine forestier permanent de l'État» doit permettre de produire du bois et de garantir l'équilibre écologique. Il était composé en 1980 de 2,404 millions d'hectares en zone forestière et 1,222 millions d'hectares en zone de savane de forêts déjà classées.

Ces estimations montrent d'une part la forte régression de la forêt de Côte d'Ivoire et d'autre part l'incertitude quant à l'extension réelle des surfaces forestières concernées.

Les effets des défrichements intervenus depuis 30 ans dans la zone forestière de Côte d'Ivoire sont graves : la diminution du taux de boisement, qui pour des régions entières est descendu au-dessous de 20%, entraîne la raréfaction des ressources ligneuses ainsi que des effets écologiques irréversibles.

1.3.2 Au Burkina Faso

a) Évaluation des surfaces forestières

- Les forêts galeries couvrent des surfaces limitées (270 000 ha), soit à peine 1% du territoire ou 2% du domaine forestier qui totalise 14 millions d'hectares (Fontes, 1984).

- Les plus belles forêts claires se trouvent dans le secteur de la Comoé. La surface totale de ces forêts peut être estimée à 290 000 ha soit à peine plus de 1% du territoire.

- Les formations mixtes forestières et graminéennes qui englobent à la fois les savanes arborées, les savanes boisées, les forêts claires et les jachères qui en dérivent, occupent au total 9 400 000 hectares soit plus de 30% du territoire.

- Les formations mixtes productives, qui correspondent aux forêts «classées» (qui ne sont souvent que des savanes boisées) et aux forêts claires, couvrent 499 000 ha.

- Les formations improductives pour des raisons physiques (mauvaise conformité des ligneux) et pour des raisons légales (parcs nationaux) atteignent respectivement 3 179 000 ha et 786 000 ha.

- Les jachères forestières concernent 4 919 000 ha.

b) Dégradation des milieux

La végétation naturelle est agressée de toutes parts. Les causes sont d'ordre climatique, d'ordre démographique et d'ordre social. L'accroissement de la population, accéléré par l'amélioration des conditions sanitaires, engendre des besoins accrus : besoins énergétiques, besoins en terres agricoles nouvelles qui s'exercent au détriment des surfaces forestières, besoins en terre de parcours des troupeaux et en pâturages. Enfin, la pratique traditionnelle des feux amoindrit la régénération forestière.

En milieu de savane, cette dégradation se confond avec les défrichements des savanes boisées et arborées pour la mise en culture. Les surfaces qui, après l'abandon des cultures, sont de nouveau chaque année traversées par les feux évoluent vers des savanes pauvres dont les sols peuvent se «latériser» en surface.

Dans la pratique, les forêts sont très peu protégées contre les feux et les défrichements. Ceci est également vrai pour les forêts classées dont quelques rares secteurs ont été mis en défens. Ces forêts sont difficilement contrôlables de par l'éloignement des axes routiers et le manque de personnel qualifié. Les ressources naturelles ligneuses, encore importantes à l'échelle de la nation, sont mal réparties et régressent de manière sensible.

2 Méthode

2.1 Données utilisées

Assurer un suivi des transformations qui affectent la biosphère nécessite, pour des raisons techniques et de coût, d'avoir recours à des données de type AVHRR, celles de SPOT, de Landsat TM ou MSS n'étant pas adaptées à la connaissance des phénomènes sur de grandes surfaces. En fait, nous avons utilisé les deux types de données satellitaires :

- une série de 34 images multitemporelles NOAA AVHRR LAC (National Oceanographic and Atmospheric Administration, Advanced Very High Resolution Radiometer, Local Area Coverage) entre octobre 1986 et septembre 1987;

- trois images à haute résolution SPOT et Landsat TM qui nous ont servi comme sites-tests : SPOT 047-336 du 25/11/86, SPOT 045-336 du 26/12/86 et Landsat TM 196-53 du 01/03/87 (deux quarts d'image).

Les caractéristiques principales des deux types de données sont la haute fréquence d'acquisition (tous les 9 jours au nadir) avec une faible résolution (1,1 km par 0,8 km au nadir) pour les données AVHRR et la haute résolution spatiale (20 m ou 30 m) avec une faible fréquence (tous les 26 jours ou 16 jours) pour les données SPOT ou Landsat TM. Ces caractéristiques sont données dans le tableau I.

L'instrument AVHRR fut conçu pour des applications météorologiques, mais l'inclusion de bandes sensibles au rouge et au proche infrarouge du spectre solaire ont conduit à l'utilisation des données fournies dans un grand nombre d'études des ressources terrestres.

Tableau I. Caractéristiques des capteurs NOAA AVHRR, SPOT HRV et Landsat TM

Satellite	NOAA 9	SPOT 1	Landsat 5
Lancement	décembre 1984	février 1986	mars 1984
Capteur	AVHRR	HRV	TM
Résolution au sol	0,8 par 1,1 km au nadir 2,4 par 6,9 km à l'angle de visée maximal	20 par 20 m en mode multispectral	30 par 30 m
Taille d'un cadre	2 700 par 1 600 km	60 par 60 km	185 par 185 km
Numérisation	10 bits	8 bits	8 bits
Heure de passage à l'équateur	14:30 (ascendant)	10:30 (descendant)	9:45 (descendant)
Périodicité	9 jours	26 jours	16 jours
Canaux spectraux (µm)	1 : 0,58-0,68 2 : 0,725-1,1 3 : 3,55-3,93 4 : 10,3-11,3 5 : 11,5-12,5	1 : 1,50-0,59 2 : 0,61-0,68 3 : 0,79-0,89	1 : 0,45-0,52 2 : 0,52-0,60 3 : 0,63-0,69 4 : 0,76-0,90 5 : 1,55-1,75 6 : 10,40-12,50 7 : 2,08-2,35

L'intérêt des bandes rouge et proche infrarouge présentes sur les instruments AVHRR, HRV et TM, réside dans l'absorption de la première par les pigments chlorophylliens et les carotènes, et dans la sensibilité de la seconde à la structure mésophylle des feuilles. Dans la partie du spectre électromagnétique située entre 0,5 et 0,7 µm, la végétation verte absorbe fortement le rayonnement, alors qu'entre 0,7 et 1,1 µm, les épidermes foliaires ont l'effet inverse de réflexion. Les rapports entre ces deux canaux sont, théoriquement, corrélés à la part du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (RPAA) par le couvert végétal (Tucker et Sellers, 1986). Le plus utilisé de ces rapports est l'indice de végétation normalisé (NDVI : Normalised Derived Vegetation Index).

2.2 Traitement des images SPOT et Landsat TM

La première étape a consisté à identifier et à classer les différentes formations végétales sur les trois sites-tests (images haute résolution). Pour caractériser les différents types physiologiques dans les zones phytogéographiques guinéenne et soudanienne, nous avons pris en compte les stades de régression suivants : forêt dense semi-décidue, forêt sèche, forêt claire, savane boisée, savane arborée, savane arbustive, savane herbeuse et cultures (cf. tableau II, d'après Guillaumet et Adjanohoun, 1971 et UNESCO, 1973).

Les trois sites-tests, le Parc de la Marahoué et la Réserve du Haut-Sassandra en zone guinéenne de Côte d'Ivoire, les forêts de Kongouko et du Dida en zone soudanienne du Burkina Faso, ont été cartographiés à partir d'images SPOT ou Landsat TM (canaux XS1,

Tableau II. Description physionomique simplifiée des unités de végétation dans la zone d'étude

Code	Unités de végétation	Descriptions physionomiques simplifiées
A	Zone guinéenne	
A.1	Forêt dense humide ombrophile	dense, haute (40 m), multistrate
A.2	Forêt mesophile semi-décidue	multistrate, strate supérieure en partie décidue au cours de la saison sèche, deuxième strate toujours verte
A.3	Savane herbeuse	hautes graminées avec de rares arbres
A.4	Cultures tropicales	café, cacao, plantations de bananiers et différents types de mosaïques forêt dégradée-culture
B	Zone soudanienne	
B.1	Forêt sèche	une seule strate arborée, dense, décidue en saison sèche
B.2	Forêt claire	strate arborée ouverte, recouvrement par les ligneux d'au moins 40%, décidue en saison sèche, strate herbeuse dense
B.3	Savane boisée	recouvrement par les ligneux (hauteur : 20 m) inférieur à 40%
B.4	Savane arborée	hautes graminées avec quelques ligneux, recouvrement des arbres inférieur à 20%, parfois strate arbustive
B.5	Savane herbeuse	végétation herbacée dense (hauteur de 1 à 2 m), recouvrement arboré inférieur à 5%
B.6	Cultures pluviales	millets, sorgho, etc.

XS2 XS3 et TM2, TM3, TM4). Les techniques de télédétection ont été utilisées pour préparer et compléter la phase de terrain.

Une méthode de classification par maximum de vraisemblance a été appliquée séparément sur quelques fenêtres après repérage sur le terrain de parcelles d'entraînement homogènes. Après réduction des scènes par pavés 6 par 6 (120 m pour SPOT et 180 m pour TM), celles-ci sont classées en utilisant les statistiques calculées sur les fenêtres.

Cette information thématique liée à la densité de recouvrement arboré a été finalement dégradée pour obtenir une résolution de 1 km dans la même projection que les images NOAA. Pour chaque élément de grille à 1 km, la classe dominante du pixel composé a été affectée.

2.3 Tracé des statistiques sur des graphes bidimensionnels (rouge et proche infrarouge)

Nous avons commencé par représenter les statistiques des classes de végétation dans les canaux bruts rouge et proche infrarouge qui servent au calcul du NDVI. Les ellipses de variance ont été tracées selon trois résolutions sur chaque site-test : 30 m sur les fenêtres TM à pleine résolution et 20 m sur les fenêtres SPOT à pleine résolution ; 180 m sur la scène TM dégradée par pavés 6 par 6 et 120 m sur la scène SPOT dégradée par pavés 6 par 6; 1 km sur les images NOAA du 8 mars 1987 ou du 7 décembre 1986.

Chaque ellipse tracée est centrée sur les moyennes des valeurs de pixel de chaque classe dans les canaux rouge et proche infrarouge. Les diamètres des ellipses sont définis par la matrice de covariance des classes dans ces deux canaux. La surface d'une ellipse contient donc statistiquement 65% des pixels de la classe correspondante.

2.4 Traitement de la série d'images NOAA

La seconde étape consiste en l'étude des variations au cours de l'année de l'activité chlorophyllienne de la phytomasse sur nos sites-tests. Trente-quatre images LAC depuis octobre 1986 jusqu'à septembre 1987 ont été calibrées radiométriquement (éclairage solaire), corrigées géométriquement et cartographiées dans une projection degré-carré (1200 points par 1000 lignes, résolution : 0,01°). L'erreur moyenne géométrique finale est d'environ 1,3 pixels sur les 2 axes pour les points d'appui.

Nous avons tracé les évolutions de l'indice de végétation normalisé (NDVI) et de la température de surface (TS), calculée par la méthode du «split window» (Deschamps et Phulpin, 1980), sur les sites-tests sélectionnés pour les principales classes de végétation (forêt dense, savane boisée, savane herbeuse, cultures).

3 Résultats et interprétation

3.1 Classification des images SPOT et TM

L'évaluation de la classification par maximum de vraisemblance sur la région soudanienne (quarts d'image TM) est de 81,5% de pixels bien classés sur les parcelles d'entraînement. La raison de cette valeur est qu'il est très difficile de définir des parcelles homogènes dans ces types de savanes.

Pour la zone guinéenne (images SPOT), les types de végétation naturelle étant homogènes, on obtient de bons résultats (95% de pixels bien classés sur le parc de la Marahoué).

Les caractéristiques principales du parc de la Marahoué (dimensions : 100 000 hectares) sont :

- zone de contact forêt-savane, riche et diversifiée;
- dynamisme de la société locale dans un espace en mutation rapide;
- absence d'étude importante jusqu'alors;
- faune relativement abondante dans cette partie de l'Afrique de l'Ouest.

Les menaces potentielles sur la forêt classée du Haut-Sassandra sont :

- la pression humaine au sud des «déguerpis» de Buyo qui a déjà occasionné le déclassement d'une partie de la réserve;
- le village Gbeubli au nord-ouest du massif qui constitue un point de départ des occupations clandestines;
- le campement des ouvriers d'une exploitation forestière au nord qui permet aussi des occupations clandestines.

Les principales conclusions de l'étude sur le terrain dans cette zone de contact forêt-savane portent sur la richesse floristique (gradient de diversité spécifique en forêt selon l'axe nord-sud dans le parc national de la Marahoué), et sur le grand dynamisme des systèmes de production en périphérie du parc et de la réserve forestière. Ce dynamisme est lié à l'apport démographique et au prix rémunérateur du cacao. L'importance d'une cartographie était

justifiée par l'ignorance des défrichements réalisés à l'intérieur des limites du parc et de la réserve.

On conserve pour la suite de l'étude en zone soudanienne : 611 pixels de la classe cultures, 542 pixels de savane herbeuse et 181 pixels de savane boisée, et en zone guinéenne : 699 pixels de cultures, 23 pixels de savane et (308 + 145) pixels de forêt dense (1 pixel = 120 ha).

3.2 Interprétation des graphiques (rouge et proche infrarouge)

Nous prenons comme exemple, le site en zone soudanienne (superficie des deux quarts d'image TM). L'unité utilisée sur ces graphiques est l'unité de quantification (intervalle [0,255] pour TM et [0,1023] pour AVHRR). Nous ne nous préoccupons pas ici de la comparaison des réflectances entre les deux canaux considérés des capteurs TM et AVHRR, mais nous nous intéressons prioritairement à la séparabilité entre classes.

3.2.1 Résolution de 30 m sur quatre fenêtres TM 512 par 512 du 01/03/87

Les ellipses représentant les classes de végétation sont ici réparties dans un triangle. Le côté le plus long de ce triangle est la ligne des sols avec les classes cultures et savane herbeuse à ses extrémités : nous ne tenons pas compte ici des classes feux, récents et anciens. Le second côté important du triangle contient l'information «végétation verte» puisqu'il correspond à un gradient de recouvrement arboré depuis la savane herbeuse, à une extrémité du côté, jusqu'à la forêt dense à l'autre extrémité. On peut aussi remarquer que ce côté correspond à peu près à l'axe de l'indice de végétation.

3.2.2 Résolution de 180 m sur les deux quarts d'image TM

L'organisation spatiale des ellipses est plus simple. Elles s'alignent selon les deux axes déjà apparents sur le premier graphique. Ici ces deux axes se dessinent très nettement. Les classes savane herbeuse, savane arborée, savane boisée et boisement dense, s'alignent selon un gradient d'indice de végétation croissant. La surface globale occupée par les ellipses a été compactée par rapport au premier graphique. La séparabilité des classes reste encore cependant satisfaisante.

3.2.3 Résolution de 1km sur l'image NOAA du 8 mars 1987

Les deux images classées à 180 m de résolution (quarts d'image TM) ont été dégradées à 1 km par affectation de la classe dominante à l'intérieur d'un élément de grille de 1 km de côté et rejet si l'hétérogénéité du pixel est trop grande. Les pixels ainsi classés à 1 km de résolution sont utilisés comme pixels de référence pour calculer les statistiques des classes de végétation sur une image AVHRR du 8 mars 1987.

On peut réitérer les observations faites pour les deux premiers graphiques. Le compactage des classes les plus arborées est encore plus net. Le nombre de pixels des classes forêt galerie et forêt dense est insuffisant pour qu'il soit significatif. Ces deux classes n'ont donc pas été représentées. Lorsque l'on prend en compte l'ensemble des deux quarts de scène, il y a une forte prédominance, en nombre de pixels, des classes cultures, jachères et savane herbeuse par rapport aux classes forestières.

Ces graphiques nous montrent que le NDVI pourra aider, en saison sèche, à mettre en évidence des différences de recouvrement arboré. Cependant, les écarts entre valeurs sur l'axe virtuel de cet indice de végétation sont faibles. Il sera en particulier très difficile de séparer

les savanes des cultures en milieu soudanien au moyen de ce seul paramètre, alors que sur la ligne des sols pour le milieu soudanien, l'écart entre la réponse des cultures et la réponse de la savane herbeuse est suffisamment important pour être significatif. De même, il sera difficile de séparer la forêt dense des mosaïques forêt-culture en milieu guinéen.

3.3 Interprétation de la série d'images NOAA

L'interprétation des images NOAA traitées est faite dans une composition colorée particulière : NDVI codé en rouge, indice de brillance en vert (calculé sur canaux 1 et 2) et TS en bleu. En milieu de saison sèche, il est possible de séparer les deux grandes zones à potentialités écologiques différentes : région des savanes et région de la forêt dense humide. La première région est caractérisée par un faible indice de végétation correspondant à un dessèchement des herbacées et à une température de surface élevée, alors que la seconde montre un indice plus élevé dû à la présence du feuillage des arbres et à une température plus faible due à la protection du couvert végétal.

3.3.1 Tracé des évolutions du NDVI

Nous avons déjà montré dans Achard *et al.* (1989) que :

a) Pour la zone soudanienne, il est difficile de séparer le comportement des cultures de celui de la savane herbeuse, alors que la savane boisée présente un indice plus élevé dès le milieu de la saison sèche, au moment de la feuillaison des ligneux (saison sèche sur notre site : décembre à avril). Les trois types de végétation dominants sont les cultures pluviales, les jachères et la savane herbeuse. Les indices de végétation de ces trois types prennent à peu près les mêmes valeurs tout au long d'un cycle végétatif complet.

b) Pour la zone guinéenne, il est possible de séparer le comportement de la savane herbeuse de celui de la forêt dense semi-décidue : en saison sèche (janvier à mars) l'indice de végétation de la forêt est élevé à partir du moment de la feuillaison des arbres décidus. Mais il est impossible de séparer le comportement des cultures de celui de la forêt car ces cultures tropicales (café, cacao, etc.) ont les mêmes cycles d'activité chlorophyllienne et leurs réponses sont intermédiaires entre celles de la forêt de la Marahoué (jouxant la savane) et celle de la forêt du Haut-Sassandra (plus à l'intérieur dans la zone forestière).

3.3.2 Tracé des évolutions de la température de surface

On remarque sur la figure 1 que toutes les courbes sont ici aussi bruitées, comme pour les évolutions du NDVI, à cause des perturbations atmosphériques : il est, en effet, impossible de filtrer les poussières sèches d'Harmattan ou certaines vapeurs humides liées au passage de la mousson.

En zone soudanienne, le cycle des courbes de température de surface est déphasé d'un mois environ par rapport à l'indice de végétation. Le dessèchement progressif de la végétation s'accompagne d'une augmentation de la température de surface du couvert. Ceci est dû au réchauffement progressif du couvert végétal lorsque le stress hydrique se développe. Il est difficile de séparer le comportement de la savane boisée de celui de la savane herbeuse, alors que les cultures montrent une température plus élevée en fin de saison sèche. Le maximum de température est atteint en milieu de saison sèche pour les cultures qui ont une apparence de sols nus à cette époque de l'année.

En zone guinéenne, il est possible de séparer le comportement de la savane herbeuse de celui de la forêt dense semi-décidue sur le site du parc de la Marahoué. La savane atteint un

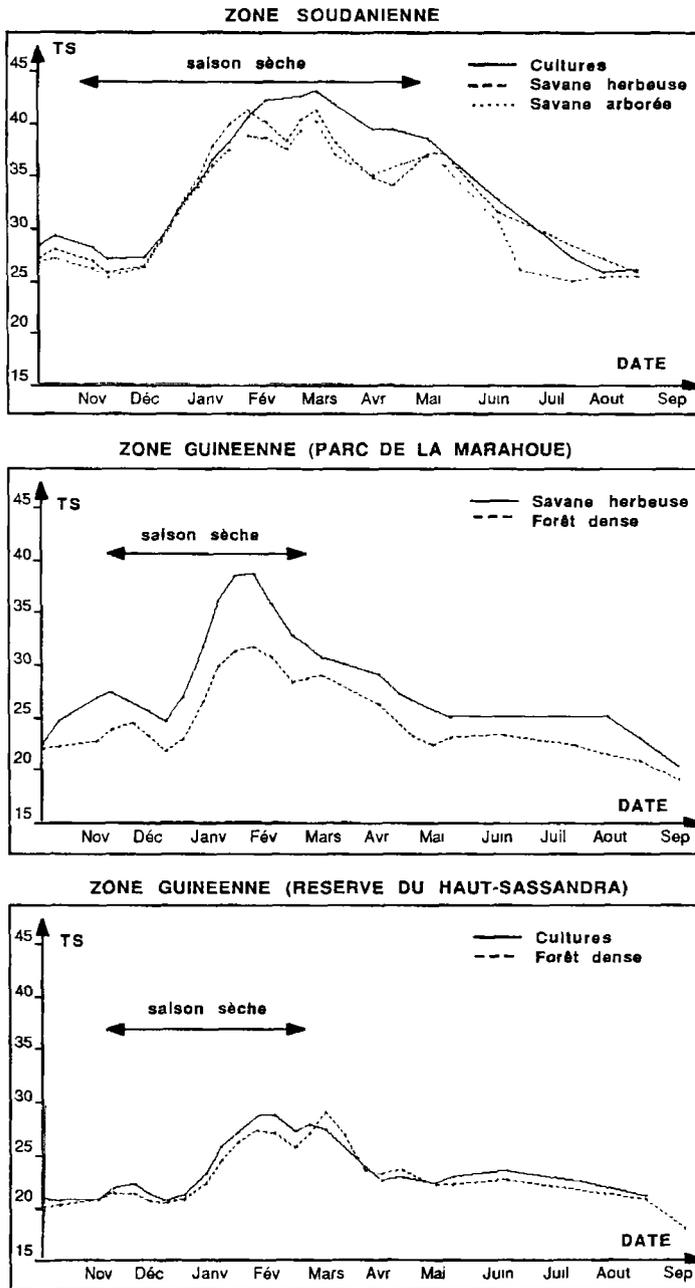


Figure 1. Évolution de la température de surface (TS) (moyenne des valeurs de tous les pixels de chaque classe)

maximum en février (40°C) qui est plus important que celui de la forêt (31°C) dont le comportement est plus stable. Pour le site de la réserve du Haut-Sassandra, la température de surface de la forêt et des couverts de culture présente de faibles variations (moyenne de 23°C pour la forêt) et il est impossible de séparer ces deux classes.

Le maximum de température en fin de saison sèche permet donc de différencier la végétation à cycle saisonnier bien marqué (savane herbeuse) de la végétation sempervirente ou semi-décidue. Les différences de comportement thermique deviennent nettes à partir du mois de janvier et restent élevées jusqu'au mois de mars. Le déphasage de la croissance de la température par rapport au début de la saison sèche s'explique probablement par l'inertie thermique des sols et du recouvrement partiel par les herbacées desséchées en début de saison sèche.

3.3.3 Histogrammes bidimensionnels NDVI/TS

Afin de compléter l'analyse du NDVI à 1 km, nous avons tracé, pour six dates, les ellipses de variance des principales classes de végétation sur un graphique où le NDVI est porté en abscisse et la température de surface en ordonnée (fig. 2).

On observe sur chaque graphique que les ellipses sont approximativement alignées le long d'une droite de pente négative. Ceci confirme la forte corrélation négative entre le NDVI et la température de surface à un instant donné. Par contre la pente des droites varie au cours du temps. Elle passe par un maximum en début de saison sèche (image du 05/01/87) lorsque le NDVI est très faible pour toutes les classes (intervalle 0,08-0,15) et que l'écart de température entre les types en zone soudanienne et la forêt ou les cultures en zone guinéenne est encore important (minimum 22°C, maximum 34°C). Au milieu de la saison des pluies, les ellipses sont très regroupées avec de fortes valeurs du NDVI (0,35-0,5) et de faibles valeurs de la température (22°C-25°C).

En zone soudanienne la meilleure séparabilité entre les classes est obtenue en milieu de saison sèche (images du 22/01/87 et 01/02/87). On peut différencier le type «savane boisée» des types «savane herbeuse» et «cultures». Ces deux derniers types ne sont séparables que sur l'image de fin de saison des pluies (21/10/86), mais les écarts types sont alors très forts, ce qui montre une certaine disparité des valeurs à l'intérieur de ces types de végétation.

4 Conclusions

4.1 Données SPOT et Landsat TM

Les trois images à haute résolution qui ont été utilisées comme référence pour trois sites-tests ont montré leur utilité pour travailler avec une série d'images NOAA LAC.

La résolution des images SPOT ou Landsat TM est suffisante pour produire une classification automatique à grande échelle. L'hétérogénéité spatiale de la végétation naturelle en région soudanienne nécessite cette résolution pour obtenir une cartographie valide.

L'interprétation des graphiques (rouge, proche infrarouge) nous suggère que le NDVI n'est pas, dans le cas de la zone soudanienne, le meilleur outil de différenciation des divers types de couvert végétal. Un indice des sols ou un indice de brillance serait probablement plus approprié.

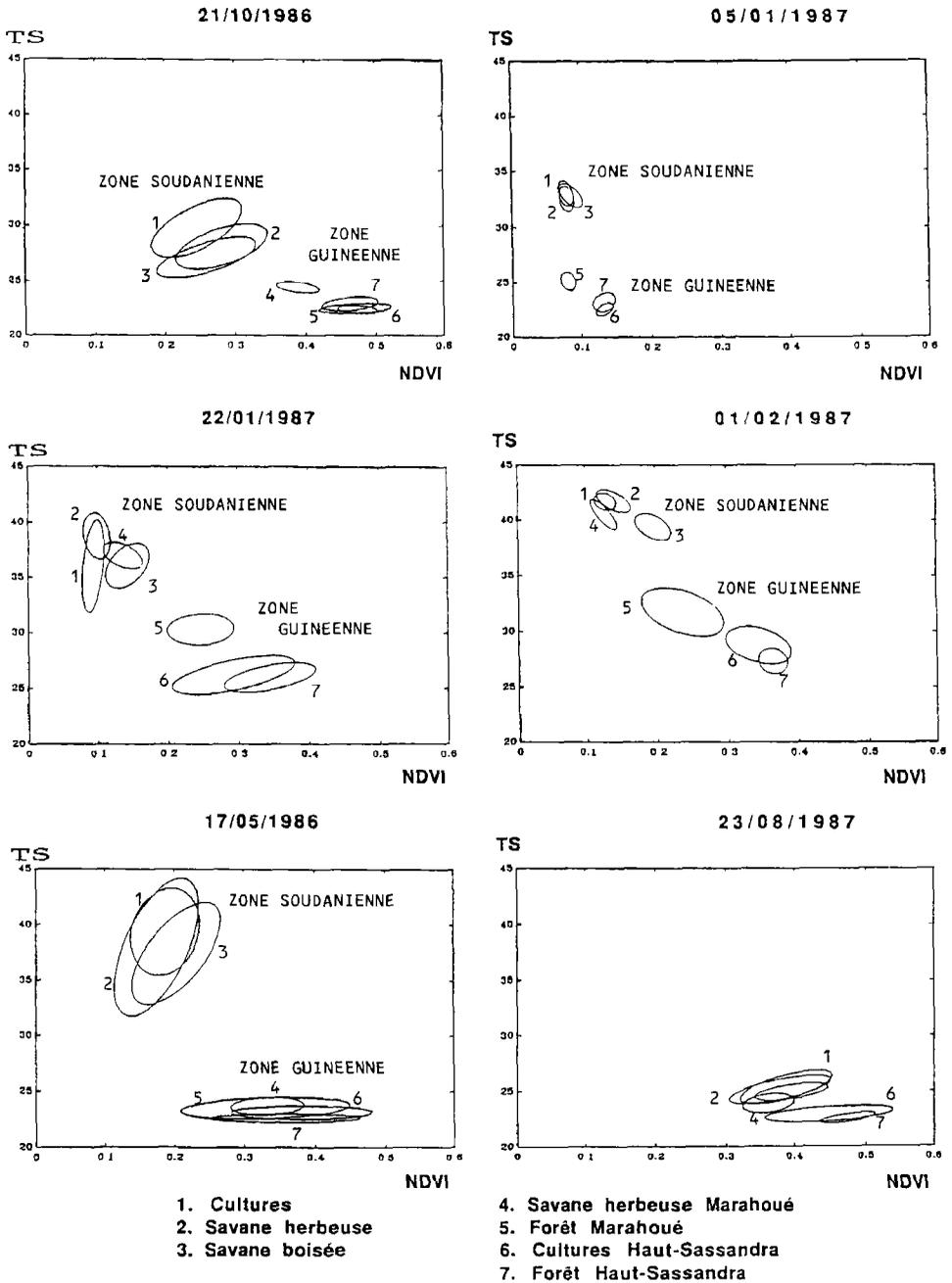


Figure 2. Évolution des ellipses de variance sur histogrammes bidimensionnels NDVI/TS

4.2 Données NOAA AVHRR LAC

La qualité des réponses enregistrées par le capteur AVHRR est fortement limitée par les perturbations atmosphériques présentes dans cette région : vent d'Harmattan ou nuages de la mousson. Cependant, la séparation entre les deux zones à potentialités écologiques différentes que sont la zone forestière (forêt dense humide) et la zone de savanes (et forêt sèche) est possible en milieu de saison sèche.

Le suivi de l'indice de végétation normalisé et de la température de surface sur un site en région soudanienne et sur deux sites en région guinéenne nous montre qu'à l'intérieur de chaque zone, il n'est pas possible de séparer les surfaces de cultures des milieux naturels. À l'intérieur des milieux naturels ou spontanés, seuls les comportements de la savane herbeuse (sans ligneux) et des types très boisés peuvent se séparer, notamment grâce au décalage phénologique des herbacées et des ligneux en saison sèche.

À la résolution du kilomètre, l'indice de végétation (NDVI) est donc insuffisant, seul, pour caractériser les paysages complexes des zones soudanienne et guinéenne.

Nous montrons aussi que l'indice de végétation est corrélé avec la température de surface à un instant donné. Nous avons mis en évidence sur les graphiques (indice de végétation, température de surface) l'alignement des ellipses de variance le long d'une droite de pente négative. La variation de la pente des droites au cours du temps est la conséquence du déphasage thermique.

La température de surface est en définitive un complément très utile au NDVI : ce paramètre permet, d'une part, de mieux différencier les types de végétation et apporte, d'autre part, une information supplémentaire sur l'état du couvert.

4.3 Prospective

Ce travail sur l'utilisation des produits spatiaux aux diverses résolutions nous permet d'exprimer quelques idées sur le thème de la déforestation intertropicale, étudiée grâce aux satellites actuels. Il s'agit essentiellement de dégager les principaux axes d'investigations dans ce domaine.

Nos conclusions suggèrent d'une part, qu'il ne faut pas limiter l'utilisation des données satellitaires au seul paramètre «indice de végétation», et font apparaître, d'autre part, que les données fournies par le capteur AVHRR ne sont pas bien adaptées à l'approche conventionnelle de la description de la végétation dans l'état actuel de nos connaissances.

Il apparaît donc primordial de développer plusieurs axes d'investigation susceptibles de faire progresser notre connaissance de la végétation et des informations spectrales :

1) Il faut d'abord remettre en cause les cartes de végétation à petite échelle, afin d'y intégrer les informations fournies par les satellites, en particulier sur les cycles saisonniers d'activité chlorophyllienne des couverts végétaux. À l'heure actuelle, les cartes de végétation ne permettent pas de se faire une idée, même vague, des rythmes biologiques des unités décrites.

2) Il faut de plus mener une approche différente où l'on considère l'usage de la télédétection pour l'étude de ces problèmes globaux, non plus simplement comme un outil, mais comme une problématique propre : ces données sont probablement les seules qui puissent nous permettre de comprendre les mécanismes de fonctionnement des grands ensembles forestiers tropicaux et d'évaluer les conséquences des transformations planétaires en cours.

5 Remerciements

Nous tenons à remercier Alain Podaire et François Lavenu du Laboratoire d'études et de recherche en télédétection spatiale (LERTS) de Toulouse qui nous ont assuré une collaboration scientifique indispensable à la réalisation de l'étude. Celle-ci a été financée par une aide du Programme national télédétection spatiale (PNTS) (aide CNES : 87/CNES/1270) et par un contrat avec le Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes, établissement d'Ispra, Italie (contrat no 3268-87-11 ED ISP F).

6 Références

- ACHARD, F., F. BLASCO, F. LAVENU et A. PODAIRE, 1989. Étude de la dynamique des formations au contact forêt-savane en Afrique de l'Ouest par télédétection. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection, n° 114, p. 37-39.
- ACHARD, F., 1989. Étude des rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. —Thèse de doctorat de l'Université Paul-Sabatier de Toulouse, 246 p.
- BLASCO, F. et F. ACHARD, 1990. Analysis of vegetation changes using satellite data. —in A. F. Bouwman (réd.). Soils and the Greenhouse effect. John Wiley & Sons, Inc., 10 p., sous presse.
- DESCHAMPS, P. Y. et T. PHULPIN, 1980. Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3,7, 11 and 12 μm . —Boundary-Layer Meteorology, 18, p. 131-143.
- FAO, 1988. An interim report on the state of forest resources in the developing countries. —Publication FAO Forest Resources Division, Rome, 18 p. + tableaux.
- FONTES, J., 1984. Évaluation des ressources forestières en Haute-Volta. Situation 1980-85. —Rapport FAO/ICITV, Toulouse, 30 p.
- GUILLAUMET, J. L. et E. ADJANOHOOUN, 1971. La végétation. —in J. M. Avenard *et al.* Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, p. 157-262.
- MALINGREAU, J. P. et C. J. TUCKER, 1988. Large scale deforestation in the Southeastern Amazon Basin of Brasil. —Ambio, vol. 17, n° 1, p. 49-55.
- TUCKER, C. J. et P. J. SELLERS, 1986. Satellite remote sensing of primary production. —International Journal of Remote Sensing, 7, p. 1395-1416.
- UNESCO, 1973. Classification internationale et cartographie de la végétation. —Unesco, Paris, p. 41-65.

2

Suivi par télédétection des productions céréalières pluviales en pays sahéliens

ÉTIENNE BARTHOLOMÉ

Institut pour les applications de la télédétection, Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes, 21020 Ispra, Italie

Résumé

Des valeurs hebdomadaires d'indices de végétation sont comparées aux rendements officiels en mil et sorgho pour 83 unités administratives du Sénégal, du Mali, du Burkina Faso et du Niger durant l'année 1984.

Les indices de végétation arrivent à décrire les 2/3 de la variabilité du rendement dès le début du mois de septembre, soit un à deux mois avant la récolte, suivant les régions.

Les indices intégrés ne se montrent pas supérieurs aux indices instantanés. Cependant, les paramètres de la régression avec les indices intégrés évoluent dans le temps d'une manière progressive et modélisable.

L'efficacité des moyennes régionales d'indice de végétation dans la description des rendements indique que le facteur explicatif principal est commun à la fois au domaine agricole et au domaine non agricole : il s'agit de la pluviométrie.

1 Introduction

Les indices de végétation sont reconnus depuis longtemps déjà comme un moyen efficace de mesurer l'état et la quantité de biomasse photosynthétisante. Leur signification est bien établie du point de vue théorique (Sellers, 1985 et 1987; Choudhury, 1987), et confirmée aussi bien en conditions expérimentales qu'en milieu naturel.

En Afrique de l'Ouest, ces études ont porté surtout sur le suivi des pâturages (Tucker *et al.*, 1983; De Wispelaere, 1983; Justice et Hiernaux, 1986; Hiernaux et Justice, 1986; Tucker

et al., 1986). Les applications aux cultures sont restées limitées et ponctuelles. Par contraste, peu de choses ont été faites en ce qui concerne l'étude de zones spatialement étendues.

Malgré cette relative faiblesse des connaissances sur l'Afrique de l'Ouest proprement dite, l'USAID (les abréviations citées dans le texte sont définies à la fin) et par la suite le Centre AGRHYMET de Niamey se sont mis à exploiter d'une manière opérationnelle les indices de végétation dérivés des données AVHRR fournies journalièrement par les satellites à orbite polaire de la NOAA. Faute de base de référence adéquate, ces applications opérationnelles se sont cantonnées jusqu'à présent dans des analyses purement qualitatives de la distribution spatiale et temporelle des indices de végétation.

Une telle approche ne satisfait cependant pas complètement l'utilisateur final de l'information. Pour prendre ses décisions, celui-ci a en effet besoin d'informations quantitatives sinon précises, du moins avec une marge d'erreur connue. Il désire obtenir ces informations par unité administrative, base de toute action concrète. Les informations fournies doivent permettre de déceler et de quantifier les situations de crise. En situation normale, elles doivent aider à organiser les flux commerciaux interrégionaux.

Les résultats présentés ci-après ont été obtenus dans le cadre d'une étude orientée par ces différentes exigences. Son objectif est de préciser par une comparaison empirique avec des données officielles de rendement et des données de pluviométrie la signification des indices de végétation calculés par unité administrative (taille moyenne : 10 000 km²) sur les régions agricoles du Sénégal, du Mali, du Burkina Faso et du Niger. L'intérêt d'une telle approche est double. D'une part, elle fournit des résultats directement comparables avec les statistiques officielles. D'autre part, elle autorise l'utilisation de procédures peu exigeantes de pré-traitement de l'imagerie satellitaire, et elle réduit fortement le volume des données à transmettre, favorisant ainsi une diffusion aisée de l'information.

L'analyse se limite ici à l'année 1984 pour des raisons de disponibilité de données statistiques.

Tant du point de vue climatique que du point de vue agricole, l'année 1984 a été calamiteuse (AGRHYMET, 1984). Alors que le mois de mai avait vu un bon démarrage de la saison des pluies, le mois de juin s'est caractérisé par une situation contrastée entre l'Est et l'Ouest. La Mauritanie, le Sénégal, la Gambie et l'ouest du Mali ont reçu des pluies excédentaires par rapport à la moyenne, alors que le reste (l'est du Mali, le Burkina, le Niger et le Tchad) était déficitaire, ce qui a entraîné un retard de la saison agricole dans ces régions. Les mois de juillet et d'août ont été partout déficitaires : il a manqué au moins 100 mm par mois sur les régions agricoles stratégiques des pays du CILSS. Le mois de septembre a été quant à lui pratiquement dans la norme, mais localement des pluies violentes ont occasionné des dégâts. Les déficits hydriques antérieurs n'ont cependant pas pu être comblés.

En résumé, les cultures ont subi des déficits hydriques sévères depuis la deuxième décennie de juillet jusqu'à la fin de la saison qui est parmi les plus mauvaises de la décennie.

2 Données

2.1 Statistiques agricoles

L'analyse s'appuie sur les données officielles de rendement obtenues par enquêtes agricoles. Celles-ci sont organisées de manière indépendante par l'administration de chaque État selon des procédures relativement similaires et en voie d'harmonisation. «Partout la méthodologie d'enquête utilisée est le sondage à plusieurs degrés, stratifié au premier degré en fonction d'un

seul critère qui est la taille démographique des villages (cas le plus fréquent) ou de plusieurs critères (cas le plus rare). La taille des échantillons à différents niveaux de tirage et dans chaque strate est déterminée sur la base d'un compromis entre les exigences scientifiques et les moyens humains et matériels disponibles. Dans bien des cas, les moyens étant limités, ce sont eux les plus déterminants» (DIAPER, 1987).

Le premier degré de sondage porte sur un tirage de villages-échantillons. Le deuxième degré porte sur un tirage d'exploitations-échantillons dans ces villages. Au troisième degré, on tire un certain nombre de parcelles-échantillons dans chacune de ces exploitations. Ces pièces de terre sont arpentées, en général à la boussole et au podomètre ou à la chaîne d'arpenteur. La nature de culture est déterminée et un carré de rendement (en général de 5 m par 5 m) est mis en place, le plus souvent sur un sous-échantillon. Au total, on peut considérer que les enquêtes sont réalisées selon une méthodologie non critiquable du point de vue strictement statistique, mais bien du point de vue agronomique : les critères de sélection des échantillons sont principalement d'ordre démographique. Les facteurs influençant la variabilité des observations ne sont donc absolument pas maîtrisés. Les statistiques sont publiées depuis quelques années pour des unités administratives d'une taille de l'ordre de 10 000 km².

Bien que le taux de précision ne soit pas spécifié dans les annuaires officiels, des observations indépendantes laissent penser que le taux d'erreur des chiffres de rendement est de l'ordre de 20%. Par ailleurs, l'analyse des statistiques de rendement par unité administrative a montré qu'à cette échelle géographique, les rendements en mil et sorgho sont suffisamment similaires pour qu'on puisse les considérer ensemble (Bartholomé, 1989).

2.2 Données télédétectées

On a exploité des données AVHRR archivées au Centre AGRHYMET qui nous ont été fournies pour analyse dans le cadre du projet du CILSS «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel», financé par le Fonds européen de développement. Il s'agit d'indices de végétation calculés à partir de données AVHRR GAC et dégradés spatialement à des cellules de grille de un degré en longitude et un demi-degré en latitude. Ces données ont été préparées aux États-Unis pour le Centre AGRHYMET selon la procédure suivante (AGRHYMET, 1986; Johnson *et al.*, 1987) :

- réception journalière des données GAC à Washington (station NOAA);
- correction géométrique selon la projection «plate carrée», et calcul du NDVI;
- assemblage des séries temporelles, et extraction, pixel par pixel, des valeurs maximales de NDVI pour chaque semaine de l'année;
- calcul des NDVI moyens et d'autres paramètres statistiques par cellule de grille d'un demi-degré;
- lissage des données par calcul de la moyenne sur une fenêtre temporelle mobile de 5 semaines (la valeur centrale est pondérée par les valeurs des deux semaines précédentes et des deux semaines suivantes), de manière à réduire le bruit résiduel lié principalement à l'état de l'atmosphère;
- transfert hebdomadaire des valeurs par cellule de grille au Centre AGRHYMET via télex commercial pour intégration dans la chaîne de suivi opérationnel.

À partir de ces données pré-traitées par demi-degré carré, les valeurs hebdomadaires moyennes de NDVI ont été calculées pour 83 circonscriptions administratives du Sénégal, du Mali, du Burkina Faso et du Niger. Les moyennes ont été calculées proportionnellement aux surfaces. Certaines unités administratives ont été écartées de l'analyse, soit par manque

de données, soit parce que leur grande extension latitudinale ne donnait guère de sens à une comparaison entre NDVI et rendements de cultures concentrées sur quelques sites-refuges, soit encore parce que la proximité de l'océan risquait de biaiser les observations. L'arrière-pays de Dakar et les régions septentrionales du Mali et du Niger ont donc été écartés.

3 Résultats

3.1 Corrélations instantanées

Johnson *et al.* (1987) proposent d'établir la corrélation entre NDVI global et rendements au moment de la formation du grain. Ce moment est fonction de la longueur du cycle et donc des variétés. Il pourrait, selon ces auteurs, être déterminé en considérant que l'émergence radiométrique correspond à l'émergence des cultures. Cette argumentation est sans doute correcte si la résolution du satellite est compatible avec la taille du domaine agricole, ou si celui-ci domine nettement dans le paysage. L'extrapolation de cette argumentation au suivi de l'agriculture sahélienne paraît audacieuse, à cause à la fois de la faible résolution des données utilisées, du faible taux de mise en culture (en général 5% à 25% de la superficie totale) et de l'étalement dans le temps des activités agricoles. Néanmoins, la méthode préconisée par ces auteurs a certaines chances de fonctionner sur les données à un demi-degré de résolution principalement à cause de la forte autocorrélation temporelle des données. Celle-ci est dûe pour une part à la procédure de lissage sur cinq semaines (dans cet intervalle, les coefficients de détermination entre dates sont supérieurs à 0,95) et pour une autre part au déterminisme inhérent au développement de la végétation. Ainsi, les NDVI du 25 juin décrivent déjà les trois quarts de la variabilité des NDVI du 3 septembre, moment où la relation NDVI-rendement est la plus forte.

Même si on estime mal l'émergence réelle des cultures, il est très peu probable que cette erreur soit supérieure à cinq semaines. Si en outre on fait une hypothèse erronée sur la durée du cycle des cultures, il y a de fortes chances que cette erreur ne dépasse pas non plus cinq semaines. L'argumentation utilisée pour déterminer le moment optimum du calcul de régression ne paraissant pas complètement fondée, on retombe ainsi dans le champ de l'analyse purement empirique.

Le tableau I montre que le NDVI global arrive à décrire plus des 2/3 de la variabilité du rendement moyen des deux principales céréales pluviales pour l'ensemble des quatre pays considérés.

Plusieurs observations peuvent être tirées de ce tableau :

1) Les conclusions tirées par Johnson *et al.* (1987) sur une dizaine de lieux au Burkina Faso peuvent se généraliser à l'ensemble des unités administratives des quatre pays où la culture du mil et du sorgho est pratiquée.

2) Il n'est pas nécessaire de rechercher un quelconque stade critique eu égard à l'autocorrélation temporelle des données.

3) La meilleure corrélation est obtenue aux environs de la transition montaison-épiaison (du 20 août au 17 septembre), comme l'ont montré les observations en parcelles expérimentales, que ce soit sur le mil et le sorgho (Bartholomé, 1988a) ou sur d'autres céréales, et non au moment de la formation du grain, qui apparaît environ trois semaines plus tard.

4) La meilleure corrélation est postérieure au NDVI maximum, indiquant sans doute un déphasage entre le développement de la végétation naturelle et celui des cultures.

Tableau I. Coefficients de détermination pour différentes procédures d'intégration du NDVI (les coefficients de détermination sont significatifs s'ils sont supérieurs ou égaux à 0,047 [p=0,05])

Jour	Indices instantanés R^2	Intégration des indices de végétation				
		Depuis le 30 avril R^2	Depuis le 11 juin			
			Données originales		Racines carrées	
			Non sélectionnées R^2	Sélectionnées R^2	Non sélectionnées R^2	Sélectionnées R^2
11 juin	0,40	0,11	0,40	0,15	0,43	0,25
18 juin	0,42	0,12	0,42	0,18	0,45	0,26
25 juin	0,29	0,17	0,43	0,21	0,46	0,29
2 juillet	0,43	0,27	0,40	0,32	0,47	0,42
9 juillet	0,42	0,29	0,47	0,33	0,50	0,38
16 juillet	0,49	0,35	0,49	0,39	0,53	0,44
23 juillet	0,58	0,41	0,52	0,47	0,56	0,52
30 juillet	0,58	0,45	0,54	0,51	0,59	0,54
6 août	0,62	0,51	0,56	0,55	0,61	0,60
13 août	0,65	0,53	0,57	0,56	0,62	0,62
20 août	0,67	0,55	0,58	0,58	0,63	0,64
27 août	0,67	0,56	0,59	0,59	0,64	0,64
3 sept.	0,67	0,57	0,60	0,59	0,64	0,65
10 sept.	0,67	0,58	0,60	0,60	0,65	0,65
17 sept.	0,67	0,58	0,60	0,60	0,65	0,65
24 sept.	0,65	0,59	0,60	0,61	0,65	0,65
1 octobre	0,62	0,58	0,60	0,61	0,65	0,65
8 octobre	0,64	0,58	0,60	0,60	0,65	0,65
15 octobre	0,70	0,57	0,60	0,59	0,65	0,65
22 octobre	0,62	0,56	0,60	0,58	0,65	0,65

5) Les données télédétectées permettent de se faire une idée à la fois précise (les moyennes sont estimées à environ 100 kg/ha) et globale des rendements environ un à deux mois avant la récolte.

6) La partie de la variabilité non décrite par la régression est attribuable dans une mesure non déterminée d'une part à l'imprécision intrinsèque des statistiques de rendement (nombre réduit d'observations), et d'autre part à celle de l'observation satellitaire globale.

7) Le comportement général de toute la végétation est un bon indicateur de l'état des cultures. Ceci indique que le facteur déterminant la variabilité des rendements à cette échelle spatiale n'est pas lié spécifiquement aux cultures, mais affecte toute la végétation : il ne peut s'agir que des conditions météorologiques de la saison et en particulier de la pluviométrie. Une telle conclusion valable à l'échelle sous-continentale ne peut sans doute se transposer directement à une analyse intrarégionale (quelques dizaines de kilomètres carrés). La nature des facteurs explicatifs dépend du niveau d'échelle spatiale auquel on considère le problème.

3.2 Intégration temporelle

Pour vérifier d'une manière purement empirique l'applicabilité à l'échelle globale du modèle liant l'énergie lumineuse absorbée par le couvert végétal à la production de matière sèche (modèle APAR-rendement) proposé par Warren-Wilson (1967 et 1969) et Monteith (1972) et contrôlé à l'échelle de la parcelle, on a établi les corrélations entre données intégrées de NDVI au cours de la saison et rendement en mil et sorgho.

L'intégration a été effectuée de trois manières différentes : à partir du minimum de NDVI d'avant-saison, soit le 3 avril; à partir du moment où les corrélations avec les NDVI instantanés deviennent significatives, soit le 11 juin; et finalement à partir de la date de démarrage de la saison définie par le moment où l'accroissement cumulé de NDVI dépasse 0,01. Ce critère s'avère être un bon indicateur du démarrage des pluies utiles (Bartholomé, 1989). Il s'avère que les corrélations les plus fortes sont observées avec les deux dernières procédures d'intégration. Une date de démarrage trop précoce intègre le comportement radiométrique de végétations n'ayant aucun rapport avec les cultures, mais qui affecte néanmoins les valeurs tout au long de la période d'intégration. La prise en compte de la date de début de saison donne des corrélations légèrement inférieures en début de période par rapport à la simple intégration générale à partir du 11 juin, mais les différences s'amenuisent avec le temps (tableau I). Ceci indique que l'émergence radiométrique globale n'est pas un estimateur précis de l'émergence réelle des cultures.

Contrairement à ce que suggéraient des observations sur parcelles expérimentales (Bartholomé, 1988b), les NDVI intégrés ($R^2 = 0,65$) ne sont pas significativement différents des NDVI instantanés ($R^2 = 0,67$). Au contraire, ils ont une tendance systématique à être légèrement inférieurs.

On peut noter que la force des relations reste stable du début septembre jusqu'à la fin octobre, c'est-à-dire durant toute la période de formation du grain.

L'applicabilité du principe du modèle de relation APAR-rendement à l'échelle sous-continentale est donc confirmée par les fortes corrélations observées, mais contrairement à ce que prédit le modèle APAR-rendement, on constate dans le cas étudié que l'intégration de l'indice de végétation ne permet pas de décrire mieux la variabilité du rendement que l'observation instantanée. On peut sans doute invoquer, du moins en partie, des causes techniques : d'une part, l'analyse se base sur une mesure globale du NDVI et non sur une mesure ciblée sur les cultures, d'autre part le NDVI «instantané» étant obtenu par lissage, il est donc déjà le résultat d'une forme d'intégration temporelle.

Dans la pratique, l'avantage du NDVI intégré appliqué à des données globales pourrait alors se situer principalement dans la possibilité de prédire les paramètres de la régression. L'analyse des paramètres de régression (pente et constante) confirme les observations effectuées sur parcelles expérimentales (Bartholomé, 1988b et 1989). Ceux-ci suivent une trajectoire temporelle curviligne qui tend vers la linéarité après l'apparition du NDVI maximum (fig. 1). Ces observations indiquent qu'il est possible de prévoir les paramètres de la régression en fonction du moment dans la saison.

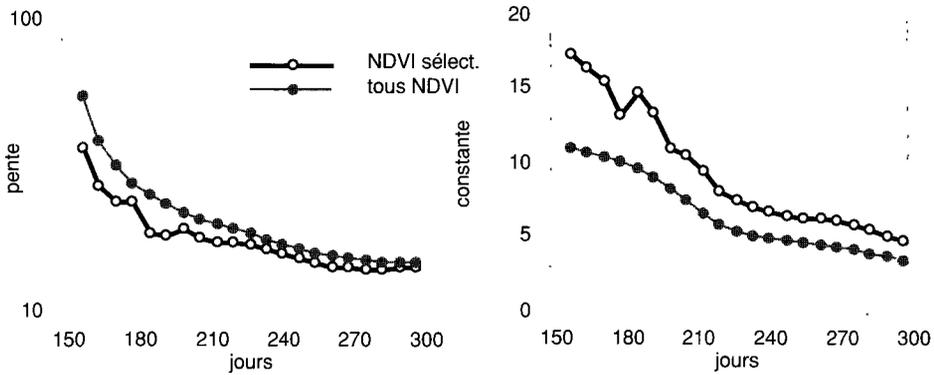


Figure 1. Évolution temporelle des paramètres de la régression NDVI intégré - rendement en mil et sorgho

Les figures 2 et 3 comparent les estimations obtenues par intégration des NDVI moyens régionaux jusqu'au 3 septembre. À ce moment, le coefficient de détermination est de 0,64, soit une valeur du même ordre de grandeur que les valeurs observées sur parcelles expérimentales (Tucker *et al.*, 1980; Markham *et al.*, 1981; Pinter *et al.*, 1981; Daughtry *et al.*, 1983; Gallo *et al.*, 1985; Daughtry, 1988; Bartholomé, 1988b). On peut constater que l'intervalle de confiance de l'estimation est relativement étroit : de l'ordre de 60 kg/ha pour des estimations de 600 kg/ha, et de 150 kg/ha vers des rendements de 1000 kg/ha. Cependant, la dispersion des points est relativement importante, principalement à cause, d'une part, de la précision incertaine des mesures de rendement, et d'autre part, à cause de l'observation globale.

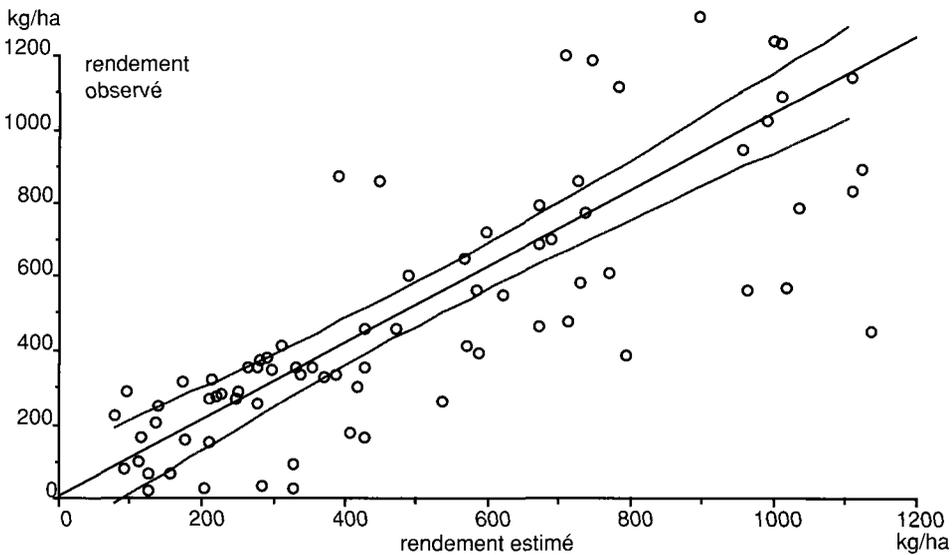


Figure 2. Comparaison entre rendement estimé au 3 septembre 1984 par l'intégration des NDVI régionaux et rendement observé par enquête agricole (les courbes donnent l'intervalle de confiance à 95% de l'estimation, le coefficient de détermination est de 0,64)

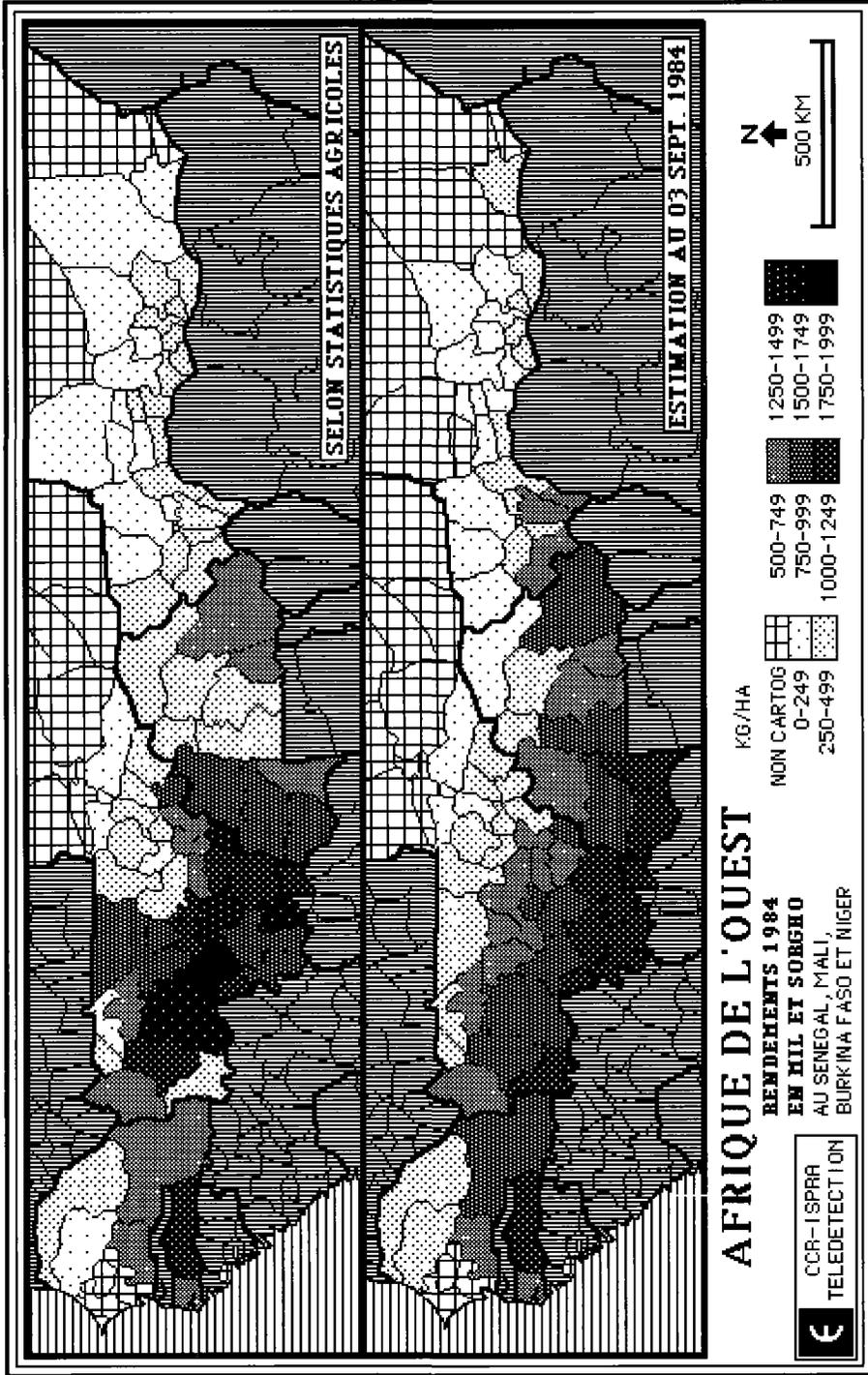


Figure 3. Comparaison entre rendement observé et rendement estimé par intégration des NDVI moyens régionaux jusqu'au 3 septembre 1984

La figure 4 nous apprend cependant que 49 observations sur 83 ont fourni un résidu compris dans une fourchette de ± 150 kg/ha, ce qui correspond au niveau probable de précision des enquêtes de terrain, alors que 20 observations présentent un écart supérieur à 250 kg/ha.

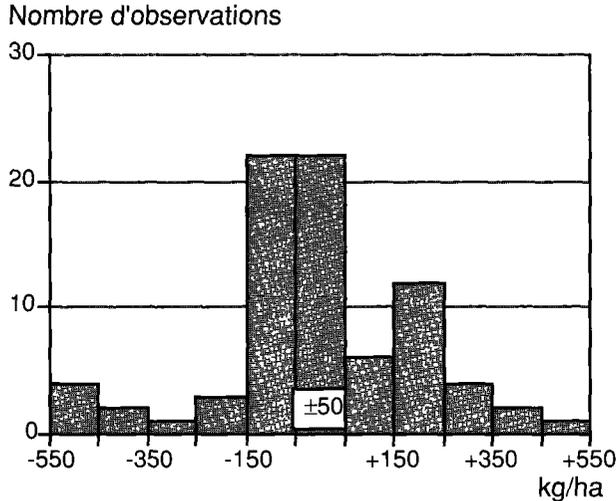


Figure 4. Histogramme des écarts entre rendement estimé au 3 septembre 1984 par l'intégration des NDVI régionaux et rendement observé par enquête agricole

La figure 5 indique la répartition spatiale des résidus de corrélation. La correspondance entre estimation et observation paraît satisfaisante pour toute la moitié orientale de la zone étudiée, c'est-à-dire le nord-est du Mali agricole, la moitié septentrionale du Burkina Faso, et pratiquement tout le Niger. Il s'agit en fait de toutes les zones à faible rendement (<500 kg/ha). En revanche, les zones à rendement moyen (500-1000 kg/ha) ont tendance à être surestimées. Il s'agit principalement de régions appartenant au domaine nord guinéen du sud du Mali et du Burkina Faso, ainsi que de territoires à proximité de la haute vallée du fleuve Sénégal. Enfin, une grande poche de sous-estimation barre le Mali en deux. Dans ces régions, des rendements relativement élevés (>1000 kg/ha) ont été révélés par les enquêtes agricoles.

La comparaison visuelle de cette carte avec celle des pluviométries mensuelles (AGRHYMET, 1984) n'a permis d'observer aucune corrélation évidente. De même, il n'y a pas de correspondance apparente avec le taux de mise en culture et le taux de céréaliculture (Bartholomé, 1989) qui aurait pu expliquer une meilleure efficacité de l'observation globale là où la culture domine.

Ces discordances peuvent avoir principalement trois origines :

1) Biais des statistiques de rendement : des biais locaux ne sont pas à exclure (voir par exemple la répartition spatiale «anormale» par rapport aux isohyètes des rendements élevés au Mali). Un biais possible pourrait être par exemple la prise en compte dans certaines régions ou au contraire l'élimination dans d'autres de parcelles à très faible rendement, qui pourraient être déclarées comme sinistrées par les enquêteurs (dans ce cas, il y a aussi influence sur les surfaces récoltées), même si en pratique elles sont récoltées, surtout en période de disette.

2) L'observation globale ne permet pas de rendre compte correctement des adaptations locales de l'agriculture au milieu. Il est probable que, dans certaines régions, les pratiques

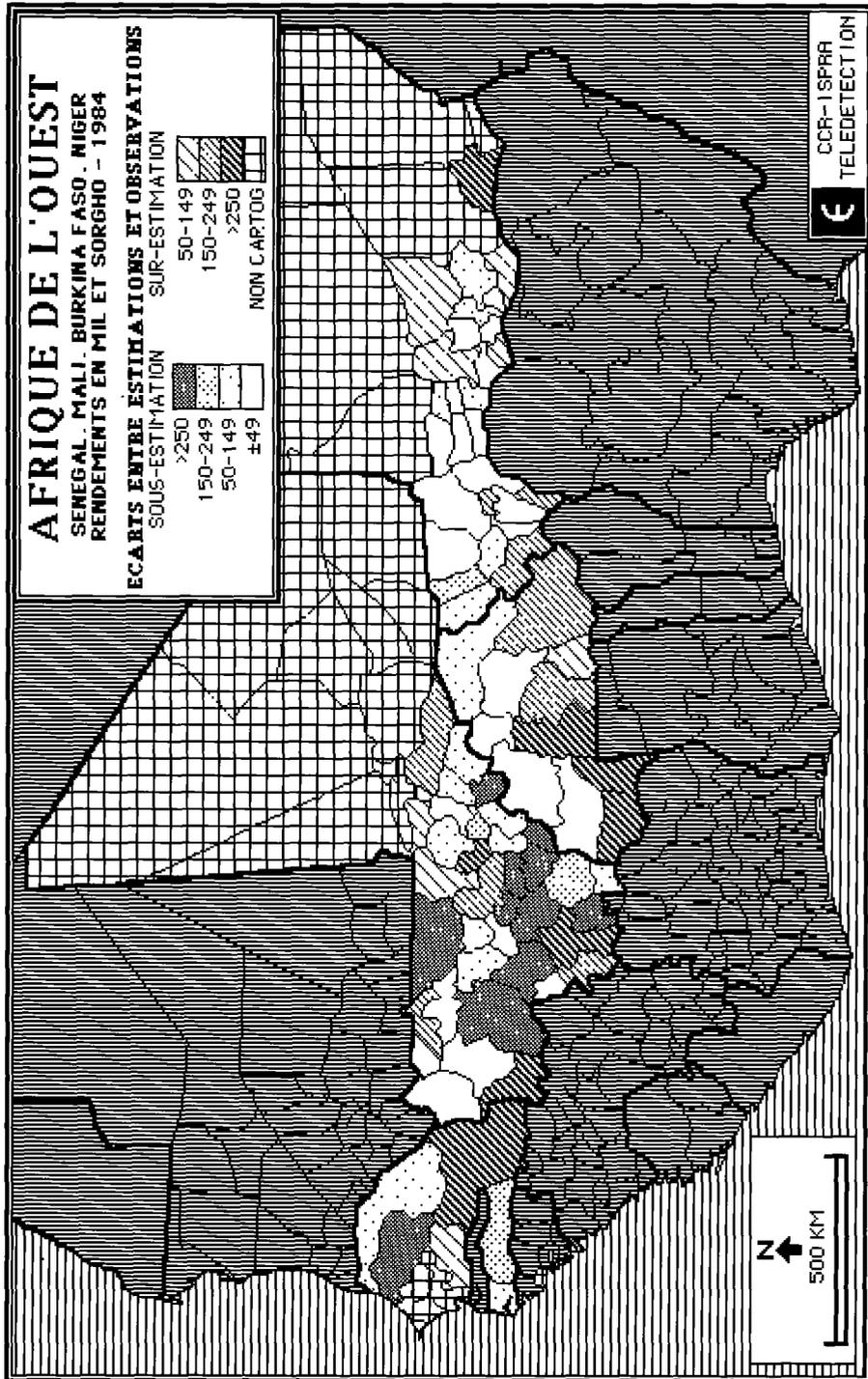


Figure 5. Cartographie des résidus entre rendement observé et rendement estimé par intégration des NDVI moyens régionaux jusqu'au 3 septembre 1984

agricoles permettent de manière plus efficace que la moyenne les potentialités du milieu. Ceci pourrait expliquer les «anomalies» notées précédemment.

3) L'état de l'atmosphère peut localement biaiser les indices de végétations. Ainsi, la bande de rendements sous-estimés au Mali correspond à la position moyenne des maxima de tension de vapeur d'eau (R. Morel, communication orale).

4 Conclusions

- Les moyennes par unités administratives d'indices de végétation NDVI permettent de fournir une description d'environ 2/3 de la variabilité spatiale des rendements en mil et sorgho à l'échelle sous-continentale de un à deux mois avant la récolte.

- À cette échelle géographique, le facteur explicatif de la variabilité des rendements est commun au domaine agricole et au domaine non agricole : il s'agit essentiellement de la pluviométrie.

- Les discordances entre valeurs observées et valeurs estimées sont à rechercher d'abord dans les limitations intrinsèques aux données utilisées dans l'expérimentation : NDVI moyen calculé sur de grandes unités administratives et statistiques agricoles de qualité variable et en tout cas limitée par le nombre d'observations. La variabilité des techniques agricoles peut sans doute aussi expliquer certains biais localisés.

- Si l'observation globale fournit déjà une bonne idée de la tendance générale des rendements, une meilleure estimation pourrait être obtenue par l'observation ciblée sur le domaine agricole de chacune des unités administratives.

5 Remerciements

Cette étude constitue une partie de la contribution du Centre commun de recherche d'Ispra au projet du CILSS «Surveillance des ressources naturelles renouvelables». Je remercie Messieurs F. Ouattara et P. Delorme, respectivement coordinateur et expert de ce projet, pour l'aide apportée dans la collecte des données. Je remercie également P. Jacques du Laboratoire de télédétection de l'Université de Louvain-la-Neuve pour son aide dans le reformatage des données numériques.

6 Références

- AGRHYMET, 1984. Synthèse régionale des situations agrométéorologiques de la saison des pluies 1984 dans les pays du CILSS. —Publication n° 184 du Centre AGRHYMET, Niamey, 101 p.
- AGRHYMET, 1986. Synthèse régionale des situations agrométéorologiques de la saison des pluies 1986 dans les pays du CILSS. —Publication n° 197 du Centre AGRHYMET, Niamey, 249 p.
- BARTHOLOMÉ, É., 1988a. Recherches sur la prévision précoce du rendement des cultures céréalières pluviales, résultats de la campagne de carrés de rendements Kaya 1987. —Note technique n° 1.88.82, Centre commun de recherche, Établissement d'Ispra, 22 p.

- BARTHOLOMÉ, É., 1988b. Radiometric measurements and crop yield forecasting : some observation over millet and sorghum experimental plots in Mali. —EARSEL symposium European remote sensing needs in the 1990^e, Noordwijkerhout, NL, 4-8 may 1987, International Journal of Remote Sensing, special issue n° 9/10-11, p. 1539-1552.
- BARTHOLOMÉ, É., 1989. Contribution aux méthodes de suivi par télédétection satellitaire des rendements régionaux des cultures céréalières pluviales en Afrique soudano-sahélienne. — Dissertation présentée pour l'obtention du grade de Docteur en sciences, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique, Institut pour les applications de la télédétection, CCR-Ispra, Italie, 255 p.
- CHOUDHURY, B. J., 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. —Remote Sensing of Environment, n° 22, p. 209-233.
- DAUGHTRY, C. S. T., K. P. GALLO et M. E. BAUER, 1983. Spectral estimates of solar radiation intercepted by corn canopies. —Agronomy Journal, n° 75, p. 527-531.
- DAUGHTRY, C. S. T., 1988. Estimating absorbed radiation and phytomass from multispectral reflectance of corn and soybeans. —Proceedings of IGARSS'88, Edinburgh, 13-16 septembre 1988, ESA Publication Division ESA SP-284, p. 821-824.
- DE WISPELAERE, G., 1983. Systèmes de production d'élevage au Sénégal, étude et cartographie de l'évolution de la végétation par télédétection aérospatiale. —Compte rendu de fin d'étude, Institut d'études en médecine vétérinaire tropicale, ISBN 2-85895-082-1, 141 p.
- DIAPER, 1987. Suivi de campagne et estimation des récoltes, présentation des dispositifs d'enquête existants dans les états-membres pour la collecte des statistiques agricoles courantes. — Publication n° D3/87, Projet FED-CILSS, Diagnostic permanent, Ouagadougou, 26 p.
- GALLO, K. P., C. S. T. DAUGHTRY et M. E., BAUER, 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. —Remote Sensing of Environment, n° 17, p. 221-232.
- HIERNAUX, P. et C. O. JUSTICE, 1986. Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel malien. —International Journal of Remote Sensing, n° 7/11, p. 1515-1532.
- JOHNSON, G. E., A. VAN DIJK et C. M. SAKAMOTO, 1987. The use of AVHRR data in operational agricultural assessment in Africa. —Geocarto International, n° 1, p. 41-60.
- JUSTICE, C. O. et P. HIERNAUX, 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data : Niger 1983. —International Journal of Remote Sensing, n° 7/11, p. 1475-1498.
- MARKHAM, B., D. KIMES, C. TUCKER et J. MC MURTREY, 1981. Temporal spectral response of a corn canopy. —Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n° 48/11, p. 1599-1605.
- MONTEITH, J. L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. —Journal of Applied Ecology, n° 9, p. 747-766.
- PINTER, P., R. JACKSON, S. IDSO et R. REGINATO, 1981. Multidate spectral reflectance as predictors of yield in water stressed wheat and barley. —International Journal of Remote Sensing, n° 2/1, p. 43-48.
- SELLERS, P. J., 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. —International Journal of Remote Sensing, n° 6/8, p. 1335-1372.
- SELLERS, P. J., 1987. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. —Remote Sensing of Environment, n° 21, p. 143-183.
- TUCKER, C. J., B. HOLBEN, J. ELGIN et J. MC MURTREY, 1980. Relationship of spectral data to grain yield variation. —Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n° 46/5, p. 657-666.

- TUCKER, C. J., C. VANPRAET, E. BOERWINKER et A. GASTON, 1983. Satellite remote sensing, of total dry matter production in the senegalese Sahel. —Remote Sensing of Environment, n° 13, p. 461-474.
- TUCKER, C. J., C. JUSTICE et S. PRINCE, 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. —International Journal of Remote Sensing, n° 7/11, p. 1571-1582.
- WARREN-WILSON, J., 1967. Ecological data on dry matter production by plants and plant communities. —in Bradley et Denmead (réd.). The collection and processing of field data. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 77-123.
- WARREN-WILSON, J., 1969. Maximum yield potential. —Proceedings of the symposium on transition from extensive to intensive agriculture with fertilizers, International Potash Institute, Berne, p. 34-56.

7 Abréviations citées dans le texte

Centre AGRHYMET : centre régional de formation et d'application en agrométéorologie et hydrologie opérationnelle, dépendant du CILSS et basé à Niamey (Niger).

AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer : radiomètre imageur ayant 1,1 km de résolution au sol au nadir, et muni de 5 bandes spectrales dans le visible, le proche infrarouge, le moyen infrarouge et l'infrarouge thermique.

CILSS : Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel. Cet organisme regroupe neuf pays de l'Afrique occidentale soudano-sahélienne et a son siège à Ouagadougou (Burkina Faso).

DIAPER : Projet Diagnostic permanent, projet du CILSS financé par le Fonds européen de développement, ayant son siège à Ouagadougou et visant à l'amélioration des systèmes traditionnels d'enquête.

GAC : Global Area Coverage : données fournies par l'instrument AVHRR avec une résolution dégradée à environ quatre kilomètres au nadir.

NDVI : Normalised Difference Vegetation Index : indice de végétation de la différence normalisée, obtenu par la formule suivante : $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$, où PIR et R sont respectivement les bandes spectrales d'AVHRR dans le proche infrarouge et le rouge.

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration, administration des États-Unis d'Amérique pour la surveillance atmosphérique et océanographique.

USAID : United States Agency for International Development, administration des États-Unis d'Amérique pour le développement international.

3

Intégration de données multisources pour l'étude du système hydrographique du delta de la Médjerda et de la sebkhet er Riana

MOHAMED RACHED BOUSSEMA

École nationale d'ingénieurs de Tunis, B. P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie

Résumé

Ce texte décrit une méthode permettant d'étudier les ressources hydrographiques d'une région. Cette méthode s'appuie sur l'intégration de données multisources rassemblées dans une base de données géocodées. Les données multisources comprennent celles produites par numérisation de cartes existantes de la zone étudiée et celles obtenues par satellites de télédétection. La zone objet de notre investigation, située dans la région de Tunis, est délimitée par le système hydrographique du delta de la Médjerda et de la sebkhet er Riana. La méthode suivie consiste en la numérisation des cartes existantes, la visualisation, le nettoyage et la transformation des données numérisées et l'intégration de ces données à celles de SPOT. L'objectif est d'utiliser conjointement toutes ces données afin d'obtenir une cartographie de l'hydrographie étudiée.

1 Introduction

Dans tout projet de lutte contre la sécheresse concernant une région, il est important d'évaluer les ressources hydrographiques de cette dernière. Aujourd'hui, la télédétection apporte une aide considérable dans la cartographie de ces ressources. Cependant, bien que de nombreux problèmes parfois très complexes aient été résolus avec succès par la télédétection, beaucoup d'autres ont montré ses limites quand elle est appliquée seule. Les chercheurs se sont tournés

alors vers les systèmes d'information géographique (SIG). Notre approche est de créer une base de données géocodées s'appuyant sur des données de télédétection. Celles-ci sont aujourd'hui diverses, enregistrées par des satellites et des capteurs différents et caractérisées par des résolutions spatiales, spectrales, radiométriques et temporelles très variées. Se pose alors le problème crucial de l'intégration des données de télédétection avec d'autres données acquises pour former un SIG. Ces dernières peuvent provenir de sources différentes telles que des documents cartographiques ou répertoires existants mais elles doivent être numériques (Boussema, 1987).

Après une brève description de la zone d'étude et des données utilisées, nous tenterons d'exposer la méthode adoptée et commenterons les résultats obtenus.

2 Données de l'étude

2.1 Localisation géographique

La zone choisie pour servir de cadre à cette étude est celle du système hydrographique du delta de la Médjerda et de la sebkhet er Riana (fig. 1). Elle est située dans la partie nord-est de la Tunisie, au nord de la capitale, Tunis, s'étendant entre 10°00' et 10°50' de longitude est et entre 36°50' et 37°10' de latitude nord. Cela englobe une partie du golfe de Tunis.

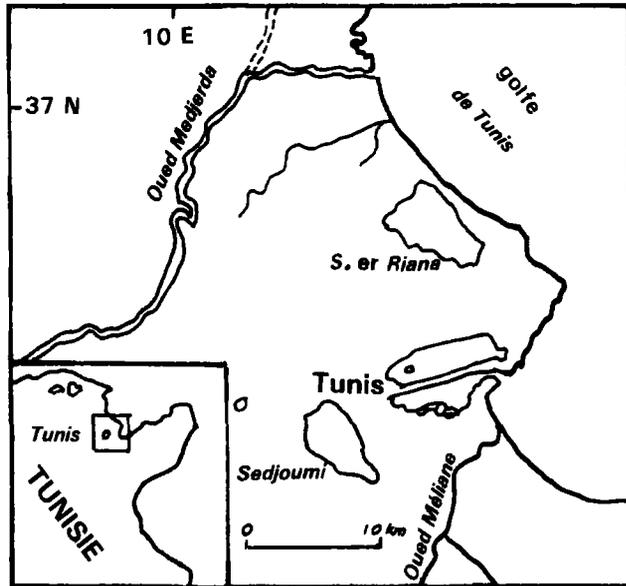


Figure 1. Situation géographique de la zone étudiée

2.2 Description générale

Lors d'une précédente étude n'utilisant que des données Landsat-MSS (Boussema *et al.*, 1988), outre le «lac» de Tunis et la sebkhet es Sedjoumi, nous avons constaté que la zone délimitée par la Médjerda au nord et la sebkhet er Riana au sud présente des caractéristiques

assez particulières et une hydrographie assez complexe qui en font un système hydrographique intéressant à étudier. La sebkhet er Riana est littorale, située vers 4-7 m d'altitude et séparée du golfe de Tunis par un mince cordon dunaire. La Médjerda, qui est le fleuve le plus important de la Tunisie, est pérenne, déverse d'importantes quantités de sédiments dans le golfe et présente une structure deltaïque à son embouchure. Entre les deux s'enclave une plaine d'aspect inondable et lagunaire.

La côte, en l'absence de marées significatives, semble être influencée par une dérive littorale nord-sud, par la Médjerda et par la sebkhet er Riana. Elle est de nature sableuse.

Toute la zone reçoit en moyenne entre 400 et 600 mm de pluies par an, de 60 à 100 jours pendant la période de septembre à mai.

2.3 Acquisition des données

2.3.1 Données de télédétection

Le système hydrographique a déjà été étudié (Boussema *et al.*, 1988) à l'aide d'images Landsat-MSS, l'une d'hiver (26/01/77) et l'autre d'été (19/07/81). La présente étude est basée sur l'image SPOT-XS, 65-276, d'angle de visée 2°, de niveau 1B, datée du 9 septembre 1987 (fig. coul. 3-2), soit plus de dix ans après la première image. Ce passage d'une résolution spatiale de 80 m environ à une résolution de 20 m a été d'un grand intérêt.

2.3.2 Données numérisées

Dans le cadre d'un projet en cours de réalisation, toute la topographie, la géologie, la pédologie, l'occupation du sol et les limites administratives de la région de Tunis ont été numérisées (tableau I). Les données relatives à la zone d'étude ont été extraites de ces 19 fichiers.

Les données topographiques comprennent les courbes de niveau avec des équidistances de 5 m à l'échelle du 1:25 000 et de 10 m au 1:50 000, et les points cotés (fig. coul. 3-3).

Les données relatives à l'occupation du sol comprennent (fig. coul. 3-4) :

a) le réseau hydrographique : les oueds, les sebkhas, les dunes de sable, les limites de côte, les fossés et les aqueducs; en particulier pour la sebkhet er Riana, il y a eu numérisation des trois «anneaux», de l'étang, des îlots, du canal, des fossés et des stations d'épuration de l'Office national d'assainissement (ONAS);

b) la végétation : les bois, les broussailles, les vergers, les vignes et les oliverais;

c) les zones urbaines y compris les routes de bonne viabilité et les voies de chemin de fer.

Les données administratives relatives aux trois gouvernorats de la région (Tunis, Ariana et Ben-Arous) et à toutes leurs délégations, les données géologiques et pédologiques n'ont pas été utilisées dans cette étude.

3 Méthode

3.1 Intégration des données

Il a déjà été mentionné que la base de données géocodées était produite par la numérisation de produits cartographiques à différentes échelles, précisions et origines. Cette numérisation est caractérisée par :

Tableau I. Données numérisées

N°	Fichier	Octets	Nature	Document numérisé
1	GOULET.DIG	1 074 708	Topographie	La Goulette 1:50 000
2	TUNIS.DIG	2 529 549	Topographie	Tunis 1:50 000
3	ARSEC.DIG	889 785	Topographie	Ariana S-E 1:25 000
4	ARNEC.DIG	371 925	Topographie	Ariana N-E 1:25 000
5	MASOC.DIG	402 300	Topographie	La Marsa S-O 1:25 000
6	MANOC.DIG	51 300	Topographie	La Marsa N-O 1:25 000
7	MASOP.DIG	315 252	Occupation du sol	La Marsa S-O 1:25 000
8	MANOP.DIG	42 822	Occupation du sol	La Marsa N-O 1:25 000
9	ARNEP.DIG	119 988	Occupation du sol	Ariana N-E 1:25 000
10	ARSEP.DIG	677 106	Occupation du sol	Ariana S-E 1:25 000
11	TUNIP.DIG	305 024	Occupation du sol	Tunis 1:50 000
12	GEOLCB.DIG	42 624	Géologie	Cap Bon 1:200 000
13	GEOLGL.DIG	126 080	Géologie	La Goulette 1:200 000
14	GEOLBZ.DIG	80 768	Géologie	Bizerte 1:200 000
15	GEOLTN.DIG	52 736	Géologie	Tunis 1:200 000
16	ARGEOL.DIG	200 064	Géologie	Ariana 1:50 000
17	PEDOTN.DIG	145 792	Pédologie	Tunis 1:200 000
18	PEDOBZ.DIG	121 472	Pédologie	Bizerte 1:200 000
19	ADMIN.DIG	29 568	Limites admin.	Découpage administratif au 1:200 000

a) le fait que les données se réfèrent toutes à la même projection cartographique qui est le Lambert Nord Tunisie;

b) le fait que les données se trouvent toutes dans un format vecteur, sous forme de coordonnées X, Y et Z, où Z désigne tantôt l'altitude, tantôt une valeur thématique.

Par conséquent, ces données n'ont pas à être corrigées géométriquement mais ont à être transformées dans un format maillé (ou raster) afin qu'elles puissent être visualisées sous forme d'images.

Les images SPOT, au contraire, devaient subir seulement une correction géométrique afin qu'elles puissent se superposer aux cartes, donc aux données numérisées.

La base de données ainsi constituée comprend 679 lignes, 1000 pixels par ligne et 15 canaux (tableau II).

La démarche globale est présentée à la figure 5.

Le problème d'intégration se produit quand il y a un risque pour qu'il n'y ait pas de juxtaposition spatiale parfaite de la partie image ainsi placée dans la base de données et les polygones cartographiques voisins. La méthode utilisée pour effectuer cette intégration est celle de trouver d'abord la meilleure position convenable du polygone image sur la carte en s'aidant d'une correction géométrique avec un polynôme d'ordre 5, ensuite de le placer dans la base de données. Si nous avons à intégrer en plus des données Landsat MSS ou TM, l'idéal serait de formater les différents ensembles de données approximativement à la même dimension de pixels avant d'effectuer la registration (Chavez et Guptil, 1986).

Tableau II. Base de données images

Désignation	Nombre de canaux
Image SPOT	3
Topographie	1
Occupation du sol	1
Limites administratives	2
Composantes principales	6
Classifications	2

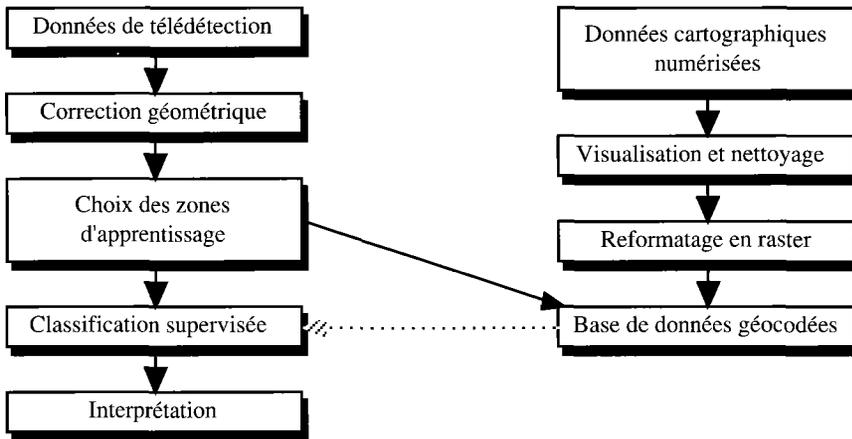


Figure 5. Démarche globale

3.2 Classifications

L'étape suivante a pour but de décrire et d'inventorier les structures hydrographiques à partir de la base de données géocodées. Cela nécessite d'effectuer quelques traitements d'images préalables. D'abord, la présence de données multisources impose leur mélange, ou combinaison, par l'analyse numérique ou visuelle. Dans une étude précédente (Boussema, 1983), nous préconisons l'utilisation des méthodes factorielles afin d'étudier les corrélations entre les différents types de données. Ici, nous nous sommes contentés d'une analyse en composantes principales qui a pour but à la fois de réduire la dimensionalité de l'image et d'améliorer cette dernière. À partir de la visualisation des composantes principales et des données numérisées, des zones d'apprentissage ont été sélectionnées afin de pouvoir effectuer une classification supervisée par la méthode du maximum de vraisemblance. L'interprétation des résultats de cette classification a conduit à l'établissement d'une légende spécifique à l'hydrographie de la région étudiée (fig. coul. 3-6).

3.3 Interprétations

Contrairement à l'utilisation des données multispectrales Landsat seules (Boussema *et al.*, 1988), l'apport des données SPOT-XS et des données numérisées a permis de dégager les constatations principales suivantes.

La flèche autrefois située à l'embouchure de la Médjerda a disparu et sa partie sud a été remblayée par des sédiments. Cette embouchure a subi plusieurs changements constatés par Paskoff (1978) à partir de la carte au 1:50 000 imprimée en 1891 et celle révisée en 1935, et à partir des photographies aériennes prises successivement en 1948, 1962 et 1974. Depuis, il y a eu notre apport à l'aide des images satellitaires Landsat et SPOT. L'image SPOT permet la visualisation d'un grand nombre de détails hydrographiques, parmi lesquels d'anciens méandres. Elle permet aussi la bonne description de la côte et en particulier des plages et des dunes de sable. Elle permet enfin une meilleure description des «anneaux» et des îlots se trouvant dans la sebkhet er Riana ainsi que du canal d'évacuation de la station d'épuration de l'ONAS et de celui reliant la sebkha à la mer.

4 Conclusion

Bien que la région étudiée ne soit pas particulièrement menacée par la sécheresse, il est évident que la méthode présentée pourrait être appliquée dans d'autres cas. Elle a pour mérite de disposer d'une information quantitative et d'une base de données géocodées qui permettraient en particulier de suivre le phénomène de la sécheresse afin de pouvoir mieux le maîtriser. Un autre mérite est que toute la procédure a été réalisée sur un système à base de micro-ordinateur.

5 Remerciements

Mes remerciements s'adressent au professeur Fernand Verger, directeur du laboratoire IMAGEO, à Jean-Marie Dubois du CARTEL et à l'AUPELF-UREF pour m'avoir aidé à réaliser ce travail et à le présenter.

6 Références

- BOUSSEMA, M. R., 1983. Factorial Analysis of Correspondences applied to Landsat Data. —9th International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, USA.
- BOUSSEMA, M. R., 1987. Système d'analyse multidimensionnelle d'images multisources. —Premier colloque maghrébin sur les modèles numériques de l'ingénieur, Alger, 22-24 novembre 1987.
- BOUSSEMA, M. R., B. ROUI et J. L. BALLAIS, 1988. Analyse par télédétection de l'hydrographie de la région de Tunis (Tunisie). —Photo-interprétation, n° 88-6, p. 11-18.
- CHAVEZ, P. S. et S. C. GUPTIL, 1986. Satellite Image Mapping, Achievement and Prospects. — Séminaire Euro-Carto V, Paris.
- PASKOFF, R., 1978. Évolution de l'embouchure de la Médjerda (Tunisie). —Photo-interprétation, n° 78-5, p. 23-31.

4

L'approche du Centre de recherches pour le développement international dans la lutte contre la désertification en Afrique et l'apport de son programme en cartographie et télédétection

ALIOUNE B. CAMARA*, GILLES CLICHE** et ROBERT VALANTIN**

*CRDI, B. P. 11 007, CD Annexe, Dakar, Sénégal

**CRDI, B. P. 8 500, Ottawa, Ontario, Canada K1G 3H9

Résumé

La dégradation de l'environnement et ses nombreuses implications sociales constituent un des axes prioritaires des projets financés par les différentes divisions du Centre de recherches pour le développement international (CRDI) en Afrique sahélo-saharienne. Dans le souci d'une approche intégrée et plus efficiente de ces actions, le Bureau régional pour l'Afrique centrale et occidentale du CRDI (BRACO) travaille à la mise en oeuvre d'un programme multidisciplinaire. Ce programme vise à encourager une recherche participative répondant aux besoins de populations cibles bien identifiées et circonscrite dans des localités représentatives des trois zones sahélo-saharienne, sahélo-soudanienne et soudanienne. Cet article présente l'expérience propre du CRDI ainsi que le plan d'action envisagé pour la mise en oeuvre du programme régional sur la désertification en fonction des apports respectifs de ses différentes divisions. La participation et les activités de sa Division des sciences de l'information et, en particulier, celles de son programme en cartographie et télédétection sont décrites dans une deuxième partie.

1 Introduction

Les conséquences des années successives de sécheresse qui ont frappé de nombreux pays africains particulièrement au Sahel ainsi que la dégradation continue de l'environnement et les répercussions des activités humaines sur les ressources naturelles de ces pays ont constitué, au cours de ces deux dernières décennies, une part importante des préoccupations de recherche présentes dans de nombreux projets auxquels le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) a apporté sa contribution financière et technique dans cette région de l'Afrique de l'Ouest.

Créé en 1970 par le Parlement canadien en réponse à la prise de conscience de l'absence de capacités scientifiques nationales dans la majorité des pays en développement et au besoin aigu d'application des sciences et de la technologie aux problèmes de développement particuliers de ces pays, le CRDI a pour mandat d'appuyer et de stimuler la recherche entreprise par ces pays pour leur bénéfice propre (CRDI, 1989). Les domaines d'application de l'assistance du CRDI sont regroupés en sept grandes catégories représentées chacune par une division de programme : sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition; sciences de la santé; sciences de l'information; sciences sociales; sciences de la Terre et du génie; bourses et communications. En plus de son siège social établi à Ottawa, au Canada, le CRDI compte six bureaux régionaux répartis entre l'Afrique, l'Amérique Latine et l'Asie. En Afrique, les bureaux sont situés respectivement à Dakar pour les pays d'Afrique occidentale et centrale, à Nairobi pour ceux d'Afrique orientale et australe, et au Caire pour l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient.

Les bureaux régionaux jouent un rôle essentiel dans le processus de planification et de programmation du CRDI dans la mesure où ils élaborent les stratégies devant aider à déterminer les programmes du CRDI dans ces régions. Ainsi, ces bureaux sont encouragés à développer des programmes régionaux permettant une approche cohérente à la solution des problèmes communs à une région géographique ou à un aspect particulier du développement. C'est dans ce cadre que le Bureau régional pour l'Afrique centrale et occidentale (BRACO) a pris l'initiative de promouvoir un programme interdivisionnel sur la désertification au Sahel qui appuiera des projets de recherche à être exécutés par des structures nationales et régionales, gouvernementales ou non gouvernementales, actives dans la lutte contre ce phénomène dans le Sahel.

La première partie de notre communication explique l'approche proposée dans ce programme régional au regard des expériences passées en matière de gestion de ressources naturelles au Sahel. Elle sera complétée par une deuxième partie portant sur la participation et les activités de la Division des sciences de l'information et, en particulier, celles de son programme en cartographie et télédétection.

2 Le programme régional du CRDI sur la désertification au Sahel

2.1 Bref aperçu sur la désertification au Sahel

Depuis deux décennies, le Sahel a connu des calamités naturelles qui ont mis en péril à plusieurs reprises son potentiel de développement. Présentement, les pays de la région se trouvent confrontés à des déficits alimentaires quasi chroniques. Les systèmes traditionnels de production alimentaire, ayant évolué avec le temps, se prêtent bien aux caractéristiques physiques et aux ressources limitées de la région mais ils ne sont plus adaptés à la croissance

rapide des populations et à la détérioration de l'environnement. Dans moins de 60 ans (en l'an 2050), au rythme actuel de croissance, la population de la région aura quadruplé pour atteindre 136 millions d'habitants (FAO, 1985).

Les perturbations climatiques enregistrées au Sahel au cours de ces deux décennies et leurs répercussions sur l'environnement perceptibles à travers le processus continu de désertification ne constituent pas une nouveauté dans la longue histoire de cette région. De nombreux rapports des administrateurs coloniaux décrivent avec force détails le processus de dégradation de l'environnement intervenu au début du siècle, notamment lors de la sévère période de sécheresse en 1910-1918 (Freudenberger, 1989a).

Ces situations apparues au Sahel ont particulièrement retenu l'attention des spécialistes qui ont consacré une documentation abondante à la désertification dont on trouve de remarquables synthèses (Kotschi *et al.*, 1986; United Nations, 1977).

La désertification peut être définie comme un «processus de dégradation de l'environnement à l'intérieur et autour des terres arides, résultant soit d'activités humaines, de variations climatiques, ou d'une combinaison des deux» (Glantz, 1980). Par Sahel, nous entendons ici la région géographique comprise entre les isohyètes 200 et 600 mm de pluie. Cette définition large de la région du Sahel recouvre plusieurs situations climatiques si l'on considère les définitions plus précises des zones saharienne (100 à 200 mm), sahélo-saharienne (200 à 300 mm), sahélienne au sens strict (300 à 500 mm) et sahélo-soudanienne (500 à 800 mm) (Freudenberger, 1989a).

2.2 Les expériences de lutte contre la désertification au Sahel et les leçons à tirer pour le programme régional du CRDI

Depuis la période coloniale, les autorités ont été amenées à conduire des actions de lutte contre la désertification au Sahel. Les pratiques contemporaines tirent pour une large part leur origine de cette période coloniale en ce sens qu'il y a une remarquable continuité dans les approches passées et celles en cours (Freudenberger, 1989a). Cette continuité se retrouve dans le fait que les actions entreprises ont été conçues par les gouvernements et ont rarement impliqué les populations rurales. Aussi, celles-ci ont-elles rarement appliqué les techniques dont certaines leur étaient imposées durant la période coloniale. Un observateur notait déjà que «toutes les initiatives ne pourront porter véritablement leurs fruits qu'avec l'adhésion de la masse paysanne, ce qui pose le problème de son éducation» (Pehaut, 1961).

Au vu des résultats et des expériences antérieures, la leçon majeure à tirer est que les actions de lutte contre la désertification ne doivent pas être isolées, et que les quelques succès obtenus l'ont été grâce à la collaboration entre des agents extérieurs et les populations locales (Freudenberger, 1989a). L'aspect humain de l'introduction et de l'adoption des technologies est également un point crucial car il a des dimensions économiques, institutionnelles et politiques souvent négligées (Energy/Development International, 1988).

Actuellement, les stratégies antérieures sont largement dépassées. L'État n'est plus l'acteur central dans l'implantation des programmes et projets pour répondre à la dégradation de l'environnement du Sahel (Freudenberger, 1989a). D'autres acteurs (organisations non gouvernementales, associations villageoises) ont également un rôle important à jouer. Des organismes comme le Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) considèrent aujourd'hui que «l'engagement volontaire et total des populations est l'axe central autour duquel doit s'organiser la lutte contre la désertification» (Bonfils, 1987).

Les leçons tirées des échecs du passé et de succès limités doivent servir pour les actions futures (Freudenberger, 1989a). Ces expériences ont été prises en compte dans l'approche proposée dans ce programme du CRDI.

2.3 L'approche proposée dans le programme régional du CRDI

Au cours de près de deux décennies d'intervention dans le Sahel, le CRDI a collaboré avec différentes institutions nationales, régionales et internationales dans des programmes de recherche, de formation, ou d'information orientés vers la solution des problèmes posés par la désertification au Sahel dans leurs dimensions sociales ou écologiques.

Ainsi, plus de 9,8 millions de dollars canadiens ont été consacrés à des projets relatifs à la réhabilitation de l'environnement et à la production agricole dans les régions semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, ce qui correspond à un pourcentage d'au moins 65% des fonds alloués par le CRDI aux projets de recherche dans les pays sahéliens suivants : Burkina Faso, Cap Vert, Gambie, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad (Freudenberger, 1989a). D'autres fonds non moins importants ont été consacrés aux recherches socio-économiques avec des projets sur les migrations et études de la population en général, sur les politiques de santé publique ou sur l'évaluation de la situation nutritionnelle dans les régions semi-arides.

L'adoption d'un programme régional sur la désertification au Sahel ne constitue donc pas pour le CRDI une nouvelle orientation, mais plutôt la concrétisation de l'importance accordée aux problèmes de dégradation de l'environnement au Sahel. Elle devrait se traduire par une plus grande intégration des activités pluridisciplinaires, qui tiennent compte à la fois des dimensions sociales et écologiques de la désertification dans cette région. Dans ce contexte, une attention plus grande devrait être accordée au contexte social qui détermine l'adoption ou le rejet technologique par les populations rurales et urbaines (Freudenberger, 1989a).

Ce programme régional devrait permettre l'introduction de la recherche-action par un processus de forte participation populaire dans la planification, la gestion et l'implantation de la recherche sur les problèmes spécifiques de développement. Cette approche devrait se concrétiser par le choix de zones précises de concentration et de groupes cibles bien identifiés.

Les lignes directrices adoptées par le CRDI pour le développement et l'implantation de ce programme régional mettent l'accent sur :

- la compréhension du phénomène de la désertification, ses causes et ses conséquences, en portant une plus grande attention au contexte social;
- l'identification des options politiques gouvernementales de nature à faciliter les réponses au niveau local à la problématique de la désertification;
- la promotion à travers les organisations de recherche gouvernementales et académiques de technologies qui répondent mieux aux besoins des populations rurales et urbaines; et
- le développement des capacités de recherche des organisations non-gouvernementales actives dans le développement urbain et rural.

Comme indiqué ci-dessus, l'approche proposée dans le futur programme régional vise à promouvoir un modèle de recherche appliquée interdisciplinaire sur la désertification dans des localités spécifiques à savoir des micro-territoires situés dans les zones biogéographiques du Sahel suivantes : saharo-sahélienne, sahélo-soudanienne et soudanienne. Le choix de ces trois zones permet de prendre en compte des niveaux différents de changement environnemental et de mieux comprendre, au-delà de certains traits communs à ces zones, la variété des comportements et des systèmes développés par les populations en fonction des particularités des zones considérées (Freudenberger, 1989b).

Cette approche de concentration sur des micro-territoires correspond à une pratique aujourd'hui courante au Sahel où l'accent est davantage mis sur la promotion des initiatives de développement rural dans des micro-régions socio-écologiques bien définies (Bonfils, 1987; Chaumié, 1985). Un organisme régional comme le Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) préconise de plus en plus une telle approche dans ses programmes à travers des projets visant à favoriser une plus grande collaboration avec

les populations rurales en vue de mieux identifier les besoins de développement et de planifier les actions d'accompagnement (CILSS/Club du Sahel, 1984).

C'est sur la base des lignes directrices décrites ci-dessus que les différentes divisions du CRDI vont collaborer avec les institutions de la région dans l'implantation de ce programme régional. Compte tenu de l'importance que revêt la compréhension du phénomène de la désertification dans ce programme, il est prévu d'accorder une large place à la collecte et à la manipulation des données et d'informations à référence spatiale sur les micro-territoires identifiés dans les différentes zones biogéographiques du Sahel. C'est dans ce cadre qu'interviendra le programme de cartographie et de télédétection de la Division des sciences de l'information.

3 La Division des sciences de l'information et son programme de cartographie et télédétection

Dès sa création en 1970, le CRDI a souligné l'importance des sciences de l'information dans le cadre de ses activités d'appui à la recherche scientifique et technique par les pays en développement.

Outre la mise sur pied par sa Division des sciences de l'information de programmes sur les services et systèmes d'information pour les secteurs socio-économique et scientifique et technique, sur la conception et la diffusion d'un progiciel de gestion de bases de données (MINISIS) et sur le fonctionnement de la bibliothèque du CRDI, cette division opère un programme pour appuyer la recherche et l'expérimentation avec des technologies, des outils et des méthodes d'information différents dans les domaines de l'informatique, de la télématique et de la cartographie et la télédétection. Ce dernier programme, récemment rebaptisé «programme en géomatique», a pour but d'aider les pays en développement à acquérir, gérer, adapter, mettre au point et expérimenter des outils et des méthodes appropriés de manipulation de données et d'informations à référence spatiale. Il s'intéresse plus particulièrement au renforcement de capacités locales de recherche en géomatique par l'appui à des projets visant la maîtrise et le développement d'applications originales à partir de techniques de télédétection, de cartographie automatisée et de système d'information géographique sur des thèmes prioritaires de développement.

Le programme en géomatique a connu une évolution qui s'efforce de suivre, d'une part, les tendances des développements en cartographie et en télédétection et, d'autre part, les efforts de concentration sur des thèmes particuliers d'applications définis par les bureaux régionaux du CRDI, dont le BRACO. Ainsi, de ses activités initiales sur la cartographie thématique traditionnelle, le programme se concentre de plus en plus sur l'appui à des travaux de recherche appliquée en télédétection et système d'information géographique reliée, en Afrique, au thème de la désertification. De concert avec la stratégie mise en oeuvre au BRACO, l'intérêt principal du programme portera sur une participation à des projets multidisciplinaires définis par des institutions locales et faisant appel à une collaboration interdivisionnelle au CRDI. De ces projets devraient émaner des activités visant à généraliser et à regrouper des expériences avec des méthodes et des outils de géomatique de manière que les institutions et pays récipiendaires de notre aide puissent décider de façon plus éclairée si ces techniques peuvent répondre à leurs besoins et, par conséquent, utiliser le mieux possible les maigres ressources à leur disposition.

En Afrique, bien que des efforts se poursuivent pour que plusieurs pays se dotent d'infrastructure adéquate pour utiliser pleinement le potentiel de la géomatique pour leurs

développements, peu d'institutions locales sont habilitées pour entreprendre des travaux de recherche en télédétection et système d'information géographique. Le CRDI n'est pas et ne sera probablement jamais amené à devenir une source de financement importante pour améliorer, de façon significative, l'infrastructure en télédétection d'un pays. Ses moyens financiers et son mandat ne se prêtent pas à de telles entreprises. Ainsi, d'ici à ce que des structures nationales soient solidement en place, le programme en géomatique poursuivra vraisemblablement un appui à des projets exécutés conjointement par des institutions locales et canadiennes. Ce mécanisme d'exécution de projet s'est révélé très dynamique pour le programme en géomatique en Afrique du Nord et de l'Ouest. Il est souhaité que ce mécanisme évoluera vers la collaboration entre institutions de pays voisins à mesure que des structures nationales émergent. Le CRDI se veut un promoteur de la coopération de type Sud-Sud. La modalité de financement privilégiée par le CRDI demeure l'appui à des projets entièrement exécutés par une ou des institutions de pays en développement.

4 Quelques faits saillants du programme en géomatique en Afrique

Les participants aux Deuxièmes journées scientifiques du réseau thématique de télédétection de l'UREF ont eu l'occasion de se familiariser avec deux projets financés par le programme au Mali et au Maroc. Dans un premier cas, le CRDI apporte un financement à la Direction du génie rural du Mali pour qu'elle exécute, conjointement avec l'Université Laval au Québec (Canada), un projet visant à évaluer la performance d'images SPOT, Landsat-TM et NOAA pour le suivi de l'étalement du fleuve Niger afin d'éventuellement identifier des sites où des aménagements hydro-agricoles pourraient être implantés. Au Maroc, un projet exécuté par l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II de Rabat et le CARTEL de l'Université de Sherbrooke au Québec (Canada) concerne le choix et la calibration de méthodes de télédétection utilisant des données Landsat-TM pour la cartographie pédologique en milieu semi-aride. Ce projet devrait évoluer vers des applications de la télédétection et d'éléments de système d'information géographique dans le domaine de la conservation des sols.

Récemment, le programme en géomatique s'est joint à la Division des sciences de la Terre et du génie du CRDI pour le financement d'un projet de recherche exécuté par l'Université nationale de Côte d'Ivoire à Abidjan et le CARTEL de l'Université de Sherbrooke. Ce projet a pour objectif principal l'évaluation des ressources en eau potable des aquifères discontinus du socle cristallin du bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire. En plus de l'utilisation des méthodes classiques d'investigation géologique et hydrogéologique, les techniques de recherche envisagées seront enrichies par l'utilisation de données Landsat-TM et le montage d'une base de données à référence spatiale dans un système d'information géographique. Ce système devrait faciliter la manipulation et l'analyse des données et la présentation des résultats de la recherche.

Un important programme de formation et des éléments de transfert de technologie en télédétection et système d'information géographique sont inclus dans le cadre du projet. En plus des applications pratiques qui découleront du projet en Côte d'Ivoire, sa méthodologie devrait offrir des possibilités d'applications pour d'autres recherches hydrogéologiques dans toute la région du socle cristallin de l'Ouest africain.

Au Nigéria, pour donner suite à un premier projet en télédétection sur la cartographie des ressources du bassin de la Sokoto-Rima (Cliche et Valantin, 1988), les universités de Lagos (Nigéria) et Waterloo (Canada) ont entrepris de poursuivre leur coopération dans la veine des efforts du gouvernement nigérian en ce qui a trait au développement rural intégré. Leur

nouveau projet, financé par le programme en géomatique, se veut très innovateur puisqu'il cherche à générer une méthode pour la production de cartes de capacité au sol à grande échelle à partir de données SPOT, d'informations sur la connaissance locale des paysans et leur perception de l'environnement et de ses problèmes, et sur des mécanismes institutionnels locaux de gestion de l'eau et des terres. Une analyse de ces éléments s'effectuera à l'aide d'un système d'information géographique qui sera également l'outil central du projet pour la production des cartes et résultats finaux. En plus d'une assistance directe au gouvernement local de Sokoto où le projet se déroule, les chercheurs démontreront l'efficacité de leur méthodologie basée sur la géomatique comme point de départ pour assembler une information pertinente en vue de futurs projets intégrés de développement rural. La mise sur pied d'une telle entreprise fait suite à des travaux et des expériences de recherche menés pendant plus de quatre ans par les partenaires du projet dans l'État de Sokoto au Nigéria.

5 Conclusion

Cet aperçu du développement par le BRACO d'une stratégie d'intervention pour stimuler la recherche et la quête de solutions aux problèmes de désertification en Afrique montre jusqu'à quel point le CRDI planifie sa participation aux processus de développement des pays les moins nantis. Cette définition d'un thème de concentration par le CRDI ne remplace cependant en rien la nécessité qu'ont les chercheurs et institutions locales de définir leurs propres priorités et intérêts de recherche. C'est en réponse à des demandes spécifiques de ces institutions que le CRDI intervient par l'entremise d'un financement à des projets de recherche. Certes, la concentration sur un ou des thèmes spécifiques augmente notre habilité à mieux coordonner nos activités et ainsi leur assurer un impact accru. De par sa nature et sa complexité, le thème de la désertification en Afrique requiert des efforts de spécialistes de domaines les plus variés et les plus complémentaires les uns des autres. Ceux du domaine de la géomatique y ont un rôle évident à jouer et le CRDI continuera à stimuler leur pleine participation par un appui à des projets de recherche sur les différentes facettes de ses applications.

6 Références

- BONFILS, M., 1987. Halte à la désertification. —Éditions Karthala, Paris.
- CHAUMIÉ, I., 1985. La gestion de l'environnement dans un pays sahélien. —Les Cahiers de la Recherche-Développement, n° 8, p. 17-24.
- CLICHE, G. et R. VALANTIN, 1988. Remote Sensing Research for Development at IDRC. — Proceedings of the 22nd International Symposium on Remote Sensing of the Environment, ERIM, Abidjan, 20-26 October 1988, p. 369-375.
- CILSS/CLUB DU SAHEL, 1984. Summary report of the regional seminar on Desertification. — Nouakchott, 29 October - 4 November, Sahel CR (85).
- CRDI, 1989. Documentation sur le Centre de recherches pour le développement international. —CRDI, Ottawa.
- ENERGY/DEVELOPMENT INTERNATIONAL, 1988. Opportunities for sustained development : successfull natural ressources management for the Sahel. —USAID, Washington.

- FAO, 1985. Rapport d'une mission de formulation du programme quinquennal de l'Institut du Sahel. —FAO, Rome.
- FREUDENBERGER, M. S., 1989a. Part I : State-of-the-art on desertification. Part II : Plan of action for West Africa Regional Office thrust on desertification. —IDRC/WARO, Dakar.
- FREUDENBERGER, M. S., 1989b. Summary of concept paper : Interdivisional project in the three biogeographical zones. —IDRC/WARO, Dakar.
- GLANTZ, M., 1980. Man, State and the Environment : an inquiry into whether solutions to desertification in the West African Sahel are known but not applied. —Canadian Journal of Development Studies, 19, p. 75-97.
- KOTSCHI, J. *et al.*, 1986. Towards control of desertification in african drylands. —West Germany : sanderpublikation, CEC, BMZ, GTZ, n° 168.
- PEHAUT, Y., 1961. L'arachide au Sénégal. —Les Cahiers d'Outre-Mer, n° 53, p. 5-25.
- UNITED NATIONS, 1977. Secretariat of the Conference on Desertification, Desertification : its causes and consequences. —Pergamon Press, New York.

5

Estimation de l'évaporation sur sol nu à partir de mesures hyperfréquences

ANDRÉ CHANZY et LAURENT BRUCKLER

Institut national de la recherche agronomique, Station de science du sol, Domaine St-Paul, B. P. 91, 84140 Montfavet, France

Résumé

Nous avons étudié un modèle simple d'estimation de l'évaporation dont les données d'entrée sont l'humidité volumique moyenne de la couche 0-5 cm (θ_s) et la contrainte évaporative : évaporation/évaporation potentielle = $f(\theta_s)$.

Pour déterminer la forme analytique du modèle, nous avons exploité des jeux de données expérimentaux obtenus *in situ* sur des sols argileux, argilo-limoneux et limono-sableux et nous avons généré des jeux de données supplémentaires avec un modèle mécaniste de transfert couplé d'eau et de chaleur nous permettant ainsi d'élargir notre étude à des séquences climatiques et à des profils hydriques initiaux différents. Le modèle est sensible à la nature du sol et en particulier à sa texture. Sur la parcelle argilo-limoneuse, nous avons effectué, simultanément aux mesures *in situ*, des mesures des coefficients de rétrodiffusion des hyperfréquences (σ_0). Après avoir établi la relation $\theta_s = f(\sigma_0)$, nous avons introduit les estimations de teneur en eau obtenues par télédétection comme donnée d'entrée du modèle d'estimation de l'évaporation. Une analyse de sensibilité aux erreurs de mesure sur θ_s a été faite afin d'évaluer les performances d'une telle approche.

1 Introduction

Depuis une décennie environ, les recherches sur l'intérêt de la télédétection hyperfréquences pour le suivi des surfaces agricoles se sont considérablement développées (Ulaby *et al.*, 1978

et 1979; Prévot *et al.*, 1984; Jackson et Schmutge, 1989; Le Toan et Pausader, 1981) et ceci est lié à deux types de raisons : d'une part, sur le plan technologique, les systèmes de mesures hyperfréquences sont des systèmes «tous temps» qui restent opérationnels même en présence d'une couverture nuageuse. D'autre part, les mesures hyperfréquences permettent d'accéder à des variables agronomiques tout à fait pertinentes, qu'il s'agisse de caractéristiques de la biomasse (cas des sols couverts), ou de la teneur en eau de surface (cas des sols nus).

Dans le cas des sols nus, la connaissance de l'humidité de surface des premiers centimètres du sol peut avoir un intérêt direct pour estimer la trafficabilité d'une parcelle agricole par exemple. Mais on peut aussi chercher à savoir dans quelle mesure la connaissance de cette variable d'état (humidité du sol) permet d'accéder à l'estimation des flux de surface, en particulier l'évaporation qui est l'un des termes essentiels et difficile à connaître du bilan hydrique. Une telle information, régulièrement acquise, apparaît être particulièrement intéressante lorsqu'on veut suivre la saison des pluies en milieu tropical ou sub-tropical sur des zones peu couvertes par un réseau d'observations au sol. Pour atteindre cet objectif, deux approches sont alors possibles.

La première consiste à utiliser les estimations de teneur en eau de surface provenant de mesures hyperfréquences comme des conditions aux limites à la surface du sol dans des modèles de transferts sol-atmosphère. Cette approche est réalisable mais en général peu opérationnelle (Witono et Bruckler, 1990). En effet, les modèles de transferts hydriques sol-atmosphère, lorsqu'ils ont une base physique mécaniste, nécessitent souvent la connaissance préliminaire de nombreux paramètres.

La seconde consiste à tenir compte du fait que l'évaporation d'un sol nu est en grande partie régulée par la teneur en eau des couches de surface. Lorsque le sol s'assèche, ces couches forment un écran qui limite l'évaporation (phénomène couramment appelé effet mulch). Un certain nombre d'auteurs (Perrier, 1975; Menenti, 1984) introduisent dans leur modélisation du bilan d'énergie de l'interface sol-atmosphère un terme de résistance du sol pour caractériser cette limitation de l'évaporation. La teneur en eau des premiers centimètres apparaît donc comme une variable particulièrement importante pour l'évaporation d'un sol nu. Il semble donc intéressant d'utiliser directement les teneurs en eau de surface comme des estimateurs de l'évaporation au moyen de modèles plus ou moins simplifiés mais reliant directement un état de surface (teneur en eau) et une demande climatique à un flux.

Ce travail se propose de présenter cette deuxième approche. Nous présenterons la mise au point théorique et expérimentale d'un modèle simplifié de la forme :

$$ETR_j/ETP_j = f(\theta_s) \quad (\text{équation 1})$$

(ETR_j : évaporation réelle journalière, ETP_j : évaporation potentielle journalière) et l'étude de ses performances lorsqu'il est couplé avec des mesures de θ_s obtenues par télédétection hyperfréquences.

2 Matériels et méthodes

2.1 Description des mesures hyperfréquences

Les mesures hyperfréquences ont été effectuées sur un sol limono-argileux par le radar multifréquences et multipolarisations RAMSES IV conçu par le CNES (Centre national d'études spatiales). Le radar était fixé sur une platine couplée au chariot d'une grue de 20 m

de haut. Les surfaces accessibles à la mesure d'un tel dispositif sont de l'ordre de quelques dizaines de mètres carrés.

Plusieurs types de configurations de mesure (fréquence, incidence, polarisation) ont été testés. Nous avons retenu la configuration qui se rapproche le plus des mesures que pourra fournir le futur satellite radar ERS-1 (5,3 GHz, polarisation VV, incidence 23°). Cette configuration est proche de celle optimale pour la mesure de l'humidité (Ulaby *et al.*, 1978).

La confrontation des mesures radar (section efficace de rétrodiffusion, σ_0) et des mesures d'humidité volumique moyenne sur la couche 0-5 cm (θ_s) obtenues au sol fait apparaître une relation linéaire entre ces deux grandeurs (fig. 1). Le radar présente une forte sensibilité à θ_s et le coefficient de corrélation r^2 de la droite de régression $\theta_s = f(\sigma_0)$ est égal à 0,97. Le calcul de l'intervalle de confiance à 95% sur l'estimation de θ_s donne la précision de la mesure de l'humidité volumique égale à $\pm 0,035 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

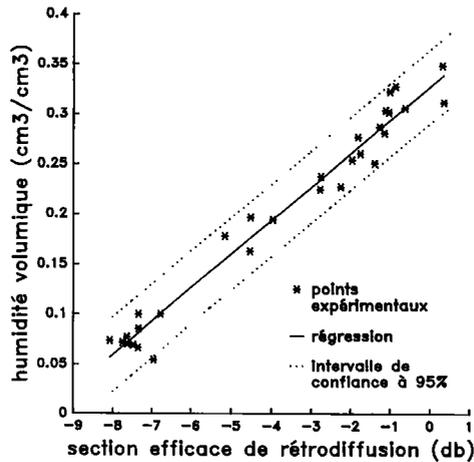


Figure 1. Relation section efficace de rétrodiffusion, humidité volumique de surface moyenne sur la couche 0-5 cm mesurée *in situ*

2.2 Obtention des jeux de données pour la mise au point du modèle simplifié

Pour pouvoir mettre au point le modèle simplifié (équation 1), nous devons obtenir des jeux de données contenant toutes les variables soit ETR_j , ETP_j et θ_s . Nous pouvons accéder à ces grandeurs expérimentalement mais la lourdeur des manipulations que cela nécessite ne nous limiterait qu'à un nombre très réduit de situations. Par conséquent, nous avons choisi de travailler en trois phases :

- une phase expérimentale destinée à fournir des données pour caler un modèle mécaniste de transfert couplé d'eau et de chaleur;
- une phase de génération de données en utilisant le modèle précédemment calé;
- une phase de validation avec un jeu de données expérimental indépendant des précédents.

2.2.1 Obtention des jeux de données de référence *in situ*

Des expérimentations ont été conduites durant vingt jours environ sur trois types de sols variant essentiellement par leur teneur en argile (sol argileux, limon argileux, limon sableux) durant la période allant de juillet à septembre 1988 à Montfavet (France). Pour chaque type de sol, nous avons mesuré les bilans hydriques journaliers par mesures neutroniques et

tensiométriques, l'évolution au cours du temps de l'humidité des premiers centimètres de sol par mesures gravimétriques et des profils de température. Sur l'un des sols (limon argileux), nous avons mesuré le coefficient de rétrodiffusion radar sur une parcelle de 0,1 ha.

Les trois jeux de données obtenus, correspondant aux trois types de sol, ont été utilisés pour le calage d'un modèle mécaniste de transferts couplés d'eau et de chaleur entre le sol et l'atmosphère, en prenant simultanément en compte les transferts en phase liquide et en phase gazeuse (Passerat de Silans *et al.*, 1989). Le calage porte uniquement sur la conductivité hydraulique en milieu non saturé, grandeur très difficilement accessible par la mesure.

Le modèle de transfert couplé d'eau et de chaleur a été calé sur une période de cinq jours puis ensuite validé sur les quinze jours restants.

2.2.2 Génération de données pour la mise au point de modèles simplifiés

Pour chaque type de sol, nous avons simulé, en utilisant le modèle mécaniste préalablement calé et validé (*cf.* 2.2.1), l'évolution complète du bilan hydrique et du bilan d'énergie ainsi que l'évolution des teneurs en eau et des températures dans 60 situations de quinze jours (3 sols, 4 situations initiales d'humidité du sol, 5 climats). Pour chaque situation, le modèle nous donne :

- l'évolution du bilan hydrique (évaporation, variations de stocks, flux en profondeur);
- l'évolution du bilan énergétique (rayonnement net, flux de chaleur sensible et latente, flux de chaleur dans le sol, évaporation potentielle);
- l'évolution des caractéristiques d'état du sol (humidités volumique et massique, potentiels matriciel et total, température);
- l'évolution des caractéristiques climatiques élémentaires (vitesse du vent, température de l'air, pression partielle de vapeur d'eau de l'air).

2.2.3 Validation des modèles simplifiés

Pour tester et valider les modèles simplifiés mis au point dans la partie précédente, une expérimentation spécifique a été réalisée en 1989 sur l'un des types de sol (limon argileux). Sur une parcelle expérimentale de 0,1 ha, et sur une période de quelques jours, nous avons mesuré le bilan hydrique journalier par suivi tensiométrique et neutronique, ainsi que les humidités de surface dans les premiers centimètres du sol et le coefficient de rétrodiffusion hyperfréquences.

3 Résultats

3.1 Qualité du modèle mécaniste générateur de données

Les performances du calage du modèle mécaniste ont été évaluées en comparant les humidités volumiques estimées à différents niveaux et celles obtenues expérimentalement. Nous avons porté dans le tableau I les caractéristiques des droites de régression reliant les valeurs d'humidité expérimentales aux valeurs calculées par le modèle. Pour les trois sols, nous obtenons des pentes comprises entre 0,91 et 0,94. Cela s'explique par un léger biais systématique sur l'estimation de l'humidité à certaines profondeurs. Toutefois, pour chacun des sols, nous n'observons aucune dérive du modèle qui restitue bien la dynamique d'évolution de l'humidité à chaque profondeur (*fig.* 2). Nous estimons, à travers ces résultats, que les valeurs fournies par le modèle mécaniste sont satisfaisantes, ce qui nous permet de

Tableau I. Caractéristiques de la régression entre les valeurs d'humidité calculées par le modèle mécaniste et observées

Sol	Pente	Ordonnée à l'origine	r^2
Limon sableux	0,91	0,013	0,92
Limon argileux	0,94	0,014	0,97
Argile	0,92	0,018	0,97

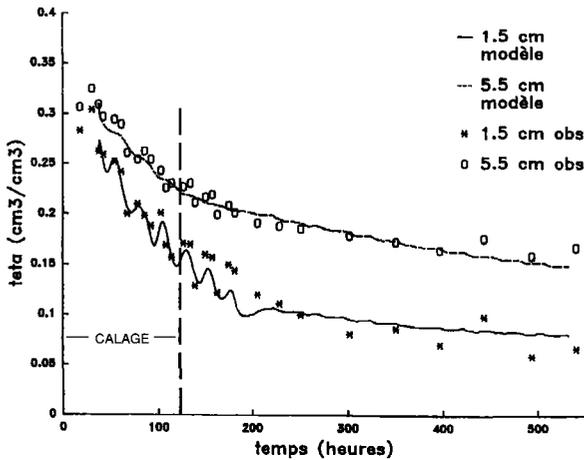


Figure 2. Comparaisons de l'évolution de l'humidité volumique à 1,5 cm et 5,5 cm de profondeur obtenu sur sol limono-argileux

l'utiliser comme générateur de données pour une étude plus systématique du modèle simplifié (équation 1).

3.2 Étude du modèle simplifié

Le modèle mécaniste nous fournit les valeurs d'ETR_j et θ_s . L'ETP_j a été calculée par la formule de Penman en prenant le rayonnement net, le flux de chaleur dans le sol et les coefficients d'échange des flux de chaleur latente et sensible égaux à ceux utilisés pour le calcul de l'ETR_j. Nous avons préféré ce calcul de l'évaporation potentielle à celui de l'évaporation d'une surface de référence saturée (aussi appelée ETP_{0j}). Ce dernier calcul nécessite en effet de faire un certain nombre d'hypothèses sur le flux de chaleur dans le sol qui peut fortement influencer les calculs d'évaporation, surtout pour les faibles demandes climatiques.

Nous avons représenté sur les figures 3, 4 et 5 les rapports journaliers ETR_j/ETP_j obtenus pour chaque sol en fonction de l'humidité moyenne de la couche de surface 0-5 cm θ_s au midi solaire.

On constate que les nuages de points correspondant à chaque sols se distinguent les uns des autres. Les sols peu argileux, fortement conducteurs pour les transferts d'eau, satisfont la demande climatique jusqu'à des valeurs de θ_s relativement faibles (0,1-0,15 cm³/cm³). Par contre, pour les sols argileux, faiblement conducteurs, on a une nette limitation de l'évaporation par rapport à la demande climatique en dessous de 0,25 cm³/cm³.

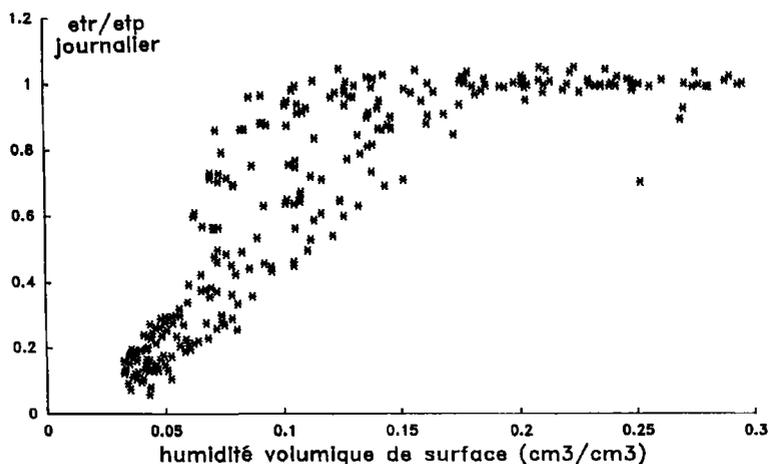


Figure 3. ETR/ETP_j en fonction de l'humidité moyenne de la couche 0-5 cm d'un sol limono-sableux

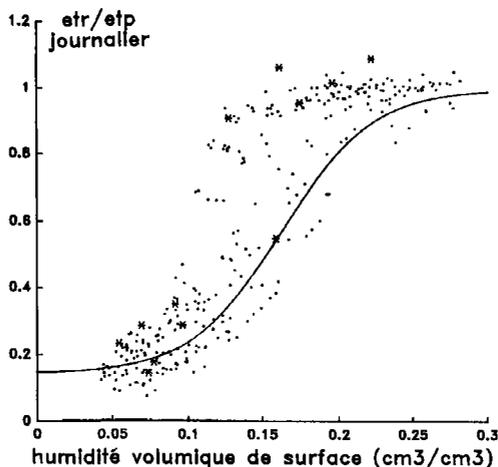


Figure 4. ETR/ETP_j en fonction de l'humidité moyenne de la couche 0-5 cm d'un sol limono-argileux (· points générés par le modèle mécaniste, * points expérimentaux, — modèle)

La dispersion des nuages est d'autant plus forte que le taux d'argile est important. La forme des nuages nous suggère d'ajuster le modèle simplifié $ETR_j/ETP_j = f(\theta)$ à une courbe logistique. Nous proposons donc la forme suivante :

$$\frac{ETR_j}{ETP_j} = \frac{\exp(a \cdot \theta_s + b)}{1 + \exp(a \cdot \theta_s + b)} \cdot c + (1 - c) \quad (\text{équation 2})$$

Les coefficients a , b et c ont été ajustés par la méthode du maximum de vraisemblance pour chacun des sols (tableau II) en minimisant les écarts sur l' ETR_j .

Si on analyse de plus près la répartition des points dans les nuages de chaque sol, on remarque qu'un classement se fait en fonction de la demande évaporative (fig. 6). Pour une

Tableau II. Valeurs des paramètres a , b , c du modèle simplifié (équation 2)

Sol	a	b	c
Limon sableux	30,35	-2,918	0,990
Limon argileux	33,36	-5,439	0,855
Argile	29,35	-7,270	0,920

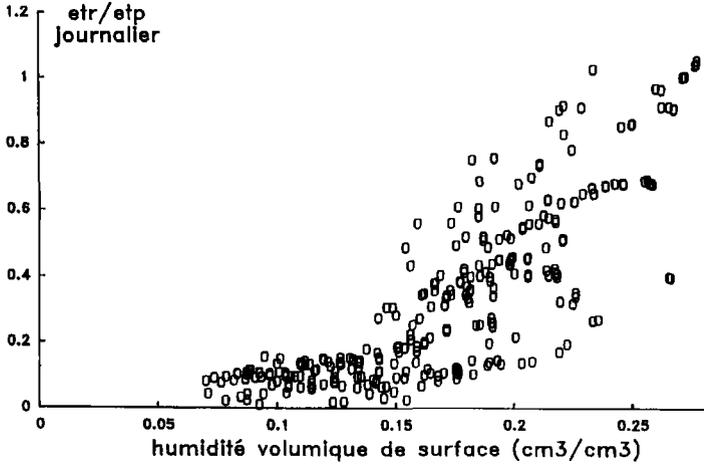


Figure 5. ETR_j/ETP_j en fonction de l'humidité moyenne de la couche 0-5 cm d'un sol argileux

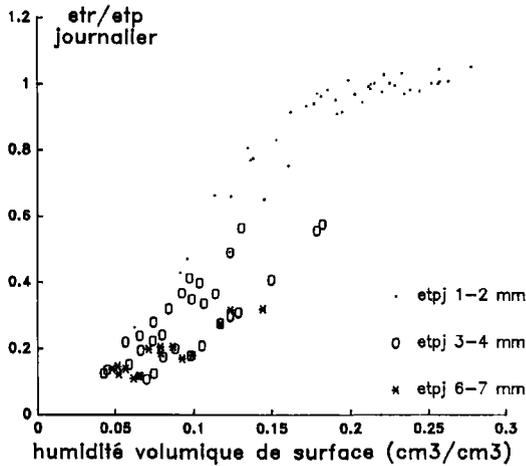


Figure 6. ETR_j/ETP_j en fonction de l'humidité moyenne de la couche 0-5 cm d'un sol limono-argileux, répartition des points en fonction de la demande climatique

humidité donnée θ_s , le rapport ETR_j/ETP_j décroît lorsque la demande climatique augmente. Ceci s'explique par la vitesse de réalimentation hydrique des couches de surface qui permet de compenser les pertes d'eau dues à l'évaporation lorsque la demande est faible. Par contre, lorsque l' ETP_j est forte, seule une part de la demande est satisfaite.

3.3 Validation expérimentale du modèle

Afin de valider le modèle simplifié, nous avons refait une série de mesures sur le limon argileux au cours d'une séquence climatique présentant une ETP_j variant entre 2 et 3 mm. Les points expérimentaux sont portés sur la figure 4. Ceux-ci se retrouvent dans le nuage de points générés par le modèle mécaniste. Les points expérimentaux se trouvent dans la partie supérieure du nuage ce qui est conforme aux données générées par le modèle mécaniste pour des ETP_j équivalentes.

3.4 Performances du modèle simplifié

Les qualités prédictives du modèle ont, dans un premier temps, été évaluées sur le sol limono-argileux en calculant l'intervalle de confiance à 95% de la régression entre les valeurs d' ETR_j estimées par le modèle simplifié et les valeurs issues du générateur de données. Lorsqu'on fait un ajustement sur l'ensemble des points obtenus sur le sol de Poirson, on obtient l' ETR_j avec une précision de $\pm 0,6$ mm (fig. 7). Cependant, nous ne prenons en compte dans cette démarche que les erreurs liées à la simplicité du modèle, ce qui revient à négliger les erreurs de mesures.

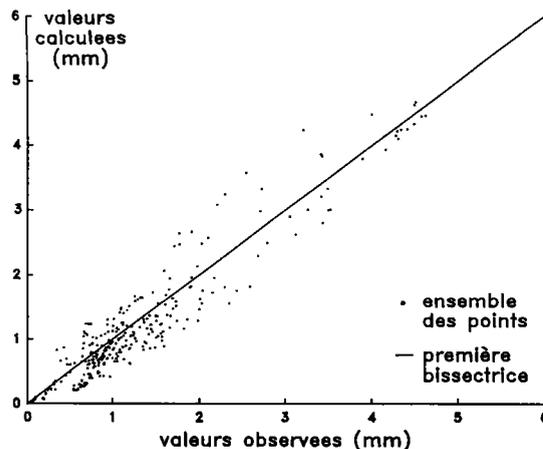


Figure 7. Comparaison de l' ETR_j générée par le modèle mécaniste (valeurs observées) et celle estimée par le modèle simplifié sur le sol limono-argileux

Pour nous mettre dans une situation plus réaliste, nous nous proposons d'étudier la propagation d'une erreur faite sur θ_s , telle qu'on peut l'avoir quand on la mesure par télédétection hyperfréquences, sur l'estimation de l' ETR_j .

Pour cela, nous avons pris une séquence d'évaporation de quinze jours, générée par le modèle mécaniste, obtenue sur un sol limono-argileux. Nous avons supposé que l'erreur de mesure sur l'humidité de surface suit une loi de distribution gaussienne d'espérance θ_s donnée par le modèle mécaniste et d'écart type $0,017 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (valeur de l'écart type obtenu avec la régression $\theta_s = f(\sigma_0)$, cf. fig. 1). Nous avons ensuite effectué 50 tirages aléatoires, selon la loi gaussienne définie précédemment, des 15 valeurs correspondant à la séquence d'évaporation, puis recalculé les ETR_j avec le modèle (équation 2).

Les résultats sont représentés sur les figures 8a et 8b. Nous remarquons qu'en absence d'erreur de mesure, les résultats sont légèrement biaisés. Ceci s'explique par la remarque faite en 3.2 (cf. fig. 6) sur l'organisation du nuage de points en fonction de la contrainte évaporative. La demande climatique moyenne que prend en compte le modèle (équation 2) ne reflète pas exactement celle qui a été retenue pour notre séquence évaporative de quinze jours.

L'incidence des erreurs de mesures sur l'estimation de l' ETR_j varie en fonction du niveau d'humidité. Pour les humidités fortes ($\theta_s > 0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) ou faibles ($\theta_s < 0,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), la part d'erreur liée aux erreurs de mesure sur θ_s sur l'estimation de l' ETR_j est d'environ $\pm 0,3-0,4 \text{ mm/j}$. Par contre, celle-ci peut devenir très importante pour les humidités intermédiaires ($\pm 1 \text{ mm/j}$).

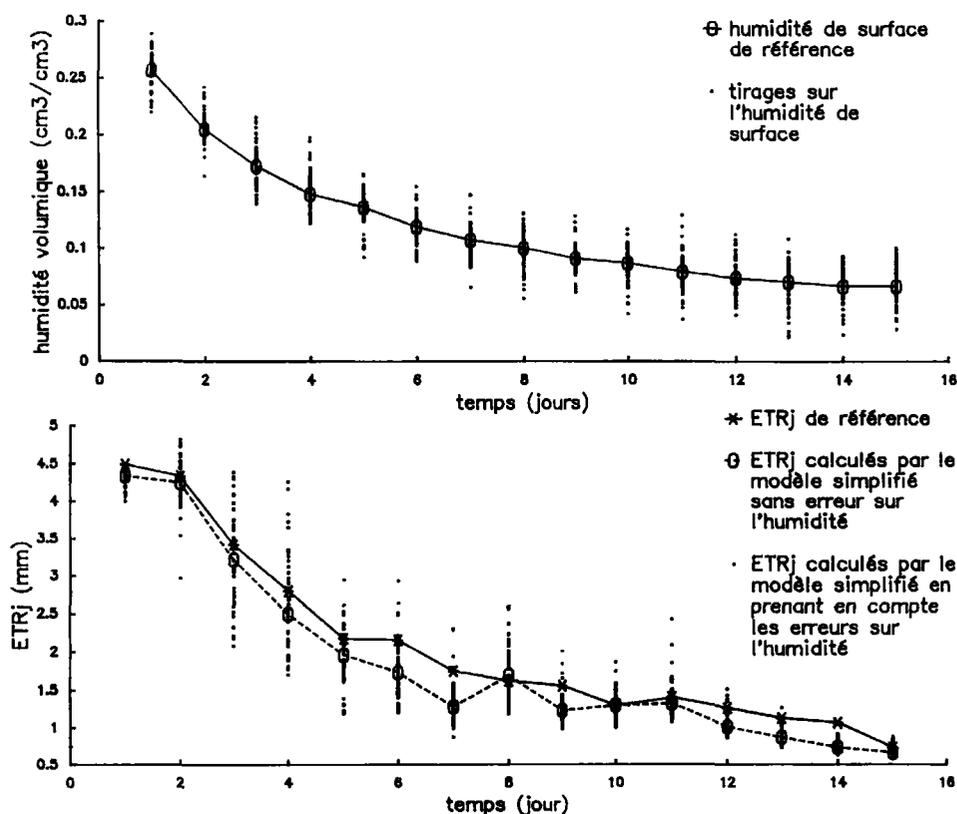


Figure 8. Analyse de la propagation des erreurs de mesure de θ_s sur l'estimation de l' ETR_j

4 Conclusions

Ce travail nous montre à travers une étude théorique (en partie validée) qu'un modèle de la forme $ETR_j = f(\theta_s, \text{sol, climat})$, couplé avec des mesures obtenues par télédétection, permet d'accéder à l'estimation quantitative de l'évaporation lorsqu'on a des informations *a priori* sur la nature du sol.

Dans ce cas, l'erreur sur l'estimation de ETR_j par le modèle se décompose en deux termes : un terme lié à la simplicité du modèle et un terme lié aux erreurs de mesure sur ETP_j et θ_s . Le premier terme d'erreur peut être amélioré par une meilleure prise en compte de la demande évaporative dans l'estimation des paramètres a , b et c du modèle (cf. équation 2). Par contre, le terme lié aux erreurs de mesure ne peut être réduit que par une amélioration de leur précision. Dans l'état actuel des choses, celle-ci nous paraît illusoire. Nous estimons que la relation $\theta_s = f(\sigma_0)$ présentée dans ce travail constitue un optimum, car établie en condition très contrôlée, qui devrait se dégrader avec des systèmes plus opérationnels.

Pour des applications comme le suivi de la saison des pluies dans les zones tropicales ou sub-tropicales une telle méthode semble très adaptée. Celle-ci donne des informations quantitatives sur un pas de temps beaucoup plus court que les méthodes utilisant la radiométrie visible ou infrarouge fortement perturbée par la couverture nuageuse.

Nous sommes toutefois conscients que la méthode nécessite une validation sur des surfaces hétérogènes plus vastes avec des capteurs embarqués.

5 Références

- JACKSON, T. J. et T. J. SCHMUGGE, 1989. Passive microwave remote sensing system for soil moisture : some supporting research. —IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 27, n° 2.
- LE TOAN, T. et M. PAUSADER, 1981. Active microwaves signatures of soil and vegetation covered surfaces. Results and measurements programs. —Colloque international sur les signatures spectrales en télédétection, Avignon, p. 303-313.
- MENENTI, M., 1984. Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques. —Report 10 (special issue), Institute for Land and Water Management Research (ICW), Wageningen, The Netherlands, 202 p.
- PASSERAT DE SILANS, A., L. BRUCKLER, J. L. THONY et M. VAUCLIN, 1989. Numerical model of coupled heat and water flows during drying in a stratified bare soil. Comparisons with field observations. —Journal of Hydrology, 105, p. 109-138.
- PERRIER, A., 1975. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III-Évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. —Annales agronomiques, 26 (3), p. 229-243.
- PRÉVOT, L., R. BERNARD, O. TACONET et D. VIDAL MADJAR, 1984. Evaporation from a bare soil evaluated using a bare soil water transfer model and remotely sensed surface soil moisture. —Water Resources Research, 20 (2), p. 311-316.
- ULABY, F. T., P. P. BATLISLAVA et M. C. DOBSON, 1978. Microwave dependance on surface roughness, soil moisture and soil texture, 1: bare soil. —IEEE transactions on Geoscience and Electronics, GE 16, p. 286-295.

Estimation de l'évaporation sur sol nu à partir de mesures hyperfréquences

ULABY, F. T., G. A. BRADLEY et M. C. DOBSON, 1979. Microwave dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture, 1: vegetation covered soil. —IEEE transactions on Geoscience and Electronics, GE 17 , p. 33-40.

WITONO, H. et L. BRUCKLER, 1990. Use of remotely sensed soil moisture content as boundary conditions in soil-atmosphere water transport modeling, 1: Field validation of a water flow model. —Water Resources Research, sous presse.

6

Étude intégrée des écosystèmes pastoraux du Sahel malien

FRANÇOIS CUQ et IBTISSEM TOUNSI

Laboratoires IMAGEO-UPR 30 et GDR 103, CNRS, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France, téléphone : 33-1-43-29-31-99, télécopieur : 33-1-43-29-63-83

Résumé

Cet article présente les méthodes et les premiers résultats d'un projet de recherche entrepris par six laboratoires et instituts, français et africains, sur l'étude du fonctionnement des écosystèmes de la savane herbacée sahélienne du Mali. Trois orientations de recherche sont présentées ici : l'analyse du bilan hydrique, la spatialisation des modèles agrométéorologiques et la modélisation fonctionnelle de la production primaire. Ce projet s'inscrit dans une étude à long terme des écosystèmes de savanes dans le cadre du programme international géosphère-biosphère (IGBP).

1 Introduction

Cette étude fait l'objet d'un programme international de collaboration scientifique (PICS) établi en 1988 entre le Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) français. Ce projet regroupe six laboratoires et instituts de recherche français et africains : l'Institut du Sahel (CILSS), le Groupe de recherche sur les applications de la télédétection (GDR 103/CNRS), l'International Livestock Center for Africa/Centre international pour l'élevage en Afrique (ILCA/CIPEA), le Laboratoire d'étude et de recherche en télédétection satellitaire (LERTS), unité mixte du Centre national d'études spatiales (CNES) et du CNRS, le Laboratoire d'écologie de l'École normale supérieure, et l'antenne ORSTOM du Centre de météorologie spatiale de Lannion.

Cette étude, fondée sur l'analyse du fonctionnement des écosystèmes de savane herbacée, a trois objectifs : l'estimation de la production primaire herbacée en fin de saison des pluies, l'analyse des évolutions saisonnières et interannuelles du couvert végétal et la mise au point d'une chaîne de traitement d'images satellitaires sur les pâturages, implantable dans un centre africain de réception d'images.

Il existe déjà des méthodes d'estimation de biomasse appliquées aux pâturages sahéliens, fondées sur l'établissement d'une relation linéaire entre l'intégration de l'indice de végétation durant la saison des pluies et des mesures de biomasses sèches relevées sur le terrain. Ces méthodes ont l'avantage d'être relativement simples à mettre en oeuvre et présentent donc un aspect opérationnel non négligeable. Cependant, les relations mesurées n'expliquent qu'une part insuffisante des variations constatées, probablement en raison des données mises en relation : en effet, l'indice de végétation fournit une indication sur la réponse de la couverture végétale aux conditions physiques de son environnement et non sur le poids sec de biomasse à l'hectare.

Partant de cette constatation, l'étude que nous avons entreprise est fondée sur l'analyse et la modélisation du fonctionnement des écosystèmes plutôt que sur le calcul d'une relation uniquement statistique. Dans cette perspective, nous avons entrepris la constitution d'un système d'information géographique (SIG) intégrant des données cartographiques, des images satellitaires et des mesures de terrain. À l'aide de ces informations intégrées dans le SIG, nous développons trois démarches complémentaires : l'estimation des paramètres du bilan hydrique, la spatialisation de modèles agrométéorologiques et la modélisation de la production primaire par intégration de l'efficacité de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) par la végétation.

2 La constitution du système d'information géographique

Le SIG que nous développons a pour fonction de gérer des bases de données relationnelles, géocodées ou non, de les analyser et de fournir une exploitation cartographique des résultats obtenus.

Le schéma conceptuel décrivant l'organisation du système est fondé sur le modèle individuel de Tardieu (Tardieu *et al.*, 1980). Ce modèle possède deux éléments structurants, l'individu et la relation.

Le SIG est piloté par le logiciel GEOSIG, développé au laboratoire IMAGEO; nous prévoyons prochainement l'implantation du logiciel ARC/INFO pour des raisons de compatibilité et de portabilité. Les modules GEOSIG seront intégrés à ce logiciel.

L'intégration des informations dans le système est réalisée à l'aide d'une phase initiale de prétraitements : chaque type de données (cartographiques, satellitaires, mesures de terrain) nécessite l'emploi d'une chaîne de prétraitements spécifique.

2.1 Le prétraitement des données cartographiques

Deux principaux types de données cartographiques sont intégrés au SIG : des données planimétriques (limites, réseaux et à-plats thématiques) et des données tridimensionnelles (hypsométrie). Ces données sont généralement saisies à partir d'une table à numériser sous forme de points et de contours et vérifiées à l'aide d'un programme d'édition interactive. Les fichiers géocodés sont constitués à l'aide d'utilitaires de passage du mode vectoriel au mode maillé, la continuité des informations géocodées étant obtenue par remplissage de polygones,

interpolation bidimensionnelle ou calcul d'une surface de tendance. Les fichiers thématiques intégrés au SIG sont les suivants :

- fichier des limites administratives;
- fichier du réseau routier;
- zonation agro-écologique du Gourma malien, constitué à partir du document réalisé par l'équipe du CIPEA de Bamako;
- modèle numérique de terrain (MNT) de l'hypsométrie du Sahel malien, interpolé à partir des courbes de niveau et points cotés relevés sur la couverture IGN au 1:200 000.

2.2 Le prétraitement des données satellitaires

Cette étude est fondée sur l'utilisation des données des satellites NOAA et METEOSAT. Les images sont prétraitées à Paris (IMAGEO), à Toulouse (CNES) et à Lannion (ORSTOM) à l'aide de chaînes logicielles normalisées et étalonnées. Les fichiers thématiques extraits de ces images sont les suivants :

1) Estimation des champs de précipitations décennales (Pe), calculés à partir de deux variables extraites des données thermiques de METEOSAT, la fréquence d'occurrence décennale des nuages à sommets froids (FOC) et le maximum décennal de température de brillance (T_{max}), et une variable supplémentaire, la latitude (Lat), destinée à corriger les effets de surestimation et de sous-estimation au nord et au sud de l'isohyète moyen 400 mm (Carn *et al.*, 1989). L'algorithme utilisé est de la forme suivante :

$$Pe = a_0 + a_1FOC + a_2T_{max} + a_3Lat$$

2) Estimation du rayonnement global (RG) décennal, calculé à partir des données METEOSAT. Le RG est estimé à partir d'un modèle de transfert radiatif appliqué sur le canal visible. Une erreur rms de 15 W/m^2 a été observée entre ces estimations d'irradiance et celles mesurées au sol à l'aide de pyranomètres (Dedieu *et al.*, 1987).

3) Indice de végétation normalisé (NDVI) décennal, calculé à partir des bandes AVHRR 1 et 2 du satellite NOAA (Cuq, 1988).

2.3 Le prétraitement des données de terrain

Les données de terrain, collectées par l'équipe du CIPEA de Bamako, sont publiées sous forme de rapports annuels et concernent 32 sites répartis dans la région du Gourma, au Mali. Ces données sont saisies sous forme numérique et organisées en bases de données documentaires (logiciel dBase III+). La localisation des sites de mesure est réalisée au moyen de systèmes de navigation par satellite (systèmes TRANSIT et GPS) lors de missions de terrain. À cet ensemble de données écologiques est adjoint une banque de signatures spectrales aux longueurs d'ondes des bandes du capteur HRV de SPOT et des bandes AVHRR 1 et 2 de NOAA. Ces signatures spectrales sont acquises sous forme de points de mesure à diverses incidences ou sous forme de profils. Elles concernent à la fois des étendues végétales caractéristiques, l'arrière-plan sol et des étendues sombres (généralement des glaciés) utilisées comme amers radiométriques. Enfin, des mesures photométriques, permettant l'estimation de l'épaisseur optique au-dessus de la zone de mesure, sont collectées quotidiennement afin de permettre la correction des effets liés aux aérosols sur les images NOAA.

3 L'estimation des paramètres du bilan hydrique

L'estimation des paramètres du bilan hydrique a pour objectif d'analyser le fonctionnement et les modalités de l'écoulement de l'eau en fonction de deux variables principales : le relief et la nature des dépôts de surface. La mise au point du modèle est fondée sur l'analyse du MNT de la topographie et sur la constitution d'un fichier des dépôts de surface.

3.1 L'analyse du MNT de la topographie et le calcul de variables géomorphométriques

L'analyse du MNT est fondée sur une hypothèse de modélisation du terrain à l'aide d'un développement polynomial de Taylor à l'ordre 3 (Dupéret, 1989). À partir de ce modèle, on calcule les dérivées premières et secondes par rapport à x et y :

$$a = H'x, b = H'y, c = H''xx, d = H''xy, e = H''yy.$$

À partir de ces cinq coefficients, on peut calculer les variables morphométriques suivantes :

- la pente :

$$p = \arctg \sqrt{a^2 + b^2}$$

- l'orientation :

$$o = \arccos \frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{si } b < 0$$

$$o = -\arccos \frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{si } b > 0$$

- la courbure horizontale des lignes de niveau :

$$T_n = \frac{2abd - c^2 - e a^2}{(a^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Ces variables sont utilisées pour décrire la déformation topographique de la surface.

Une méthode d'amincissement en trois dimensions appliquée sur le MNT après suppression des cuvettes parasites permet d'extraire le réseau des interfluves et le réseau des thalwegs. Cette méthode est fondée sur l'emploi d'une séquence de squelettisation et d'ébarbulage réitérée jusqu'à idempotence. À partir du réseau d'interfluves, on peut segmenter le MNT en «mésobassins versants» et installer dans ces bassins le réseau d'écoulement.

3.2 La constitution du fichier des dépôts superficiels

L'écoulement de l'eau sur sol nu est non seulement lié à la topographie mais aussi à la nature des dépôts de surface sur lesquels il s'exerce. Partant de la zonation agro-écologique du Gourma malien, réalisée par le CIPEA de Bamako, nous avons traité par classification des images NOAA acquises durant la saison sèche (février-mars 1987) pour constituer un fichier thématique des dépôts de surface. Les résultats des classifications fournissent une distinction précise des dépôts sableux, principale information utile à l'analyse de l'écoulement. La présence des massifs dunaires n'étant pas prise en compte dans le calcul du MNT, il est en

effet nécessaire de prendre en compte leur présence qui explique en particulier la localisation de la plupart des mares sahéliennes.

3.3 La mise au point du modèle d'écoulement

Le modèle est appliqué sur chaque bassin versant afin d'établir un bilan d'écoulement par zone géomorphologique homogène. En utilisant les champs de précipitations calculés sur les images METEOSAT, on estime en tout point un coefficient d'écoulement-concentration de l'eau en fonction des variables morphométriques associées. L'étalonnage de ce modèle est réalisé à partir des mesures effectuées sur le terrain par l'équipe du CIPEA.

4 Spatialisation des modèles agrométéorologiques

Le but de la modélisation agrométéorologique et statistique de la production primaire est d'estimer une production potentielle fournissant un indicateur des modifications du fonctionnement du système écologique. Deux modèles sont en cours de spatialisation : un modèle fondé sur l'estimation des interactions eau-plantes, dérivé des méthodes agrométéorologiques classiques, et un modèle basé sur l'analyse de la distribution temporelle des précipitations au cours de la saison des pluies (Hierneaux, 1984).

4.1 L'estimation des interactions eau-plantes

La spatialisation des paramètres agrométéorologiques classiques, évapotranspiration potentielle (ETP), évapotranspiration réelle (ETR), évapotranspiration maximale (ETM), indice de satisfaction des besoins en eau (ISBE) et leur mise en relation avec la production primaire relevée sur le terrain, est fondée sur l'emploi de deux types de fichiers : le fichier de l'eau utile à la production, obtenu par l'emploi du modèle d'écoulement décrit plus haut, et le fichier des indices de végétation (NDVI) décennaux NOAA utilisés pour décrire les cycles de végétation intégrés. À partir de profils saisonniers, on peut extraire trois stades principaux : un stade d'installation de la végétation, un stade de croissance et un stade de floraison-fructification.

L'analyse de la répartition temporelle de la production primaire peut être abordée d'une façon similaire en étudiant la répartition spatiale des moments des profils d'indices de végétation intégrés. On peut ainsi analyser la répartition des cumuls d'indices au cours de la saison des pluies.

Une classification réalisée sur quatre moments du cumul des indices de végétation permet d'établir un bilan de la saison des pluies 1986 dans le Gourma (fig. 1). On distingue cinq principaux types décrivant successivement : une saison des pluies marquée par un indice de végétation positif pendant au moins 6 décades (type 1), une saison marquée par un indice de végétation positif pendant 4 à 6 décades (type 2), un type à indice de végétation positif pendant 2 à 4 décades en début de saison des pluies (type 3), un type à indice de végétation positif pendant 2 à 4 décades en fin de saison des pluies (type 4), et enfin un type de saison à indice de végétation positif pendant une seule décade (type 5).

Cette classification met bien en évidence l'hétérogénéité saisonnière du couvert végétal, directement liée à l'extrême variabilité spatiale et temporelle des précipitations.

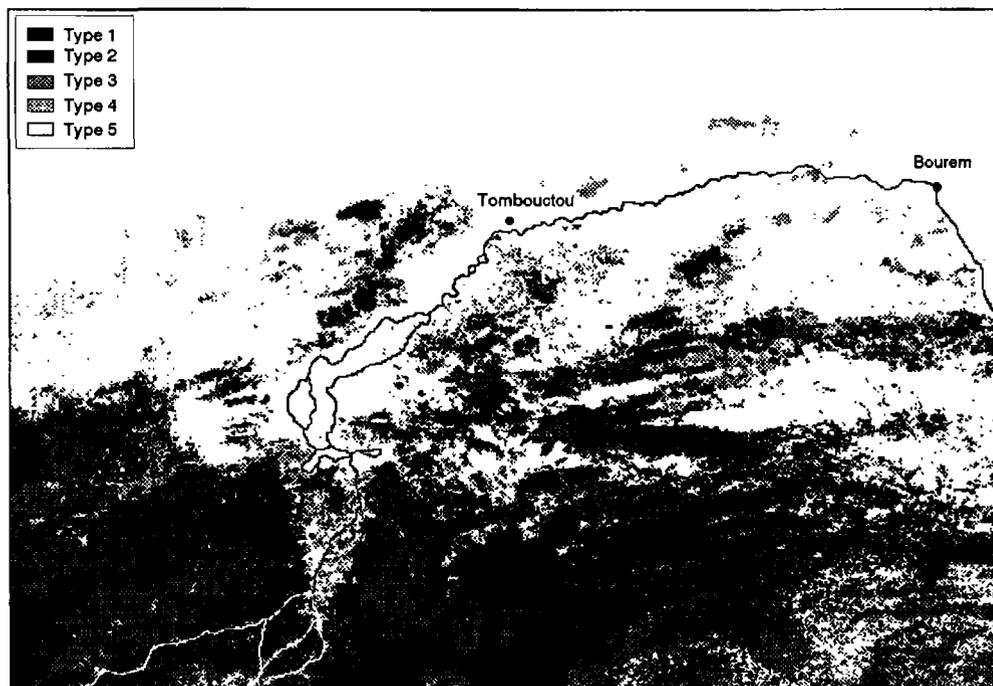


Figure 1. Bilan de la saison des pluies 1986 dans le Gourma malien

4.2 La distribution temporelle des précipitations

L'analyse de la distribution temporelle des précipitations constitue une approche empirique du fonctionnement du système de production. Cette approche est basée sur le repérage d'événements et de périodes pluviométriques durant la saison des pluies (début des pluies, fin des pluies, interruptions, période de pluies régulières, période de pluies non limitantes). La principale difficulté rencontrée pour la spatialisation de ce modèle est l'adaptation au pas de temps décadaire des estimations de précipitations par METEOSAT. En particulier, l'étalonnage des coefficients de production liés au type de début des pluies et à la durée des périodes de pluies régulières ou non limitantes provoque une perte de précision des résultats obtenus.

5 Modélisation fonctionnelle de la production primaire

Le modèle développé est fondé sur l'estimation de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) par la végétation et de la production associée à cette interception (Monteith *et al.*, 1977).

La méthode employée pour estimer la production de matière sèche (MS) s'appuie sur la conversion du rayonnement global (RG) en trois coefficients décrivant la proportion de

PAR (e_s) contenu dans le RG, l'efficacité de la photosynthèse (e_b) et l'efficacité de l'interception du PAR (e_1) par la végétation :

$$dMS/dt = RG \cdot e_s \cdot e_b \cdot e_1$$

Le terme e_1 peut être ramené à une relation linéaire utilisant l'indice de végétation :

$$e_1 = a + b \cdot NDVI$$

L'étalonnage des paramètres a et b est réalisé à partir de mesures réalisées sur le terrain (Loudjani *et al.*, 1990).

6 Résultats et discussion

Les premiers résultats obtenus constituent un étalonnage préliminaire des modèles développés. Ils ont été appliqués, pour la spatialisation des modèles agrométéorologiques, aux mesures effectuées en 1986 et 1987 sur les 32 sites répartis dans le Gourma malien et entretenus par le CIPEA et, pour la modélisation fonctionnelle de la production primaire, sur 143 couples de données «biomasse maximale-pluviométrie annuelle» relevés entre 1958 et 1986 en Afrique de l'Ouest. Les relations obtenues ont donc pour l'instant plus une valeur de test localisé, la prochaine étape de l'étude consistant justement à valider et généraliser les relations mesurées.

En première analyse, les résultats obtenus montrent la cohérence de la démarche employée : la modélisation de la production primaire fondée sur l'interception du PAR et utilisant l'indice de végétation comme indicateur de l'efficacité de cette interception par la végétation doit être confrontée à une analyse des paramètres du bilan hydrique en raison de la forte corrélation entre le NDVI et l'humidité du sol; une estimation précise de la production primaire n'est utile à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes que si elle est confrontée à la production potentielle du milieu, afin de tenter de mesurer les changements interannuels.

7 Conclusion

L'étude des écosystèmes pastoraux du Sahel malien représente une approche intégrée pluridisciplinaire. Les méthodes développées et les modes d'interaction entre les équipes de recherche montrent l'intérêt d'un SIG comme interface entre les méthodes physiques, naturalistes et spatiales.

Cette étude, qui doit s'achever en 1992, fournira un outil méthodologique d'analyse du fonctionnement des savanes herbacées, analyse qui doit être poursuivie sur une période suffisamment longue pour étudier les réponses de ces écosystèmes aux perturbations d'origine naturelle et anthropique.

Cette analyse à long terme sera effectuée dans le cadre d'un projet de recherche sur l'analyse de la dynamique des changements de paysages des savanes d'Afrique de l'Ouest, recherche proposée dans le cadre du projet «Changements globaux» - IGBP.

8 Références

- CARN, M., B. DAGORNE, B. GUILLOT et J.-P. LAHUEC, 1989. Estimation des pluies par satellite en temps réel en Afrique sahélo-soudanienne. —*Veille climatique satellitaire*, n° 28, p. 47-54.
- CUQ, F., 1988. Suivi de la production pastorale du Sahel malien par télédétection. —ISLSCP symposium, Niamey.
- DEDIEU, C., P.-Y. DESCHAMPS et Y. KERR, 1987. Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the Earth and of surface albedo using a physical model applied to Meteosat data. —*Journal of Climate and Applied Methodology*, vol. 26, n° 1.
- DUPÉRET, A., 1989. Contribution des MNT à la géomorphométrie. —ENSG/IGN et IMAGEO/CNRS, Paris.
- HIERNEAUX, P., 1984. Distribution des pluies et production herbacée au Sahel : une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ses effets sur la production herbacée, premiers résultats acquis sur le Sahel malien. —Document de programme ILCA/CIPEA, n° AZ98, Bamako.
- LOUDJANI, P., J.-C. MENAUT, et A. PODAIRE, 1990. Estimation of above ground primary production over West Africa using AVHRR data. —*Remote Sensing of Environment*, accepté pour publication.
- MONTEITH, J. L. et R. A. KUMAR, 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. —*Phil. Trans. R. Soc.*, Londres, B281, p. 277-284.
- TARDIEU, H., D. NANJI et D. PASCOT, 1980. Conception d'un système d'information-construction de la base de données. —Les éditions d'organisation, Paris.

7

Méthode d'évaluation quantitative de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir de données Landsat TM (Burkina Faso)

PIERRE DEFOURNY

Laboratoire de téledétection, Université catholique de Louvain, place Louis-Pasteur, 3, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

Résumé

L'objectif de cette étude est de développer une méthode d'estimation des ressources ligneuses en région tropicale sèche. L'expérience a été menée dans la région de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso. La démarche comporte trois étapes. À chaque étape correspond un niveau de perception qui définit l'échelle d'observation et un niveau d'abstraction déterminé par la résolution. La première étape met en relation la surface terrière d'un arbre et la surface de sa couronne. La surface terrière est mesurée au sol et la surface de la couronne est mesurée sur des photographies aériennes à basse altitude. La deuxième étape envisage le passage de l'individu au peuplement. Une méthode numérique d'estimation de recouvrement est mise au point à partir des photographies aériennes numérisées par scanner. Enfin, la dernière étape étudie les relations entre le recouvrement d'une formation et l'information enregistrée au niveau du satellite. Douze indices de téledétection calculés à partir de données du Thematic Mapper sont analysés en détail sur base d'un échantillon de 50 sites de 8 par 8 pixels. L'expérience menée semble démontrer que les données satellitaires peuvent fournir une information quantitative sur la biomasse ligneuse. Une forte corrélation a été observée entre la surface de la couronne d'un arbre et sa surface terrière toutes espèces confondues. Des relations très étroites ont été mises en évidence entre des indices de végétation et le recouvrement chlorophyllien d'une formation naturelle.

1 Introduction

L'évolution accélérée des paysages végétaux naturels en région tropicale menace l'équilibre de nombreux écosystèmes. Tout particulièrement la strate arborée est soumise à une pression croissante liée à la demande en bois de feu, à l'extension des surfaces cultivées, au surpâturage et aux brûlis.

Dans les systèmes traditionnels d'exploitation agricole, les enjeux de la conservation du patrimoine forestier dépassent largement le cadre de la crise énergétique liée aux ressources ligneuses. La dégradation des formations ligneuses se traduit en outre en termes de dégradation des sols, d'accélération du cycle de l'eau et de modifications sensibles des microclimats. Au niveau agricole, cette évolution correspond à une détérioration des conditions de production.

En région soudano-sahélienne, la convergence de plusieurs facteurs de dégradation confère à ce processus une dynamique qui échappe aux méthodes conventionnelles de collecte et de traitement de données (Devineau, 1986; Defourny, 1989). Les méthodes conventionnelles de suivi de végétation ne sont pas à la mesure de l'échelle spatiale du phénomène et leur temps de réponse est peu compatible avec la vitesse d'évolution. Les développements de la technologie spatiale et du traitement d'images permettent d'envisager une évaluation plus opérationnelle de ces phénomènes.

L'objectif de ce travail est de développer une méthode d'estimation des ressources ligneuses en région tropicale sèche. Il ne s'agit pas de remplacer les méthodes d'inventaires forestiers classiques mais de répondre à un besoin d'information indispensable à la gestion rationnelle des ressources renouvelables. L'information forestière opérationnelle sera de nature cartographique présentée de manière intégrée sous forme d'un système d'information géographique rassemblant notamment des données pédologiques, climatiques et démographiques et pourra être mise à jour régulièrement avec un temps de réponse relativement court.

Le niveau d'agrégation de l'information définira l'utilisation qui en sera faite. Les phénomènes de dégradation observés se situent à différents niveaux d'analyse qui vont de la crise locale au processus régional. L'exploitation des données de plusieurs plates-formes satellitaires peut fournir une réponse à des niveaux d'abstraction différents. Pour le Burkina Faso, trois échelles opérationnelles peuvent d'emblée être définies :

- Une information d'action (entre 1:10 000 et 1:50 000) : à l'intention de l'agent forestier, ces données doivent être précises et détaillées. Ce document doit permettre une intervention directe sur le paysage.

- Une information de sensibilisation (1:500 000) : à l'intention des responsables nationaux et des bailleurs de fonds, ce document doit être synthétique et représentatif. Il ne fournira que des ordres de grandeur nécessaires à la planification.

- Une information de suivi (1:1 000 000 et plus) : à l'échelle régionale ou subcontinentale; elle a pour but l'étude des changements plus globaux et à plus long terme.

2 Problématique

L'inventaire et la cartographie des formations ligneuses en zone tropicale sèche restent un exercice particulièrement difficile même pour les techniques classiques de dendrométrie et d'inventaire forestier.

La grande diversité des espèces (100 espèces courantes pour le Burkina Faso) et une distribution floristique peu liée au zonage écologique compliquent sensiblement les analyses. À cette importante hétérogénéité interspécifique se combine une variabilité intraspécifique inhabituelle due à l'action de l'homme, aux passages répétés du feu et à l'irrégularité des conditions hydriques.

Le paysage végétal se présente en outre sous forme d'un véritable continuum entre les différentes formations. L'inventaire forestier se heurte également à une imbrication non négligeable du thème ligneux dans plusieurs taxons d'occupation du sol, notamment au niveau des champs plus ou moins arborés.

Face à ces difficultés, la télédétection aéroportée et spatiale présente un certain nombre d'atouts. Elle peut répondre à cette importante hétérogénéité par une forte densité d'échantillonnage. L'abstraction liée à la résolution des capteurs peut réduire les difficultés de classification.

3 Cadre géographique de l'étude

L'expérience a été menée dans la région de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso. La zone d'étude centrée sur la forêt classée de Dindresso se situe à 11° de latitude N et à 4°30' de longitude O (fig. 1).

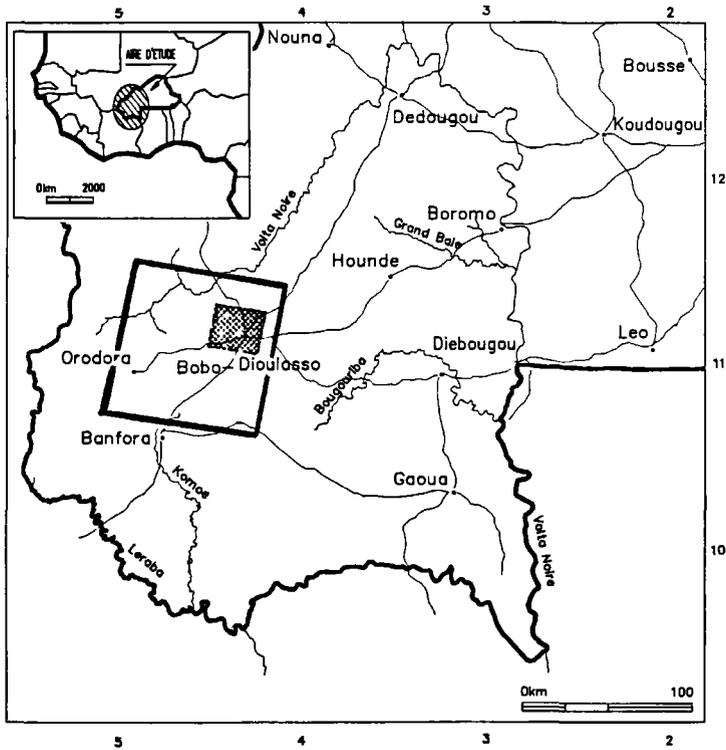


Figure 1. Aire d'étude de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), image Landsat-TM 197-52 du 19 novembre 1987

D'après les subdivisions bioclimatiques d'Aubréville reprises par Guinko (1984), la région est soumise à un climat soudano-guinéen caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 1100 mm.

D'une manière générale, la végétation naturelle de la région est une mosaïque de formations ligneuses hautes plus ou moins denses à *Butyrospermum parkii*, *Parkia biglobosa* et *Isoberlinia doka* et de savanes comportant tous les sous-types depuis la savane boisée à la savane herbeuse.

La démarche du travail procède en trois étapes qui vont de l'arbre au peuplement. À chaque étape correspond un niveau de perception qui définit l'échelle d'observation et un niveau d'abstraction déterminé par la résolution. Une hypothèse fondatrice de la méthode est formulée pour chaque étape. Ces hypothèses seront successivement testées à partir des données fournies par différentes plates-formes de télédétection. L'arbre sera appréhendé par la photographie à basse altitude, la placette par la photographie aérienne classique et la formation par les données satellitaires (fig. 2).

La progression pas à pas est sous-tendue par des observations empiriques qui réclament la plus grande rigueur d'observation. Deux missions d'investigation détaillée du terrain servent de référence à la démarche.

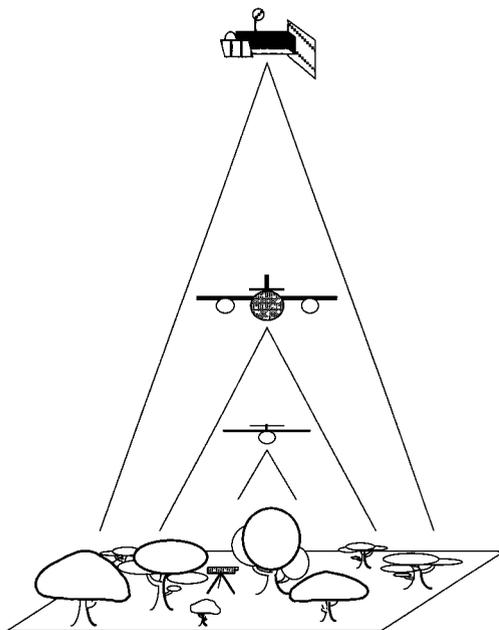


Figure 2. Acquisition des données à partir de plusieurs plates-formes : investigation au sol, vol à basse altitude (1:1 000), couverture aérienne (1:20 000) et enregistrement satellitaire

4 Traitement des données

4.1 Hypothèse scientifique

La première hypothèse constitue une condition nécessaire à toute approche quantitative de la biomasse ligneuse par télédétection. Elle peut se formuler comme suit : «Il existe une

relation biologique non liée à l'espèce entre la biomasse ligneuse aérienne d'un arbre et la surface de sa couronne.»

La biomasse ligneuse aérienne d'un arbre est mesurée par le volume de bois situé au-dessus de la surface du sol. Pour l'estimer, les forestiers procèdent par équations dendrométriques fournissant des tarifs de cubage qui mettent en relation un ou plusieurs paramètres facilement mesurables (diamètre à hauteur d'homme, hauteur, etc.) et le volume mesuré par méthode destructrice. Au Burkina Faso, les tarifs de cubage construits dans le cadre de l'inventaire de la FAO (Cameratti, 1983) font intervenir soit uniquement le diamètre à 1,30 m, soit le diamètre associé à la hauteur totale.

Dans le cadre de ce travail, la biomasse ligneuse aérienne peut donc être estimée à partir de la mesure de la circonférence à 1,30 m transformée en surface terrière. Cette dernière est définie par la projection verticale de la section du tronc à 1,30 m et constitue une variable intéressante à la fois au niveau de l'individu et au niveau du peuplement.

La surface de la couronne définie comme la projection verticale de la couronne de l'arbre est difficilement mesurable avec précision au sol. La photographie aérienne à basse altitude permet d'en faire une estimation tout à fait satisfaisante (Spencer et Hall, 1988; Warren et Dunford, 1986; Epp *et al.*, 1983). La photographie aérienne présente également le grand avantage de pouvoir procéder à un échantillonnage important en rapport avec la diversité des espèces et l'hétérogénéité intraspécifique.

L'ensemble des données ont été collectées au début de novembre 1988, c'est-à-dire en phase de pleine feuillaison pour la strate ligneuse. Un plan d'échantillonnage en grappe a été établi pour rencontrer un maximum d'espèces dans différentes stations, celles les plus représentatives de la région. Sept placettes de 150 m par 150 m réparties en cinq stations écologiques différentes ont été investiguées.

Un vol à basse altitude a fourni une couverture aérienne verticale stéréoscopique (1:1 000). Les prises de vue ont été réalisées à l'aide d'un appareil Nikon FG 20 avec un objectif de 70 mm embarqué dans un Cessna FR 172. L'échelle de prise de vue de chaque placette est calibrée par rapport à un vol photogrammétrique au 1:20 000 (IGB n° 87079-B, 1987). La mesure de la couronne foliaire de chaque individu est effectuée par numérisation sur tablette à numériser sous stéréoscope à miroir Bausch & Lomb.

L'investigation au sol a été réalisée deux jours après la couverture aérienne. Chaque placette a été délimitée avec précision sur les clichés et les arbres numérotés. Pour chaque arbre, on procédait à la localisation exacte au sol, à la mesure de la circonférence à 1,30 m, à l'identification de l'espèce et à l'indication de l'état sanitaire.

Sur les 159 arbres mesurés au sol, 7 individus n'ont pu être identifiés au niveau de l'espèce et 8 couronnes n'ont pu être délimitées à partir des photographies à basse altitude.

L'échantillon complet comprend 151 individus répartis en 27 espèces différentes. La figure 3 présente la distribution de la population de l'échantillon répartis par classe de diamètre.

À partir des 151 individus, une régression linéaire calculée entre la surface terrière et la surface de la couronne par la méthode des moindres carrés fournit un coefficient de détermination de $R^2 = 0,815$. Cependant, l'examen des résidus ($\epsilon_i, i = 1, 2, \dots, n$) ne permet pas de vérifier la condition d'homoscédasticité ($V(\epsilon_i) = s^2$). Le non-respect de cette condition limite la valeur prédictive de l'équation particulièrement au niveau des gros diamètres.

Afin d'ajuster une courbe de régression au nuage de points observés, une double transformation logarithmique a été effectuée sur les données. L'adéquation de ce type de régression aux données traduit ce qu'on appelle en biologie, une relation d'allométrie entre la surface terrière et la surface de la couronne.

Les équations des courbes d'ajustement sont du type :

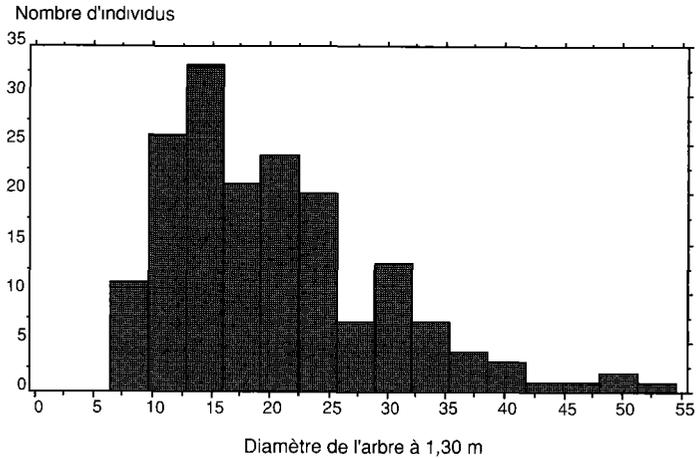


Figure 3. Distribution de la population échantillon répartie par classes de diamètre (en cm)

$$C = x S^y \text{ ou } \log(C) = x' + y \log(S)$$

C : surface de la couronne
 S : surface terrière.

Un calcul de régression a été mené par la méthode des moindres carrés pour chaque station, pour chaque type de sol, pour chaque espèce et pour toutes stations et espèces confondues. À chaque niveau, les régressions sont toutes très significatives et fournissent des droites d'équations assez similaires.

La figure 4 présente les résultats des régressions calculées toutes espèces et stations confondues. Les résultats de cette analyse témoignent d'une forte corrélation entre la surface terrière et la surface de la couronne indépendamment de l'espèce. Le coefficient de détermination obtenu s'élève à 0,819 ($R = 0,905$).

Les conditions d'homoscédasticité ($V(\epsilon_i) = s^2$) et de normalité ($\epsilon_i \sim N(0, s^2)$) de la distribution des résidus sont bien vérifiées. L'erreur-standard de l'estimation de la régression se limite à 0,161 et n'entame pas la valeur prédictive de cette relation.

L'hypothèse formulée *a priori* au départ de cette expérience est bien vérifiée. Les résultats obtenus montrent que la surface de la couronne d'un arbre rend compte de 81,9% de la surface terrière. On peut donc conclure qu'il est possible d'estimer la biomasse ligneuse aérienne à partir de la mesure de la couronne dans la région de Bobo-Dioulasso.

En régions plus arides, d'autres études étaient arrivées à des conclusions similaires à partir d'échantillons beaucoup plus restreints tant au niveau du nombre d'individus qu'au niveau des espèces représentées (Poupon, 1980; Epp *et al.*, 1983; Hellden, 1987).

4.2 Conditions d'application

L'étape suivante consiste à vérifier les conditions qui permettent de passer de l'individu au peuplement :

1) «Pour une formation donnée, la somme des surfaces des couronnes est égale à la surface de recouvrement du peuplement arboré.»

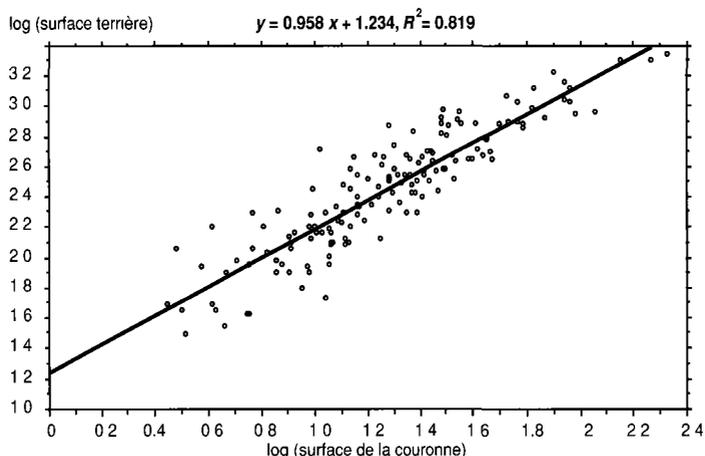


Figure 4. Droite de régression entre la surface terrière et la surface de la couronne toutes espèces confondues, après double transformation logarithmique de données

2) «L'estimation de la surface de recouvrement d'une formation peut être répétée sur de nombreux échantillons de manière objective et précise.»

Au niveau de la formation naturelle, la surface de recouvrement est définie par la proportion de sol cachée par la végétation chlorophyllienne et est exprimée en pourcentage.

Les observations au sol et l'examen systématique des photographies aériennes à basse altitude permettent de négliger l'influence de la superposition des couronnes de même que les effets de pente. Il apparaît dès lors raisonnable de considérer un simple modèle additif à la fois pour passer de la surface terrière individuelle à la surface terrière du peuplement et de la surface de la couronne à la surface de recouvrement.

Au sol, l'estimation de la surface de recouvrement d'une formation est relativement subjective. Une méthode rapide et objective de mesure numérique par traitement d'images a été développée à partir des photographies aériennes classiques. Elle remplace la mesure visuelle fastidieuse utilisant un binoculaire muni d'une trame. Elle procède par numérisation par scanner de la photographie en 256 niveaux de gris (résolution de 12 points/mm) suivie d'une binarisation interactive de l'image en arbre/non-arbre pour finalement effectuer un comptage automatique de la surface de recouvrement.

La validation de la méthode a été réalisée sur 45 sites qui ont fait l'objet d'une estimation visuelle par comptage au binoculaire et d'une mesure numérique après numérisation.

Calculé sur l'ensemble des mesures, le coefficient de corrélation ($R = 0,983$) traduit sans équivoque l'équivalence des deux méthodes. Trois placettes n'ont toutefois pu être mesurées par scanner en raison de la couleur très foncée du substrat qui se confond avec la couverture végétale.

4.3 Hypothèse technologique

La dernière étape du travail consiste à vérifier l'hypothèse suivante : «Il existe une relation étroite entre la surface de recouvrement et l'information enregistrée par les satellites à haute résolution.»

L'expérimentation de cette hypothèse sera menée à l'aide des données Landsat TM du 19 novembre 1987. La date d'acquisition correspond à un moment où toute la strate herbacée

est sénescence et la strate ligneuse en pleine feuillaison. L'objectif de la démarche est de trouver l'indice télédétection ou la combinaison de canaux le mieux corrélé aux mesures de recouvrement.

Outre les six canaux bruts du TM, les techniques de télédétection proposent un grand nombre d'indices particulièrement adaptés à l'étude de la végétation (Perry *et al.*, 1984; Bariou *et al.*, 1985; Bartholomé, 1987). La plupart de ces indices de végétation reposent sur le fait que la végétation a une absorption maximum pour les longueurs d'ondes entre 0,45 et 0,65 μm à l'usage de la photosynthèse et qu'elle réfléchit une importante quantité d'énergie dans la partie proche infrarouge du spectre. Ils sont répartis en deux grandes catégories : les indices orthogonaux et les indices du type ratio.

Pour mettre en évidence une éventuelle relation entre recouvrement et réduction de la réflectance d'un sol, les indices de sol et de brillance ont également été envisagés. Les indices retenus pour notre analyse sont présentés au tableau I et exprimés selon les bandes spectrales TM.

Tableau I. Indices de télédétection retenus pour cette étude (exprimés en termes de bandes spectrales TM)

Nom	Sigle	Équation
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(\text{TM4} - \text{TM3})/(\text{TM4} + \text{TM3})$
Ratio Vegetation Index 4/3	RVI 4/3	$\text{TM4}/\text{TM3}$
Ratio Vegetation Index 3/4	RVI 3/4	$\text{TM3}/\text{TM4}$
Transformed Vegetation Index	TVI	$\sqrt{\frac{\text{TM4} - \text{TM3}}{\text{TM4} + \text{TM3}} + 0,5}$
Soil-Adjusted Vegetation Index (Huete, 1988)	SAVI	$\frac{\text{TM4} - \text{TM3}}{\text{TM4} + \text{TM3} + L} \cdot (1 + L)$
Difference Vegetation Index	DVI	$2,4 \text{ TM4} - \text{TM3}$
Perpendicular Vegetation Index	PVI	indice calculé après transformation des axes ajustés à la droite des sols calculée
Soil Line Index (Richardson et Wiegand, 1977)	SLI	indice calculé après transformation des axes ajustés à la droite des sols calculée
Greenness Index (Tasseled Cap Transformation, Crist et Cicone, 1984)	GI	$-0,2848 \text{ TM1} - 0,2435 \text{ TM2} - 0,5436 \text{ TM3} + 0,7243 \text{ TM4} + 0,0840 \text{ TM5} - 0,1800 \text{ TM7}$
Wetness Index (Tasseled Cap Transformation, Crist et Cicone, 1984)	WI	$0,1509 \text{ TM1} + 0,1973 \text{ TM2} + 0,3279 \text{ TM3} + 0,3406 \text{ TM4} - 0,7112 \text{ TM5} - 0,4572 \text{ TM7}$
Brightness Index (Tasseled Cap Transformation, Crist et Cicone, 1984)	BI	$0,3037 \text{ TM1} + 0,2793 \text{ TM2} + 0,4743 \text{ TM3} + 0,5585 \text{ TM4} + 0,5082 \text{ TM5} + 0,1863 \text{ TM7}$
Brightness	B	$\sqrt{\text{TM3}^2 + \text{TM4}^2}$

Pour le «Perpendicular Vegetation Index», une droite des sols a été construite par régression simple à partir de 125 points de sols nus localisés dans l'ensemble de la zone

d'étude ($y = 16,432 + 0,809 x$, avec $R^2 = 0,82$). Pour le «Soil-Adjusted Vegetation Index», la valeur de L est fixée à 0,5 comme le propose son auteur (Huete, 1988).

Le plan de sondage couvre l'ensemble de la zone (24 km par 24 km). Les sites échantillonnés mesurent 240 m par 240 m soit 8 par 8 pixels TM. L'ensemble de l'échantillon comporte 56 sites répartis dans la zone-test en fonction du type de formation végétale et du type de sol. Chaque site fait l'objet d'une mesure de recouvrement par méthode numérique à partir de photographies aériennes au 1:20 000 de juin 1987. Ils sont également précisément reportés sur la composition colorée TM afin d'en calculer la moyenne pour les six canaux TM (30 m de résolution) et les douze néo-canaux.

L'examen des diagrammes de dispersion correspondant aux 56 sites appelle d'emblée deux remarques :

- 5 sites de plantations forestières très couvrantes, tous de l'espèce exotique *Gmelina arborea* (Mélina), ont un comportement spectral particulier et présentent des valeurs d'indices anormalement basses;

- 1 site de végétation presque fermée situé dans un bas-fond assez humide se comporte également de manière anormale.

Ces deux types de sites (Mélina et bas-fond) sont tellement marginaux par rapport à l'ensemble de la zone qu'il semble raisonnable de ne pas les considérer dans un premier temps.

À partir des six canaux bruts du TM, la méthode de régression multiple pas à pas a permis de déterminer la combinaison linéaire des canaux qui est la mieux corrélée aux mesures de recouvrement. Deux canaux du proche et du moyen infrarouge ont été retenus pour fournir la droite de régression suivante ($R^2 = 0,819$) :

$$Y = 2,515 \text{ TM4} - 1,82 \text{ TM7} - 55,164$$

Les douze indices construits à partir des canaux bruts sont répartis en deux matrices de corrélation (tableaux II et III), l'une rassemblant les indices de végétation, l'autre les indices de sol et de brillance. Ces derniers apparaissent peu corrélés aux mesures de recouvrement.

Les indices de végétation sont fortement corrélés aux mesures de recouvrement, sauf le DVI. Les covariances entre indices de végétation sont particulièrement élevées et traduisent une véritable équivalence entre ces indices, excepté le DVI.

Tableau II. Matrice de corrélation des indices de végétation

	Re-couvr.	NDVI	TVI	SAVI	RVI 3/4	RVI 4/3	PVI	DVI	TCT GREE
Recouvr.	1,000								
NDVI	0,899	1,000							
TVI	0,891	0,999	1,000						
SAVI	0,899	1,000	0,999	1,000					
RVI 3/4	-0,877	-0,995	-0,999	-0,995	1,000				
RVI 4/3	0,917	0,989	0,982	0,989	-0,970	1,000			
PVI	0,880	0,993	0,993	0,993	-0,992	0,997	1,000		
DVI	0,627	0,697	0,684	0,698	-0,664	0,730	0,725	1,000	
TCTGREE	0,877	0,985	0,983	0,985	-0,978	0,976	0,989	0,758	1,000

Tableau III. Matrice de corrélation des indices de brillance

	Re-couvr.	BRIG HTN	TCT BRIG	TCT WET	SLI
Recouvr.	1,000				
BRIGHTN	-0,155	1,000			
TCTBRIGH	-0,543	0,880	1,000		
TCTWETN	0,742	-0,647	-0,929	1,000	
SLI	-0,330	0,980	0,951	-0,770	1,000

Le SAVI ne semble différer du NDVI que par une constante, mais on s'étonnera davantage de la très forte corrélation entre les indices basés sur un rapport d'une part, et le PVI et la composante «Greenness» de la «Tasseled Cap Transformation» d'autre part.

C'est le rapport proche infrarouge/rouge (RVI 4/3) qui rend le mieux compte des mesures de recouvrement ($R = 0,917$), précédant de peu les indices reposant sur la différence normalisée.

Pour chaque indice de végétation, une droite de régression est calculée à partir des sites échantillonnés ($n = 50$). Le tableau IV rassemble l'ensemble des coefficients de détermination obtenus.

Tableau IV. Coefficients de détermination des régressions calculées entre les indices de végétation et le recouvrement ($n = 50$)

Indices de végétation	Recouvrement	Log. du recouvrement
NDVI	0,809	0,847
TVI	0,793	0,860
SAVI	0,809	0,847
RVI 3/4	0,770	0,873
RVI 4/3	0,841	0,779
PVI	0,774	0,840
DVI	0,394	0,283
GI (TCT)	0,770	0,803

La relation calculée entre le RVI 4/3 et le recouvrement présente une légère hétéroscédasticité au niveau des résidus de la régression. Ce risque d'hétéroscédasticité et la forme de la distribution de la population échantillon au niveau du recouvrement conduisent à proposer une transformation logarithmique des données.

C'est l'indice RVI 3/4 qui fournit la meilleure relation avec un $R^2 = 0,87$ (fig. 5). L'hypothèse de départ reliant le recouvrement d'une formation et une mesure télédéetectée paraît clairement établie. Les indices de végétation du type ratio semblent légèrement plus performants.

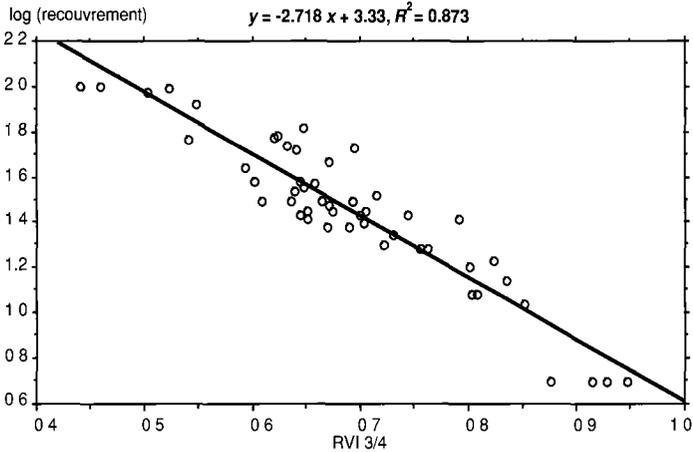


Figure 5. Droite de régression calculée à partir de l'indice de végétation RVI 3/4 et des mesures de recouvrement après transformation logarithmique

5 Conclusions

L'expérience menée semble démontrer que les données satellitaires peuvent fournir une information quantitative sur la biomasse ligneuse. Mené dans des conditions optimales d'acquisition et de traitement de données, ce travail a mis en évidence des relations très étroites.

Une forte corrélation a été observée entre la surface de la couronne d'un arbre et sa surface terrière toutes espèces confondues. Une méthode de mesure numérique a été ensuite mise au point pour estimer rapidement le recouvrement des couronnes d'un peuplement. Finalement, des relations très étroites ont été mises en évidence entre des indices de végétation et le recouvrement chlorophyllien d'une formation naturelle.

Les résultats acquis demandent néanmoins confirmation et analyse complémentaire. Il faut notamment approfondir l'influence de l'humidité sur les indices et la manière de réduire ces erreurs au niveau des bas-fonds.

Avant toute extrapolation de la méthode, il est indispensable de vérifier la stabilité des relations tant au niveau spatial qu'au niveau temporel.

Finalement, il serait intéressant d'identifier l'influence de la résolution spatiale des capteurs au niveau des résultats d'une telle expérience.

6 Remerciements

Cette étude est menée dans le cadre de la deuxième phase du projet «Caractérisation par les techniques de télédétection de la dynamique de la désertification à la périphérie du Sahara» financé par la Direction générale du développement de la Commission des communautés européennes.

7 Références

- BARIOU, R., D. LECAMUS et F. LE HENAFF, 1985. Indices de végétation. —Dossiers de télédétection, Centre régional de télédétection, Université de Rennes, 150 p.
- BARTHOLOMÉ, É., 1987. Comparaison des potentialités de différents indices de végétation pour la caractérisation des cultures en milieu sahélien. —Centre AGRHYMET, Niamey, 27 p.
- CAMERATTI, A., 1983. Inventaire forestier national : Haute-Volta. —FAO-PNUD, Rome, 173 p.
- CRIST, E. P. et R. C. CICONE, 1984. A physically-based transformation of TM data - the TM Tasseled Cap. —IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 22, n° 3, p. 256-263.
- DEFOURNAY, P., 1989. Étude dynamique de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir de données Landsat MSS. —Photo-interprétation, n° 89-2, fasc. 4.
- DEVINEAU, J. C., 1986. Impact écologique de la recolonisation des zones libérées par l'onchocercose des vallées burkinabés. —ORSTOM/OMS, 2 vol.
- EPP, H., D. PEDEN et D. HERLOCKER, 1983. The use of large scale aerial photography to determine wood biomass in the arid and semi-arid areas of Kenya. —Actes du symposium international de la commission VII de la Société internationale de photogrammétrie et télédétection, Toulouse, p. 415-422.
- GUINKO, S., 1984. Contribution à l'étude de la végétation et la flore du Burkina Faso. —Thèse de doctorat d'État, Bordeaux III, 394 p.
- HELLDEN, U., 1987. An assessment of woody biomass, community forests, land use and soil erosion in Ethiopia. —Lund Studies in Geography, 73 p.
- HUETE, A. R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). —Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295-309.
- PERRY, C. R., J. R. LAUTENSCHLAGER et L. F. LAUTENSCHLAGER, 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. —Remote Sensing of Environment, vol. 14, p. 169-182.
- POUPON, H., 1980. Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. —Travaux et documents, ORSTOM, n° 115, 351 p.
- RICHARDSON, A. J. et C. L. WIEGAND, 1977. Distinguishing vegetation from soil and background information. —Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n° 43/12, p. 1541-1552.
- SPENCER, R. D. et R. J. HALL, 1988. Canadian large-scale aerial photographic systems (LSP). — Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, n° 4, p. 475-482.
- WARREN, P. L. et C. DUNFORD, 1986. Sampling semiarid vegetation with large-scale aerial photography. —ITC Journal, 4, p. 273-279.

8

Le suivi intégré de l'environnement sénégalais

PETER FREDERIKSEN

Affiliation au moment des journées scientifiques : Centre de suivi écologique, Programme des Nations Unies pour le développement, B. P. 154, Dakar, Sénégal, téléphone : 221-32-54-94

Affiliation actuelle : 19.2, Roskilde Universitetscenter, Postbox 260, 4000 Roskilde, Danemark

Résumé

Au Sénégal, le Centre de suivi écologique a pour mandat le suivi des systèmes de production (agriculture, élevage, foresterie) dans un contexte de développement rural. Cela a entraîné la mise sur pied d'une structure de suivi intégré de l'environnement, laquelle est constituée d'une équipe multidisciplinaire composée d'écologistes, de socio-économistes, de géographes et d'informaticiens. La collecte de données est faite à plusieurs niveaux : satellite, avion, terrain. Leur traitement est entièrement informatisé : réseau local avec des PC et des périphériques.

La télédétection est donc une composante du suivi parmi d'autres, et ses produits sont interprétés dans un contexte global. Le Centre a surtout travaillé avec le suivi du taux de croissance de la végétation, la production végétale pendant l'hivernage, les feux de brousse, le décompte du bétail, la charge pastorale, la pluviométrie, les surfaces d'eau douce et des études socio-économiques.

1 Introduction

La sécheresse du Sahel limite le potentiel de production agricole et de l'élevage. La pluviométrie est souvent imprévisible et les producteurs sont obligés d'appliquer des stratégies de risque qui ne leur permettent pas de produire d'une manière optimale. Cette situation combinée avec une croissance élevée de la population a entraîné l'expansion de l'agriculture à

des terres marginales avec un potentiel de production plus bas. L'utilisation intense des terres peut diminuer leur potentiel et donc entraîner une baisse de la production à long terme. Cela posera des problèmes majeurs pour le Sénégal qui essaie d'atteindre l'autosuffisance alimentaire afin de diminuer le déficit de paiement. Actuellement, le gouvernement sénégalais ne dispose souvent pas de suffisamment d'information pour la formulation d'une politique de développement rural cohérent. Dans ce contexte, le Bureau des Nations Unies pour la région soudano-sahélienne a créé le Centre de suivi écologique (CSE) afin de suivre le développement spatio-temporel du milieu rural au Sénégal afin de pouvoir informer les institutions gouvernementales sur les systèmes de production et les ressources naturelles.

2 L'objectif et le fonctionnement

L'objectif principal de la première phase du projet était de développer des méthodes capables de cartographier et d'analyser le développement temporel des ressources naturelles renouvelables et les facteurs socio-économiques dans le nord du Sénégal, surtout au niveau de l'élevage.

La structure administrative, le personnel, le matériel et le logiciel mis en place ont rapidement démontré le potentiel du CSE à travailler à l'échelle nationale et sur différents systèmes de production. En conséquence, le mandat sera élargi à tout le pays dans la deuxième phase afin d'inclure trois systèmes de production : l'agriculture pluviale, l'agriculture irriguée et l'élevage.

Les activités du Centre sont principalement de type opérationnel. Pour que le travail du Centre soit utile, la plupart des produits sont préparés sur la base de protocoles d'accord avec des partenaires, car toute activité doit se justifier par son utilisation. Les partenaires nationaux sont la Direction de l'agriculture, la Direction des eaux, forêts et chasses, la Direction de l'élevage, le Service météorologique national et la Cellule après-barrages.

Le développement de nouveaux produits occupe une position moins importante, mais il est essentiel pour assurer le renouvellement du Centre. Le Centre collabore avec des centres de recherche : les universités de Copenhagen, Roskilde et Aarhus (Danemark), le centre Agrhymet (Niger), le Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes d'Ispra (Italie), la NASA (États-Unis), etc., pour tester la qualité de ses produits et pour assurer un transfert rapide des nouveaux concepts et des nouvelles méthodes.

Le personnel est organisé autour d'une direction, des conseillers techniques, des responsables des projets et des experts-ressources qui assurent les contacts avec les partenaires. Le travail a une forte composante interdisciplinaire à cause du thème principal du CSE : l'analyse spatiale des systèmes de production.

Les fonds proviennent entièrement du système des Nations Unies. Pour la deuxième phase, le CSE souhaite qu'une partie du financement provienne aussi des contrats avec l'État, avec des organismes internationaux et nationaux, mais il faut être réaliste : il est peu probable que le CSE sera en mesure de s'autofinancer.

3 Les méthodes

Le Centre utilise la télédétection, le vol systématique de reconnaissance à basse altitude et le travail de terrain pour la collecte des données. Une structure entièrement informatisée

assure l'analyse et l'interprétation des données, incluant un réseau local avec différents périphériques qui sont utilisés par un système d'information géographique, des systèmes de traitement d'images, des bases de données, etc.

Le Centre utilise actuellement des images Meteosat, NOAA-AVHRR et Landsat TM. Les images Meteosat proviennent de la station de réception de l'Université de Reading en Angleterre. Les commandes atteignent 24 images par jour pendant l'hivernage. Pendant toute l'année, quatre images NOAA-AVHRR sont reçues par décade de la station de réception à Mas Palomas (Iles Canaries). Les images Landsat TM sont acquises à partir d'EOSAT (États-Unis)(copies sur papier) ou de Mas Palomas (bandes magnétiques).

Le traitement des images numériques est entièrement assuré par le personnel en utilisant soit le logiciel CHIPS, développé par l'Université de Copenhague, soit le logiciel ERDAS. Le redressement est fait à partir des points de contrôle au sol pour rendre les images compatibles avec des cartes topographiques à coordonnées UTM.

L'enquête aérienne est effectuée avec un petit avion monomoteur ou bimoteur qui vole nord-sud en suivant des lignes de vol équidistantes de 5 km. L'équipe est constituée de quatre personnes : le pilote, le navigateur, qui utilise le système global de navigation (GNS), et deux observateurs qui font le décompte visuel du bétail en deux bandes d'observation, une de chaque côté de l'avion, et la photographie verticale automatique. Les photographies verticales sont utilisées pour estimer la couverture agricole, arborée, herbacée et les sols nus.

Les travaux de terrain sont fait pour calibrer les images satellitaires, pour conduire les vols systématiques de reconnaissance ou pour réaliser les enquêtes socio-économiques. En général, le personnel passe plusieurs mois en brousse chaque année.

Pour effectuer un suivi intégré de l'environnement, les données provenant des différentes sources doivent être compatibles dans l'espace et dans le temps. Il est en conséquence essentiel de réorganiser les données, par exemple par région socio-économique, écologique, administrative ou autre. Les données brutes dont le Centre dispose (des images satellitaires classifiées, les bandes d'observation, les photographies verticales, des cartes topographiques et thématiques, des statistiques, etc.) ne permettent souvent pas une telle intégration des données. On s'est donc attelé à attribuer des coordonnées UTM à toutes les données du Centre. On a développé des logiciels qui permettent l'agrégation des images satellitaires et des données des vols systématiques de reconnaissance selon un découpage donné (unité administrative, écologique, socio-économique, etc.). Cela permet de développer une base de données des ressources naturelles, de l'infrastructure, etc., et de les combiner selon les besoins des partenaires/utilisateurs. La superposition des cartes est assurée par un système d'information géographique vectoriel (ARC/INFO).

Le traitement des données est fait dans un environnement informatisé. Le Centre dispose actuellement de 18 ordinateurs PC (286 et 386) branchés à un réseau local en même temps que des périphériques : dérouleur de bande, écrans graphiques pour le traitement des images et pour le système d'information géographique, table à numériser, et des imprimantes à jet encre, matricielles et laser.

4 Les produits

Le Centre travaille sur quatre aspects principaux des systèmes de production : la végétation, le cheptel, le bilan hydrique et la socio-économie.

Les études de la végétation comprennent le taux de croissance et la production végétale pendant l'hivernage avec des images NOAA-AVHRR NDVI. Des cartes NDVI à l'échelle

nationale avec des informations topographiques sont distribuées de manière opérationnelle chaque décade à 80 institutions nationales. Les couvertures arborée, herbacée, de l'agriculture et de sol nu sont recensées en utilisant des vols systématiques de reconnaissance. La cartographie de la structure de la couverture arborée a été faite à partir d'une classification multispectrale et multitemporelle des images NOAA-AVHRR en utilisant les canaux 1 et 2 des images de la saison sèche.

La cartographie de feux de brousse a été réalisée en combinant des études radiométriques en brousse, la photographie aérienne et des images NOAA-AVHRR.

Les études radiométriques servaient à documenter le développement temporelle de la signature spectrale des zones brûlées, ce qui est essentiel pour savoir à quelle fréquence il faut acquérir les images NOAA-AVHRR. Les résultats montraient que les feux produisent une forte baisse de la réflexion dans les bandes qui correspondent aux canaux 1 et 2 du NOAA-AVHRR et dans le NDVI, et que les trois paramètres augmentaient dans le cours d'une dizaine de jours après les feux à des niveaux légèrement inférieurs à ceux d'avant les feux. Il faut donc acquérir plusieurs images NOAA-AVHRR par décade pour distinguer les aires brûlées des aires non brûlées.

La photographie aérienne a été utilisée afin de pouvoir déterminer le pourcentage des surfaces brûlées. Sur chaque photographie, 320 points ont été choisis au hasard et groupés comme brûlés/non brûlés. Les résultats indiquaient qu'une moyenne de 80% des aires classifiées comme touchées par les feux à partir de l'avion avaient brûlé tandis que le reste consistait en sol nu ou en végétation sèche. Ces résultats étaient valables pour la steppe avec très peu d'arbres et pour la savane avec 10-35% d'arbres. Si le pourcentage ne dépend pas de l'échelle d'observation, par exemple entre la photographie aérienne d'un hectare et le pixel NOAA-AVHRR d'un kilomètre carré, on peut donc multiplier la surface classifiée à partir des images NOAA-AVHRR avec un facteur 0,8, ce qui donnerait une approximation de la surface réelle brûlée.

Une classification par parallélépipèdes supervisée a été effectuée en utilisant : 1) les canaux 1, 2 et 4 du NOAA-AVHRR de la période octobre 1988 à janvier 1989; 2) l'analyse interactive des contrastes sur l'écran graphique et des données statistiques des sites de contrôle au sol (pour identifier les seuils).

Les résultats sont à considérer comme préliminaires car on ne dispose pas d'une table de contingence pour les différentes zones écologiques du pays. Une telle table est compliquée à obtenir parce qu'il est très difficile de se localiser avec précision en brousse. Un autre problème est lié à la couverture arborée. Dans le nord du Sénégal, le contraste dans la signature spectrale est très marqué entre les zones brûlées et non-brûlées à cause de la faible couverture arborée et des sols sableux, surtout en ce qui concerne les canaux 1 et 2. Dans le centre et le sud du Sénégal, la couverture arborée est beaucoup plus élevée et les sols latéritiques plus sombre, ce qui se traduit par un contraste plus faible entre les deux types de surfaces. Il est donc probable que l'erreur de classification soit plus élevée dans la dernière zone.

La classification a couvert environ de 50 000 km². Si on suppose que 80% ont brûlé, cela correspond à 40 000 km² ou dix fois plus que la statistique officielle. En combinant ces données avec la carte de la production végétale pendant l'hivernage 1988, on peut estimer qu'environ 10 millions de tonnes de végétation ont brûlé. Lorsque l'hivernage se termine, les feux commencent plus tôt au nord et au centre du pays qu'au sud. Les feux touchent surtout les plateaux latéritiques du centre ou la population locale tend à allumer des feux précoces afin d'éviter des feux plus désastreux plus tard dans la saison sèche. Au nord du pays, les éleveurs ne pratiquent pas les feux précoces pour conserver un maximum de végétation disponible pour le bétail. Des feux sont uniquement allumés pour combattre les criquets.

Le décompte de bétail inclut les bovins, les petits ruminants, les ânes, les chevaux et les dromadaires et il est combiné avec une analyse de la charge pastorale et de la pression animale dans l'élevage et dans l'agriculture pluviale. Le décompte est fait à partir d'un avion. Les informations sur la pression animale sont obtenues grâce à l'intégration des données satellitaires (production végétale) et des données des vols systématiques de reconnaissance (charge pastorale) dans le système d'information géographique. Ces données sont présentées par Prévost (1990).

Les composantes du bilan hydrique étudiées sont la pluviométrie, avec la méthode de nuages froids à partir des images Meteosat, et la surface du lac de Guiers à partir du canal 2 du NOAA-AVHRR.

Le lac de Guiers est le plus grand réservoir de surface d'eau douce du Sénégal. Un problème majeur est l'introduction des eaux salines provenant des plantations de canne à sucre au nord du lac, ce qui, de temps en temps, élève la salinité du lac à un niveau critique où les eaux ne peuvent plus être utilisées comme eau potable pour les Dakarais et pour les producteurs, leur cultures et leur bétail autour du lac. Les autorités essaient de modéliser l'hydrologie de lac en suivant le stockage et les entrées et sorties d'eau. Faute d'un modèle numérique du terrain, on méconnaît les variations de sa surface selon le niveau du lac. La connaissance de la surface est essentielle pour estimer l'évaporation. Le Centre a donc essayé d'estimer la surface en utilisant des images NOAA-AVHRR.

On a utilisé une méthode d'histogramme développée par Bakker (1975) et appliquée par Harris et Mason (1989) pour l'estimation de la surface d'un lac. Ils montraient que le canal 2 de jour et les canaux 4 et 5 de nuit du capteur AVHRR étaient les plus précis. Dans la présente étude, le canal 2 a été choisi à cause de la présence de ces images dans les archives du Centre. Les résultats ont été comparés avec une image Landsat TM qui a été planimétrée pour estimer l'erreur de classification, qui était 2%.

Les résultats sont donnés en km² dans le tableau I pour les cycles 1987-1988 et 1988-1989. La surface totale à partir du 27/9/1988 inclut les aires inondées dans une vallée au sud du lac. Les autorités du lac avait ouvert le barrage qui sépare le lac de la vallée ce qui permettait l'entrée des eaux du lac.

La surface moyenne en 1987-1988 était de 251 km² et de 268 km² en 1988-1989. La surface variait de 182 km² en juillet 1987 à 316 km² en novembre 1988. La surface maximale apparaissait un mois après la fin de l'hivernage et le minimum un mois après le début de l'hivernage. L'augmentation de la surface pendant l'hivernage était deux à quatre fois plus rapide que la diminution de la surface pendant la saison sèche.

Les études socio-économiques sont limitées au système pastoral et incluent des études de l'organisation des producteurs, la pratique pastorale, l'économie de la production, etc. Les études se basent surtout sur des enquêtes effectuées en brousse.

L'impact de ces produits sur la formulation de la politique de développement rural est difficile à mesurer. Le Centre a été actif pendant 30 mois et il est devenu bien connu parmi les techniciens des institutions gouvernementales qui travaillent sur les différents aspects du développement rural, mais il reste beaucoup de travail de sensibilisation à faire au niveau des décideurs pour que les produits aient un impact plus profond.

5 Le futur

L'organisation du personnel changera vers le remplacement des expatriés par des experts nationaux des Nations Unies et avec un financement jusqu'en 1995. Au point de vue

Tableau I. Évolution de la surface du lac de Guiers pendant les années 1987-1988 et 1988-1989

1987/88		1988/89	
Date	Surface (km ²)	Date	Surface(km ²)
30/05/87	211	19/06/88	215
27/06/87	199	08/07/89	250
04/07/87	194	18/07/88	248
05/07/87	194	26/07/88	246
23/07/87	182	04/08/88	279
01/08/87	197	12/08/88	273
10/08/87	215	30/08/88	282
19/08/87	231	19/09/88	294
06/09/87	260	27/09/88	297 (13)
03/11/87	270	06/10/88	305 (30)
07/11/87	272	15/10/88	316 (41)
10/12/87	272	15/11/88	312 (47)
23/12/87	257	24/12/88	300 (40)
04/02/88	260	23/01/89	279 (28)
11/03/89	259	23/02/89	281 (25)
19/06/89	215	19/07/89	222 (4)

thématique, le Centre commencera à travailler avec la statistique agricole et la planification et l'aménagement du territoire en utilisant de plus en plus des images satellitaires à haute résolution.

6 Références

- BAKKER, J. L., 1975. Monitoring water quality from Landsat. —NASA Technical Memorandum TM X-71006, NASA, Goddard Space Flight Center, Maryland.
- HARRIS, A. R. et I. M. MASON, 1989. Lake area measurement using AVHRR, a case study. — International Journal of Remote Sensing, vol. 10, n^{os} 4-5, p. 885-895.
- PRÉVOST, Y., 1990. Analyse spatiale de la pression animale comme facteur de désertification dans le nord du Sénégal. —in P. Lafrance et J.-M. Dubois (éd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 241-251.

9

Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio Corubal (novembre 1987–décembre 1988)

JEAN-MARIE GRÉGOIRE et GIOVANNI FERRARI

Institut des applications de la télédétection, Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes, Établissements d'Ispra, 21020 Ispra (Varese), Italie, téléphone : 39-332-78-92-15, télécopieur : 39-332-78-90-01, télex : 380042

Résumé

L'étude présentée tente de montrer comment les données des satellites météorologiques à basse résolution spatiale, comme celles fournies par le capteur AVHRR des satellites NOAA, peuvent être utilisées pour caractériser la dynamique spatio-temporelle des états de surface sur cinq bassins versants d'Afrique de l'Ouest. L'exploitation de dix images NOAA-HRPT permet d'analyser d'une part l'évolution générale pendant la saison sèche 1987-1988 et du début de la saison 1988-1989, d'autre part le comportement spécifique de chaque bassin.

Il est proposé de constituer une banque de données regroupant quelques éléments descriptifs des états de surface sur les bassins versants des principaux fleuves d'Afrique de l'Ouest. Cet ensemble de données viendrait en complément aux informations contenues dans les banques de données hydro-météorologiques existantes.

1 Introduction

Les modifications affectant la couverture végétale d'un territoire donné, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface. La nature du couvert intervient

en effet sur l'intensité de cinq processus fondamentaux dans le cycle de l'eau à la surface : interception, évaporation directe après interception, infiltration dans le sol, évapotranspiration et ruissellement de surface.

Pour un espace géographique donné, tel un bassin versant, les caractéristiques du couvert végétal déterminent en quelque sorte les ressources en eau réelles, c'est à dire l'eau stockée par le milieu, par opposition aux ressources en eau potentielles que sont les précipitations. Toute modification du couvert végétal aura ainsi des répercussions sur les ressources en eau utilisables par le milieu et les activités humaines, répercussions pouvant affecter profondément des écosystèmes naturels comme celui de la mangrove (Guillemyn, 1989).

En conditions de ressources en eau limitées, qui sont celles de l'Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, il apparaît indispensable de développer des méthodes de surveillance du milieu sur les bassins des grands fleuves de la région de façon à : 1) collecter l'information demandée par les modèles d'écoulement; 2) évaluer les conséquences hydrologiques engendrées par les modifications du couvert végétal; 3) mettre en évidence les régions prioritaires pour les programmes d'aménagement. De nombreux auteurs (Rango *et al.*, 1983; Solomon *et al.*, 1988; Kite, 1989; Salomonson, 1989; Grégoire, 1989) ont cité la télédétection spatiale comme un des outils privilégiés pour effectuer cette surveillance.

Le travail présenté ici tente de montrer comment les données du capteur AVHRR, à bord des satellites NOAA, peuvent être utilisées pour effectuer un suivi des conditions du milieu sur une base régionale. Cinq bassins importants pour les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest ont été choisis : ceux de la Faleme, du Bafing, du Bakoye, de la Gambie et du Corubal.

Les trois premiers, affluents du fleuve Sénégal, sont situés en zone soudanienne; les formations végétales climaciques sont de type «forêt claire indifférenciée soudanienne» dans la légende de la Carte de végétation de l'Afrique publiée par l'UNESCO. Le couvert végétal actuel est composé d'une mosaïque de savanes arborée, arbustive et herbeuse.

La Gambie traverse la zone de contact entre domaine guinéo-soudanien et domaine soudanien; les types de végétation sont en partie la «forêt claire soudanienne» comme sur les affluents du Sénégal et une mosaïque de «forêt ombrophile et de formations herbeuses». Les faciès dégradés sont une savane arbustive à arborée avec des îlots de forêt claire.

Le bassin du Corubal est lui totalement situé en zone de transition guinéo-soudanienne.

L'ensemble de la zone d'étude est comprise entre les isohyètes 2000 mm, aux sources du Bafing et du Corubal dans le massif du Fouta Djallon, et 750 mm au confluent de la Faleme et du Sénégal.

2 Préparation des documents satellitaires et des fichiers graphiques de limite de bassin

Dix images NOAA-AVHRR-HRPT (Advanced Very High Resolution Radiometer-High Resolution Picture Transmission; tableau I) ont été sélectionnées pour caractériser l'évolution des états de surface entre les mois de novembre 1987 et décembre 1988. En fait, seules les périodes de saison sèche ont été retenues.

Pour chaque document satellitaire, le prétraitement a été le suivant :

- correction géométrique de type panoramique à partir des paramètres de navigation du satellite fournis avec le document;
- calcul de l'indice de végétation normalisé à partir des comptes numériques dans les bandes spectrales AVHRR-1 et 2;

Tableau I. Caractéristiques du satellite NOAA (9-11) et du capteur AVHRR

Cycle orbital	9 jours
Période orbitale	102 min
Altitude	805 km
Heure de passage équatoriale (temps universel)	
en mode ascendant	14 h 30 min
en mode descendant	2 h 30 min
Angle de balayage	± 56 degrés
Trace au sol	2 700 km
Résolution au sol	1,1 km au nadir à 3,5 km latéralement
Bandes spectrales	
canal 1	0,58—0,68 µm
canal 2	0,73—1,1 µm
canal 3	3,55—3,93 µm
canal 4	10,3—11,3 µm
canal 5	11,5—12,5 µm
Réception des données HRPT pour l'Afrique de l'Ouest	Station de Maspalomas (Iles Canaries)

- extraction de deux «fenêtres» de 512 par 512 pixels chacune (fig. 1) pour couvrir d'une part les bassins des trois affluents du fleuve Sénégal (Faleme, Bafing et Bakoye), d'autre part ceux de la Gambie et du Corubal.

Parallèlement à la préparation de la série d'images, les fichiers graphiques de limite de bassins versants (tableau II) ont été créés :

- numérisation des limites de bassin sur fond de carte au 1:1 000 000;
- correction géométrique des fichiers obtenus pour les rendre superposables aux images. La correction a été effectuée par la méthode des points de contrôle.

Ces fichiers graphiques permettent d'extraire, pour chacune des dates retenues, l'information radiométrique correspondante à un bassin déterminé. Cette étape du travail a été réalisée à l'aide du logiciel CHIPS (Rasmussen, 1989).

Tableau II. Caractéristiques des bassins étudiés

Bassin	Nombre pixels (1 pixel = 1 km ²)	Milieu	Pays concerné
Faleme	29 345	soudano-sahélien	Sénégal, Mali et Guinée
Bafing	38 404	soudano-sahélien	Guinée et Mali
Bakoye	14 764	soudano-sahélien	Guinée et Mali
Gambie	75 643	guinéo-soudanien	Gambie, Sénégal et Guinée
Corubal	37 639	guinéo-soudanien	Guinée Bissau et Guinée

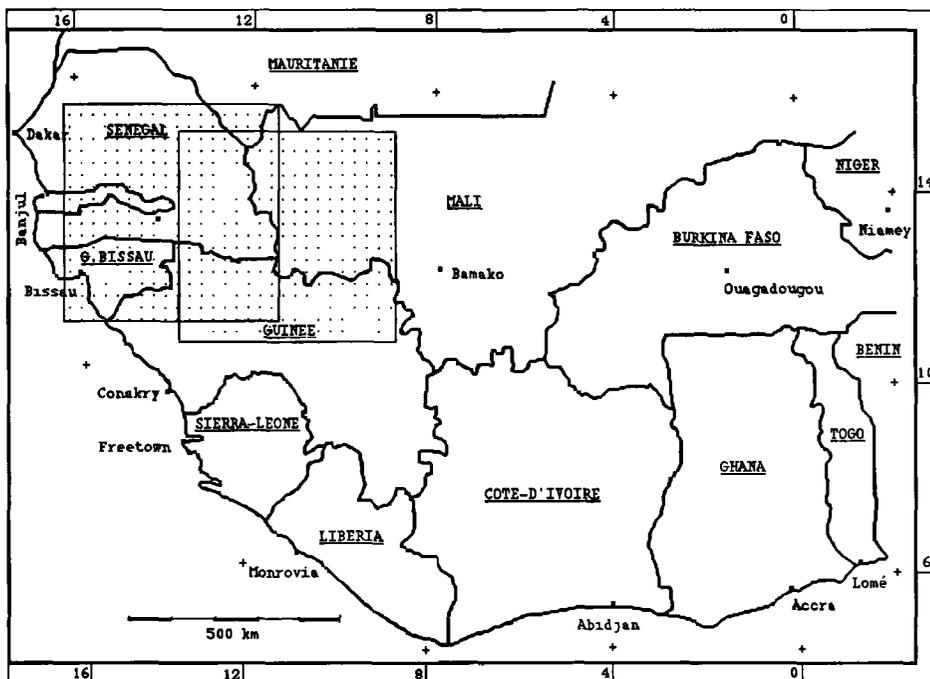


Figure 1. Position des deux fenêtres NOAA-HRPT (512 par 512 pixels) utilisées pour l'étude

3 Résultats et interprétation

À la fin de la phase de prétraitement des données, chaque bassin étudié a pu être défini sur la base des éléments suivants :

- le compte numérique, pixel par pixel, dans l'infrarouge thermique moyen (AVHRR-3);
- l'indice de végétation normalisé (NDVI) calculé pixel par pixel à partir des enregistrements dans le visible (AVHRR-1 et 2);
- les moyennes, écarts types et histogrammes de distribution, bassin par bassin, des deux termes précédents.

Aucune correction radiométrique n'a été appliquée aux données.

L'interprétation a été faite en essayant : 1) de dégager l'évolution générale des états de surface sur l'ensemble des bassins; 2) de discerner des évolutions spécifiques d'un bassin à l'autre.

3.1 Évolution générale entre novembre 1987 et décembre 1988

L'évolution générale des valeurs moyennes de l'indice de végétation et des enregistrements dans le canal AVHRR-3 (fig. 2) est très semblable pour les cinq bassins étudiés. Pendant la saison sèche 1987-1988, de novembre à mai, l'indice de végétation montre des fluctuations minimales autour d'une valeur très basse comprise entre 0,05 et 0,10. Après la saison des pluies, à partir de novembre 1988, on observe une remontée marquée de l'indice puis une chute après

le mois de décembre 1988. Les maximums, observés en décembre pour les cinq bassins, restent à des niveaux relativement bas de l'ordre de 0,20; valeurs qui correspondent à celles mentionnées par différentes recherches sur le même milieu (Justice, 1986). Ces fluctuations de l'indice indiquent les changements saisonniers de la densité du couvert végétal vivant. Les dix observations disponibles ne permettent pas d'aller au-delà de ce constat très général et qualitatif.

L'évolution des enregistrements dans l'infrarouge thermique (fig. 2) apporte plus d'information. Ces données permettent ainsi de discerner deux périodes bien distinctes pendant la saison sèche 1987-1988 : la première, de novembre 1987 à février 1988, montre des valeurs relativement stables (autour du niveau de quantification 160) très inférieures à celles observées pendant la deuxième phase de mars à mai 1988; l'écart moyen entre les deux périodes est de l'ordre de 75 unités de quantification soit 45% d'augmentation de février à mars, mois pour lequel on observe les valeurs les plus élevées. Avril et mai montrent une tendance à la baisse. Les valeurs les plus basses, pour l'ensemble de données disponible, s'observent en octobre 88 après la saison des pluies. Puis, il y a de nouveau tendance à la remontée en novembre et décembre.

La dynamique observée dans l'infrarouge thermique moyen (centré sur 3,7 μm) reflète le mode de réchauffement du milieu suite aux effets de la saison sèche : diminution de la densité du couvert végétal vivant, de l'évapotranspiration et de l'humidité de surface du sol; augmentation des superficies de sol nu. À ces modifications des états de surface s'ajoute la contribution des feux de brousse (*cf.* point 3.3) et la remontée des températures de l'air après le mois de janvier.

3.2 Différenciation entre bassins

Au-delà de la tendance générale présentée plus haut, on peut déceler des comportements spécifiques par le biais de l'hétérogénéité de l'état de surface. Les barrettes d'écart type, indiquées sur la figure 2, montrent que la dispersion, au sens statistique du terme, change beaucoup d'une date à l'autre pour un bassin donné. La figure 3 présente l'évolution temporelle de cette dispersion des valeurs radiométriques dans le canal AVHRR-3 entre novembre 1987 et mai 1988.

Le Bakoye et la Gambie ont des comportements très semblables :

- il y a une tendance à l'harmonisation des états de surface (baisse de la dispersion des valeurs) entre novembre 1987 et février 1988, suivie d'une remontée marquée pendant la deuxième moitié de la saison sèche (mars à mai 1988);

- la valeur minimale de dispersion s'observe après les pluies, en octobre 1988, ce qui dénote une forte homogénéité des états de surface à ce moment de l'année.

La Faleme se comporte plus ou moins comme les deux bassins précédents mais avec une tendance à l'harmonisation, en début de saison sèche, beaucoup plus marquée; en fait, cette différence d'intensité dans le processus est due à la forte hétérogénéité rencontrée au sein de la Faleme au tout début de la saison sèche, en novembre 1987, par rapport à celles montrées par le Bakoye et la Gambie.

Le bassin du Corubal montre un comportement inverse : il y a augmentation de la dispersion pendant la saison sèche 1987-1988 avec un maximum atteint vers le mois de mars 1988; le minimum de fin de saison des pluies, décalé vers le mois de novembre 1988, est suivi d'une brusque remontée entre novembre et décembre.

Le Bafing enfin ne présente pas de tendance bien nette pendant la saison sèche 1987-1988; le minimum de fin de saison des pluies, en octobre 1988, est suivi d'une forte remontée de la dispersion jusqu'au mois de décembre.

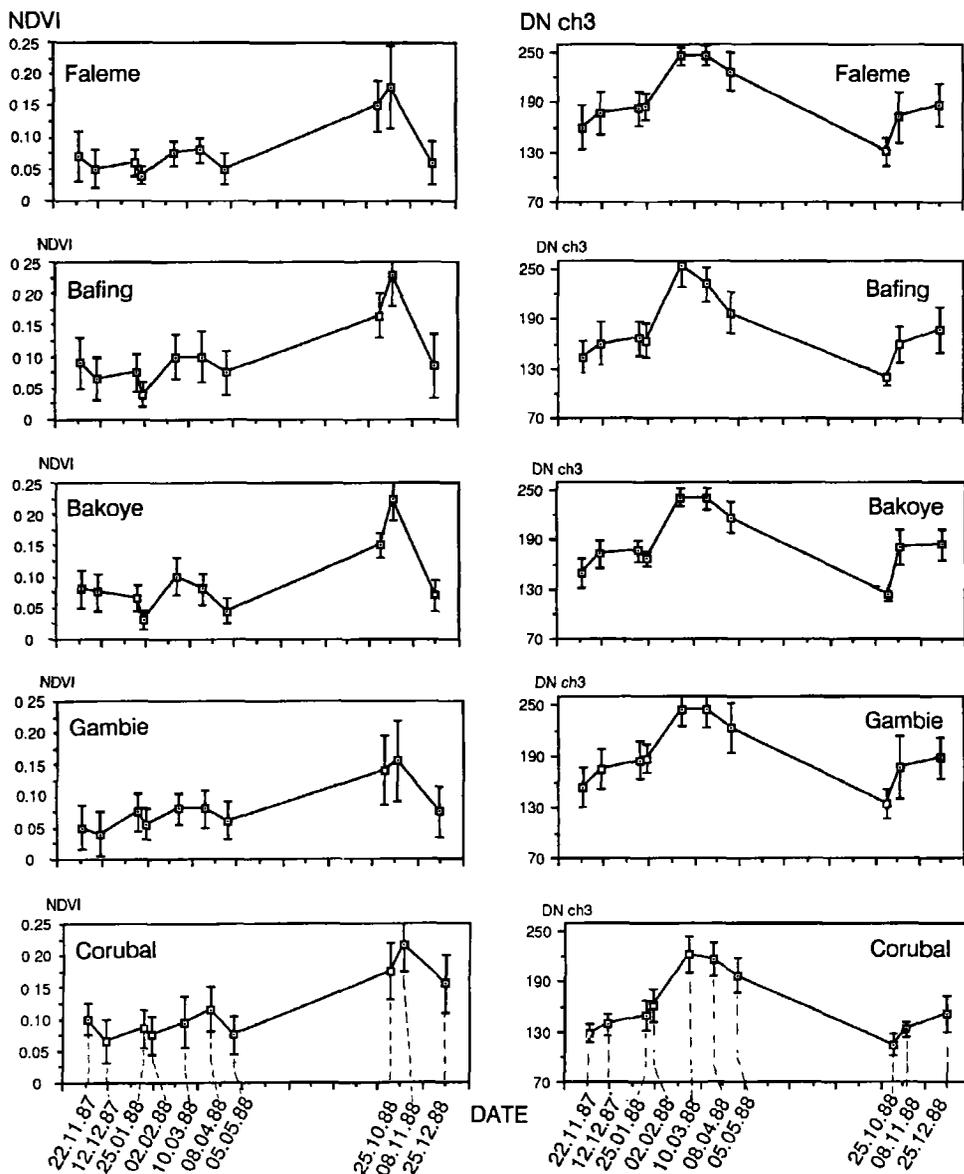


Figure 2. Évolution de l'indice de végétation normalisé (NDVI) et du signal dans le canal AVHRR-3 entre novembre 1987 et décembre 1988 (moyenne des valeurs de tous les pixels de chaque bassin)

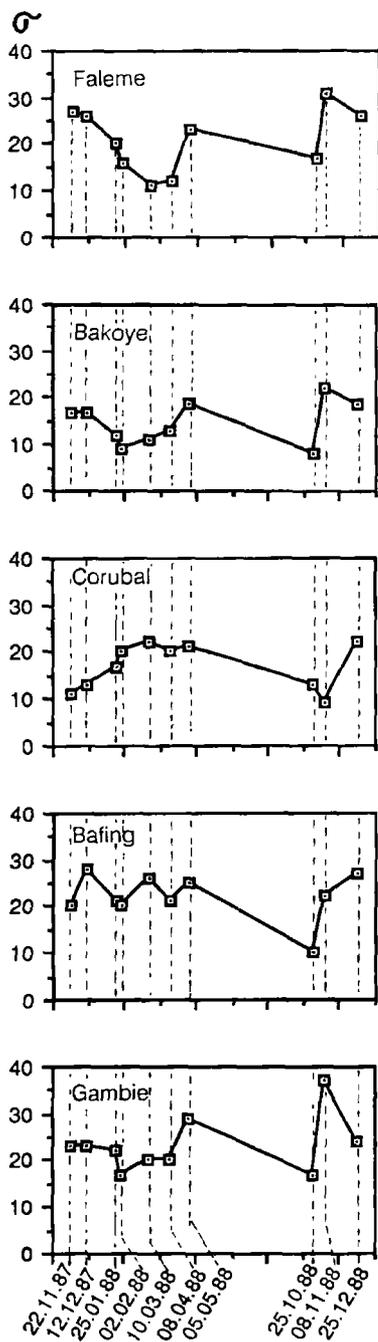


Figure 3. Évolution de l'écart type des comptes numériques dans le canal AVHRR-3

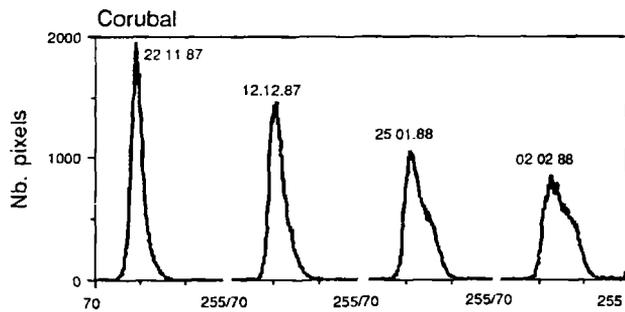
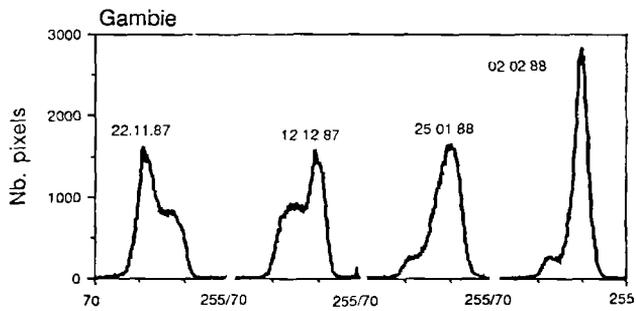
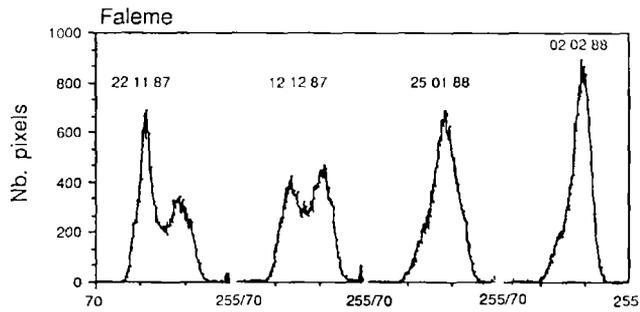


Figure 4. Histogrammes de distribution des valeurs dans le canal AVHRR-3 pour la Faleme, la Gambie et le Corubal entre novembre 1987 et février 1988

Les histogrammes de distribution des comptes numériques dans le canal 3 (fig. 4) permettent de bien visualiser les deux grandes tendances observées dans la première moitié de la saison sèche :

- uniformisation progressive (resserrement des histogrammes) sur les bassins de la Faleme et de la Gambie; il y a en quelque sorte simplification des états de surface;
- tendance inverse (étalement des histogrammes) sur le bassin du Corubal; il y a ici augmentation, dans le temps, de la complexité des états de surface.

Les variations temporelles de la dispersion semblent liées aux cycles saisonniers de la végétation et de l'humidité de surface des sols : les maximums, observés au début et à la fin de la saison sèche, reflètent très probablement l'effet que ces périodes de transition ont sur le couvert végétal; la différenciation entre types de végétation et entre strates, s'intensifie ce qui se traduit par une dispersion accrue des niveaux radiométriques observés sur le document satellitaire.

Les modalités de cette différenciation, et de la dispersion résultante, sont fortement dépendantes du type de milieu et pourraient de ce fait constituer un excellent paramètre de description quantitative des modifications intervenant au sein des bassins versants étudiés. Cette approche est complémentaire des travaux visant à mettre en relation l'organisation spatiale du couvert ligneux et l'état du milieu en zone sahélienne (Jacqueminet *et al.*, 1989) ou de ceux qui tendent à décrire l'hétérogénéité dans la distribution de la couverture végétale au moyen de paramètres statistiques (Aman *et al.*, 1989).

Après une période de calibration de ce paramètre par des observations au sol sur les bassins, on peut envisager de l'utiliser de façon systématique dans une optique de suivi opérationnel des changements d'états de surface.

3.3 Dynamique des feux de brousse

En tant qu'agent de modification des caractéristiques de surface, les feux de brousse doivent faire l'objet d'un suivi dans tout programme de surveillance opérationnel des bassins de cette partie de l'Afrique de l'Ouest. Parmi les instruments d'observation de la Terre actuellement disponibles, le capteur AVHRR occupe une place de choix pour le suivi de ce phénomène à cause d'une part de ses caractéristiques spectrales (trois bandes dans l'infrarouge thermique), d'autre part de sa répétitivité élevée.

De fait, de nombreux travaux de recherche s'attachent à intégrer l'information dérivée des images NOAA-AVHRR dans les méthodes de suivi des feux actifs (Matson *et al.*, 1984; Stephens et Matson, 1987; Grégoire *et al.*, 1988; Langaas et Muirhead, 1988; Belward et Lambin, 1989) ou de suivi des superficies affectées par le feu (Frederiksen *et al.*, 1989) et ce dans différentes régions de la ceinture intertropicale du globe (Sadowski et Westover, 1986; Malingreau et Tucker, 1988).

Le travail présenté ici s'appuie uniquement sur l'information fournie par le canal AVHRR-3, dans l'infrarouge moyen, pour dégager des intensités et des calendriers de feu. La figure 5 montre ainsi, pour chacun des cinq bassins entre novembre 1987 et décembre 1988, le nombre de pixels à saturation (niveau de quantification 255). Il ne s'agit pas là d'un comptage exact des feux actifs, et encore moins d'une estimation des zones brûlées. Ces données représentent par contre un très bon indicateur de l'intensité du phénomène et de son calendrier.

On distingue ainsi la période des feux dits précoces, en début de saison sèche (novembre et décembre sur le graphique), et celle des feux tardifs (mars, avril et mai sur le graphique). Pour ces trois derniers mois, il faut noter que le grand nombre de points à saturation est dû en partie à l'échauffement général du milieu et non directement aux feux : la part revenant à l'activité des feux de brousse ne peut malheureusement pas être quantifiée à partir du seul canal 3; pour

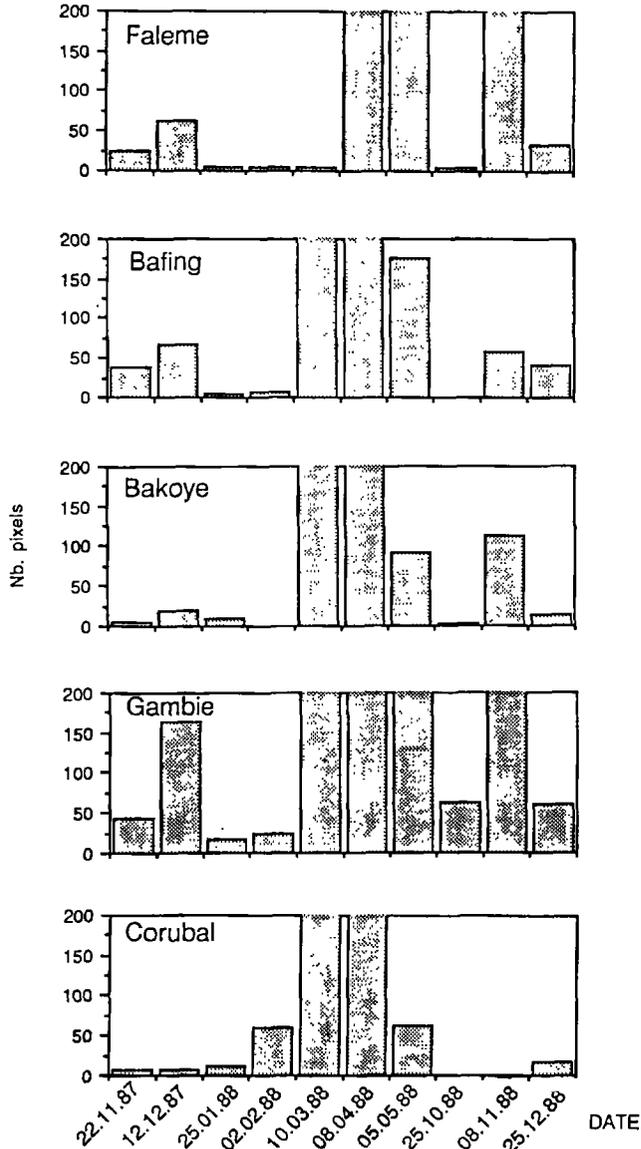


Figure 5. Nombre de pixels à saturation dans le canal AVHRR-3

cette période de l'année, il faudrait s'appuyer sur les données des canaux 4 et 5. Les travaux actuels s'orientent dans cette direction.

Il est néanmoins possible d'évaluer l'intensité respective des deux processus.

Ainsi, le Corubal montre essentiellement des feux de fin de saison sèche pour la saison 1987-1988 (novembre 1987 à mai 1988). Il en est de même pour le Bakoye. Bafing et Faleme montrent également un déséquilibre vers les feux tardifs, mais avec une intensité des feux précoces non négligeable par rapport à celle observée sur le Corubal et le Bakoye.

La situation la plus critique s'observe sur la Gambie où, aux feux tardifs de mars à mai 1988, s'ajoute un important épisode de feux en novembre 1987.

La figure 6 montre le bilan du phénomène feu pour la première moitié de la saison sèche, de novembre 1987 à février 1988 : étant pondérées par la surface des bassins concernés, ces données permettent de cerner l'impact réel du feu sur le milieu. Faleme, Bafing et Gambie montrent plus ou moins le même bilan. Le Bakoye suit un calendrier identique mais avec une intensité moindre. Le Corubal présente une situation moins critique en début de saison sèche mais a tendance à rejoindre les autres bassins à la fin de la période considérée.

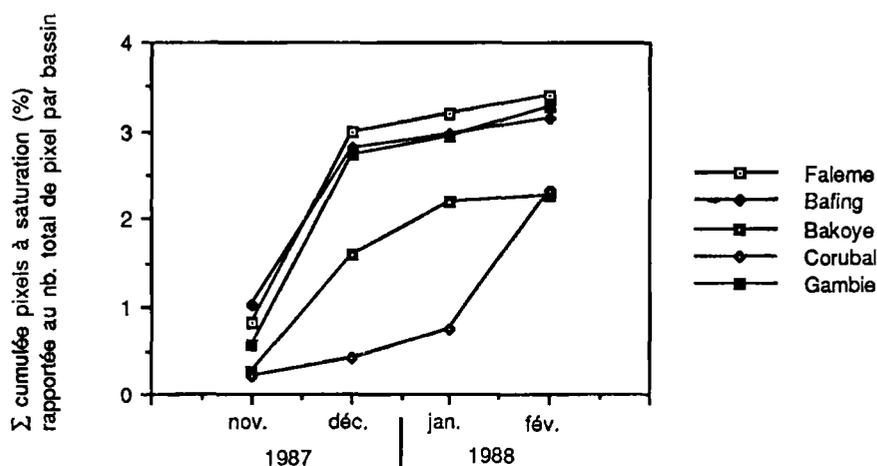


Figure 6. Évolution du nombre de pixels à saturation dans le canal AVHRR-3 entre novembre 1987 et février 1988 (somme cumulée pondérée par le nombre total de pixels de chaque bassin)

Au même titre que la variabilité des états de surface, mentionnée au point 3.2, un indice de feu cumulé peut constituer le second paramètre de suivi systématique des états de surface sur les grands bassins d'Afrique de l'Ouest.

Un autre élément intéressant de la figure 5 est le grand nombre de pixels dont le compte numérique est à saturation au mois de novembre 1988 sur les bassins de la Faleme, du Bakoye et de la Gambie. La différence par rapport à la situation de novembre 1987 est importante. Or ceci ne peut être entièrement dû à l'absence d'intercalibration entre les données fournies par NOAA 9 (jusqu'en octobre 1988) et celles de NOAA 11 (à partir de novembre 1988). En effet, les situations de décembre 1988 et décembre 1987 sont très comparables. Il y a donc bien eu des épisodes de feux précoces particulièrement importants sur ces bassins pour la saison sèche 1988-1989. Le suivi de la situation dans le deuxième tiers de la saison sèche 1988-1989 devrait permettre de dire si à ceci s'ajoute un accroissement des feux tardifs ou si au contraire il y a eu modifications des calendriers de feu au profit des feux précoces.

4 Conclusions et perspectives

Les données enregistrées par le capteur AVHRR ont montré les possibilités qu'elles offraient pour la caractérisation des changements saisonniers des états de surface pouvant avoir des répercussions sur les écoulements. Elles ont montré également leur capacité à fournir

l'information au niveau de perception requis dans le contexte de l'Afrique de l'Ouest qui ne peut être que régional.

Le travail réalisé sur les affluents du Haut Sénégal, sur la Gambie et le Corubal indique que, partant de ces enregistrements, des indices ou des paramètres descriptifs des changements d'état de surface peuvent être définis : en particulier les variations temporelles de l'hétérogénéité spatiale et l'indice de feu cumulé en fin de saison sèche.

Dans le cas spécifique de l'impact des feux de brousse, il est possible de vérifier l'importance relative des feux précoces et des feux tardifs.

Enfin, il apparaît qu'un suivi des conditions de milieu sur de grands bassins peut aider à définir les régions prioritaires pour les aménagements à fins hydrologiques.

Le travail actuel s'oriente vers la constitution d'une banque de données regroupant, pour quelques grands bassins d'Afrique de l'Ouest, cinq paramètres permettant de caractériser les états de surface : l'indice de végétation normalisé, l'albédo, la température de brillance, l'indice de feu cumulé et un paramètre descriptif des changements temporels de l'hétérogénéité spatiale.

Une telle banque de données, dont la référence géographique est le bassin versant, devrait venir en complément aux banques de données hydro-météorologiques existantes.

Sur le plan de la recherche, trois axes mériteraient d'être suivis : 1) la définition des niveaux de perception spatio-temporels les plus appropriés pour une intégration de la télédétection spatiale, comme source d'information, et des modèles hydrologiques d'écoulements ou de transports solides; 2) la recherche de critères permettant de quantifier la dégradation d'un milieu; 3) les apports possibles de ce type d'études dans les programmes traitant des changements planétaires.

5 Références

- AMAN, A., F. LAVENU, A. PODAIRE, G. SAINT, J.-C. MENAUT, J.-P. PUYRAVAUD, G. MERSADIER, G. SERPANTIE et L. TEZENAS DU MONTCEL, 1989. Étude de la production primaire de différentes savanes : apport des images à haute résolution SPOT XS et Landsat-TM. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection, n° 114 (1989-2), p. 40-44.
- BELWARD A. S. et E. LAMBIN, 1989. Limitations to the identification of spatial structures from AVHRR data. —International Journal of Remote Sensing, sous presse.
- FREDERIKSEN, P., S. LANGAAS et M. MBAYE, 1989. NOAA-AVHRR and GIS-based monitoring of fire activity in Senegal, a provisional methodology and potential applications. —Third International Symposium on Fire Ecology, Freiburg University, p. 16-20.
- GRÉGOIRE, J.-M., S. FLASSE et J. P. MALINGREAU, 1988. Évaluation de l'action des feux de brousse, de novembre 1987 à février 1988, dans la région frontalière Guinée-Sierra Leone; Exploitation des images NOAA-AVHRR. —Publication n° SPI 88.39, Centre commun de recherche de la CCE, Ispra, Italie, 23 p.
- GRÉGOIRE, J.-M., 1989. Effect of the dry season on the vegetation canopy of some river basins of West Africa as deduced from NOAA-AVHRR data. —Hydrological Sciences Journal, sous presse.
- GUILLEMYN, D., 1989. Le dépérissement des mangroves en Gambie, vu par SPOT. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection, n° 114 (1989-2), p. 56-58.
- JACQUEMINET, C., C. MERING, Y. PONCET et M.-F. COUREL, 1989. Étude quantitative des formes d'organisation spatiale du couvert ligneux en milieu sahélien à partir des images satellitaires SPOT. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection, n° 114 (1989-2), p. 20-22.

- JUSTICE, C. O. (réd.), 1986. Monitoring the grasslands of semi-arid Africa using NOAA-AVHRR data. —International Journal of Remote Sensing, Special Issue, vol. 7, n° 11, p. 1383-1622.
- KITE, G., 1989. Using NOAA data for hydrologic modeling. —IGARSS'89, Vancouver, vol. 2, p. 553-557.
- LANGAAS, S. et K. MUIRHEAD, 1988. Monitoring bushfires in West Africa by weather satellites. — 22nd International Symposium on Remote Sensing of Environment, Abidjan, p. 253-266.
- MALINGREAU, J. P. et C. J. TUCKER, 1988. Large-scale deforestation in the southeastern Amazon Basin of Brazil. —AMBIO, vol. 17, n° 1, p. 49.
- MATSON, M., S. R. SCHNEIDER, B. ALDRIGE et B. SATCHELL, 1984. Fire detection using the NOAA series satellites. —Technical Report NESDIS 7, USDC-NOAA, NESDIS, Washington.
- RANGO, A., A. FELDMAN, T. S. GEORGE et R. M. RAGAN, 1983. Effective use of Landsat data in hydrologic models. —Water Resources Bulletin, vol. 19, n° 2, p. 165-174.
- RASMUSSEN, K., 1989. The CHIPS software package. —CHIPS newsletter n° 1, Institute of Geography, University of Copenhagen.
- SADOWSKI, F. G. et D. E. WESTOVER, 1986. Monitoring the fire-danger hazard of Nebraska rangelands with AVHRR data. —Tenth Canadian Symposium on Remote Sensing, Edmonton, vol. I, p. 355-363.
- SALOMONSON, V. V., 1989. Spaceborne technology contributions to hydrological studies in the context of global change. —IGARSS'89, Vancouver, vol. 2, p. 539-541.
- SOLOMON, S. I., A. PIETRONIRO, W. WISHART, S. PIEYNS, B. GUILLOT et M. CARN, 1988. Application de la télédétection à l'évaluation des ressources en eau du Sahel. —Veille climatique satellitaire, n° 24, p. 26-37.
- STEPHENS, G. et M. MATSON, 1987. Regional and global fire detection using AVHRR data. —21st International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, p. 447-457.

10

L'expérience communautaire en matière d'utilisation de la téledétection dans la lutte contre la sécheresse et la désertification en Afrique de l'Ouest

ROBERT GRÉGOIRE

Direction générale du développement, Commission des communautés européennes, 200, rue de la Loi, 1049 Bruxelles, Belgique, téléphone : 235-11-11, télécopieur : 236-27-25, télex : COMEU B 21877

Résumé

Dans les régions soudanaises et sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest, une longue saison sèche annuelle fait que l'eau est l'élément déterminant de l'écologie locale. De tout temps, l'homme a cherché à s'adapter à ce contexte peu favorable à la vie rurale, mais une sécheresse plus marquée, se superposant à l'explosion démographique, a ouvert aujourd'hui la route à la désertification. La lutte contre ce fléau est une des priorités de la politique communautaire menée en Afrique de l'Ouest en collaboration avec les États de la sous-région. Un gros effort est fait dans ce sens pour répondre à l'ampleur du problème depuis la Convention d'association Lomé III et s'amplifiera sous Lomé IV qui sera signée fin décembre 1989. Les techniques de téledétection y tiennent une place importante pour suivre, dans le temps et dans l'espace, l'évolution du phénomène pour mettre rapidement en évidence les secteurs sur lesquels il faut concentrer l'effort. À titre d'exemples, on peut citer les études menées par une dizaine d'instituts européens pour mieux cerner la dynamique des phénomènes de désertification au sud du Sahara afin de déboucher sur une carte de sensibilité à la désertification des principales entités écologiques et un projet d'aménagement de bassins versants en Guinée afin de limiter les risques d'érosion en vue d'une régulation des débits des grands fleuves de l'Afrique de l'Ouest. Mais reste posé le problème du transfert de technologie car la plupart des pays n'ont pas le personnel et surtout les équipements nécessaires pour une utilisation rationnelle des informations que fournit la téledétection.

1 Sécheresse et désertification en Afrique de l'Ouest

1.1 Définitions et principales caractéristiques dans l'espace et dans le temps

En Afrique de l'Ouest, la sécheresse, l'absence ou la diminution du volume d'eau tombé sous forme de pluie ou véhiculé par des fleuves venus de zones plus humides, a toujours été un des éléments déterminants des différentes strates climatiques à l'exception de la zone côtière. Celles-là se caractérisent annuellement par une plus ou moins longue saison sèche qui peut atteindre neuf mois au Sahel et, dans tous les cas, 6 à 7 mois dans les autres zones climatiques; l'autre saison, dite d'«hivernage», se caractérise par des pluies tombant en averses violentes, de répartition irrégulière dans le temps et l'espace, le volume global diminuant du sud au nord.

Telle qu'on la perçoit actuellement, la sécheresse n'est qu'une accentuation de ces phénomènes : la période pluvieuse se contracte dans le temps et surtout le volume d'eau tombé diminue tandis que la répartition des pluies, dans le temps et dans l'espace, devient encore plus irrégulière en allant du golfe du Bénin vers le rebord sud du Sahara.

Si globalement le volume des pluies semble diminuer quand on l'analyse sur des périodes de plusieurs siècles, voire de plusieurs millénaires, on peut remarquer des cycles de quelques dizaines d'années où une plus grande sécheresse succède à une période plus pluvieuse. C'est le cas depuis le début des années septante qui fait suite à la phase pluvieuse des années 50 et 60.

La désertification, dont nous donnerons la définition suivante : «évolution négative de la valeur agricole de la terre, qu'elle porte cultures, pâturages ou forêts», se caractérise par une série de phénomènes essentiellement évolutifs dans le temps et l'espace et qui, en Afrique de l'Ouest, porte sur des dizaines de millions d'hectares. La sécheresse n'en est pas la seule cause, même si elle en est la cause principale.

L'homme y joue un rôle important comme accélérateur de phénomènes par les feux de brousse, par le dessouchage des terrains de cultures, par la régression voire la disparition des jachères, par l'introduction de mauvaises techniques culturales qui facilitent l'érosion des sols, par la réalisation inconsidérée d'aménagements hydro-agricoles sans contrepartie pour les troupeaux transhumants, en favorisant la remontée du sel par un mauvais drainage, etc., pour ne citer que quelques causes bien connues.

Et cet homme est aussi bien le paysan ou le pasteur que le décideur national ou étranger, politique ou financier.

1.2 L'homme face à la sécheresse

De tout temps, l'homme a cherché à s'adapter à ce contexte peu favorable à la vie rurale par le nomadisme, les cultures de décrue et plus récemment les aménagements hydro-agricoles et l'utilisation de plantes à cycle court. Par ailleurs, par le parcage des animaux et les longues jachères voire le découpage des champs en bocage, l'utilisation des arbres fourragers pour assurer le couvert des terrains de culture et l'étalement dans le temps des ressources fourragères, il essayait d'améliorer la structure physique du sol pour lui permettre de conserver le maximum d'eau à mettre à la disposition des cultures entre chaque pluie, tout en créant un microclimat luttant contre les longues périodes où souffle un vent sec et chaud, l'harmattan.

Une sécheresse plus marquée dans le temps et dans l'espace, une explosion démographique chez l'homme et le croît excessif de ses troupeaux, un certain contexte

économique ont fait sauter ces frêles barrières que l'homme essayait de dresser contre un climat où l'eau a toujours été la caractéristique prédominante.

Les conséquences graves pour l'homme de cette conjonction de faits, qui souvent n'avaient pas à l'origine de rapport entre eux, ont été largement mises en évidence par les médias donnant ainsi l'impression qu'il s'agissait d'une situation nouvelle alors que l'on peut retrouver des périodes de plus grande sécheresse pendant les deux guerres mondiales (1914-1918 et 1939-1945) et à la fin du XIX^e siècle pour ne citer que des exemples récents.

La période de sécheresse actuelle a été en outre marquée par deux phénomènes qui, eux, sont nouveaux : l'exode rural vers les villes, villes nullement préparées à recevoir une telle masse d'hommes ruraux et dans tous les cas étant incapables de créer des emplois en nombre suffisant. Cette concentration excessive des hommes a eu des conséquences très graves sur l'écologie péri-urbaine, notamment par le déboisement qu'elle a entraîné pour satisfaire les besoins énergétiques familiaux et artisanaux brutalement croissants.

Le deuxième phénomène est l'émigration sauvage de nombreux pasteurs et paysans soudano-sahéliens, habitants du plateau Mossi par exemple, vers les zones plus arrosées, situées à la limite nord de la forêt subhumide, où ils s'installent à demeure détruisant une région à écologie fragile mais qui, jusqu'alors, protégeait les zones vraiment humides bordant le golfe de Guinée. Située autour des isohyètes 1 000 à 1 500 mm et à cheval sur le dixième parallèle nord, cette zone a été ouverte aux hommes et à leurs animaux par l'éradication de l'onchocercose et, dans une moindre mesure, de la maladie du sommeil. Il est urgent d'y intervenir massivement, si l'on veut s'en servir comme d'une vraie zone d'accueil des hommes et des animaux fuyant la sécheresse sans que ceci n'entraîne la destruction, comme c'est le cas actuellement, de cette ultime barrière de protection contre «l'avancée du désert».

Enfin, il faut noter que l'on assiste, depuis qu'une amélioration relative du climat s'est faite jour vers la fin de la décade 80, à une certaine remontée des nomades vers le Sahel steppique, tandis que les gouvernements locaux, appelés à traiter de problèmes urgents à court terme, risquent de se démobiliser en partie et donc de ne pas utiliser cette situation relativement favorable sous le plan climatique pour lutter plus efficacement contre les effets de la sécheresse notamment par des plantations d'arbres sur les champs de cultures et par une meilleure gestion de la forêt naturelle. Dans la négative, on risque de se retrouver, lors de la prochaine période sèche, dans une situation encore plus dramatique que celle que nous avons connue récemment.

2 La politique communautaire en matière de lutte contre la désertification

De la communication de la Commission au Conseil européen en octobre 1981 «Pour un plan d'action contre la faim dans le monde», à celle au Conseil de Luxembourg d'avril 1986 «Protection des ressources naturelles et lutte contre la désertification en Afrique», en passant par le conseil des Chefs d'État de Milan en juin 1985, la participation aux trois réunions du COMIDES à Dakar et Alger en septembre 1984, novembre 1985 et juin 1988, à Silva, à Paris en janvier 1986, aux conférences africaines sur l'environnement du Caire en décembre 1985 et de Nairobi, la Communauté européenne a montré, à chacune de ces occasions, l'intérêt qu'elle portait à ces graves questions intimement liées : lutte contre la faim et défense des facteurs naturels de production (Commission des communautés européennes, 1986).

Mais il faut noter aussi, le glissement d'une priorité à court terme, lutter contre la faim au début des années 80, à celle à plus long terme à partir de l'année 1986 qui, tout en gardant

cet objectif, cherche à protéger les facteurs naturels de production que sont l'eau, le sol et le microclimat.

Après avoir lutté contre les conséquences immédiates de la désertification, on concentre donc l'effort sur ce qui apparaît comme étant un moyen privilégié de lutte contre ce phénomène.

Tout ceci se retrouve dans la mise en oeuvre de la politique communautaire :

- le court terme : le plan d'urgence (1983 et 1984);

- le moyen terme : le programme de relance et de réhabilitation (1985-1986);

- le long terme : le plan d'action européen à long terme contre la sécheresse et la désertification en Afrique.

Dans le cadre de la Convention de Lomé III, les programmes indicatifs nationaux et régionaux des pays de l'Afrique de l'Ouest, ainsi que les réunions des Ordonnateurs nationaux du Fonds européen de développement à Praia (Ile du Cap Vert) en octobre 1986 et à Cotonou (Bénin) en mars 1987, ont permis de concrétiser, pour la sous-région de l'Afrique de l'Ouest, la volonté exprimée dans le plan d'action en donnant les moyens financiers indispensables.

La future convention Lomé IV, dont la négociation entre États ACP et CEE se termine, donnera elle aussi - parmi ses objectifs prioritaires - une place importante à la lutte contre la désertification et la sécheresse; mais celle-ci sera un élément d'un objectif plus vaste celui de la «Défense de l'environnement et de protection des facteurs naturels de production». L'expérience a en effet montré que les zones urbaines et industrielles et les zones rurales humides sont elles aussi gravement confrontées au problème de la dégradation de leur environnement.

3 La lutte contre la sécheresse et la désertification

3.1 Que peut-on faire contre la sécheresse en tant que phénomène climatique?

Nous nous trouvons largement désarmés quand il s'agit d'enrayer la sécheresse en tant que phénomène climatique car ses causes connues et donc leurs modifications éventuelles - au moins pour le présent et le proche avenir - dépassent les capacités techniques humaines. Pourtant, il nous est en principe possible de peser partiellement sur le volume d'eau tombé dans les régions soudano-sahéliennes. Il est en effet actuellement admis que la forêt humide constituant une épaisse ceinture autour du golfe de Guinée rejette dans l'atmosphère une partie des précipitations importantes qu'elle reçoit et que cette vapeur d'eau constituerait jusqu'à 30% du volume d'eau tombé sur les zones plus sèches situées au nord, entre le 12° et le 16° parallèles, dans la mesure où le front intertropical remonte suffisamment haut en latitude. Il s'agirait donc de préserver cette forêt dont la superficie s'amenuise rapidement sous les coups de buttoir de l'homme qui ne la gère pas d'une manière satisfaisante se contentant dans la plupart des cas de l'exploiter sans souci du futur.

En outre, sur son front nord, cette forêt humide se prolonge par une forêt tropicale sèche ou humide de transition qui lui fait un écran protecteur vis-à-vis de l'agressivité du climat soudano-sahélien.

Depuis la dernière sécheresse, cette bande de terrain à dominante forestière, qui s'étend de chaque côté du 10° parallèle nord, est en train d'être largement entamée par l'homme et son bétail fuyant la sécheresse et par les feux sauvages qu'il allume. Ce phénomène de migration spontanée a été favorisé par l'éradication de l'onchocercose le long des nombreux fleuves et rivières qui la traversent.

Il devient extrêmement urgent de mettre sur pied un véritable plan d'aménagement de ce double espace forestier si l'on veut sauver ce qui est encore sauvable et ainsi notamment assurer le maintien des précipitations sur les régions plus au nord. La tâche est immense dans le temps et dans l'espace mais il est nécessaire de s'atteler à sa mise en oeuvre.

À l'autre extrémité de l'échelle des superficies, il faut s'efforcer de maintenir ou de reconstituer des microclimats par la mise en oeuvre ou la revitalisation de toute une série de techniques qui protègent les plantes cultivées contre les vents chauds et secs (brise-vent, cultures alternées, bocages) ou plus simplement la terre arable contre le soleil, par un couvert arboré plus ou moins dense en saison sèche mais qui ne gêne pas les cultures en saison des pluies comme par exemple, en utilisant le *Faidherbia albida* là où ses exigences de sol et d'eau le permettent.

Ces microclimats, qui ne sont souvent que la conséquence d'une bonne gestion par l'homme de la terre, de l'eau et de la végétation naturelle dont il dispose, sont généralement à dimension humaine et, à ce titre, sont un des éléments constitutifs du terroir villageois ou pastoral.

3.2 Que peut-on faire et surtout comment doit-on agir contre les processus de désertification?

S'il est difficile de lutter contre la sécheresse en tant que telle, il est par contre plus aisé - sous certaines conditions - de lutter contre ses effets négatifs sur l'agriculture ou plus largement sur la vie rurale.

La plupart des thèmes techniques à mettre en oeuvre sont bien connus et ont été suffisamment expérimentés sur le terrain pour que l'on puisse en affirmer le bien-fondé et pourtant le désert «avance» toujours car les actions énoncées ne sont pas à la «démésure» dans le temps et dans l'espace des processus de désertification, pour lesquels on doit parler en millions d'hectares, alors que l'impact géographique des actions menées se compte en milliers voire tout au plus et, très récemment, en dizaines de milliers d'hectares.

Compte tenu des moyens humains et financiers limités, il faudra concentrer géographiquement les interventions sur les zones écologiquement bien délimitées où le potentiel agricole reste réel, humainement mobilisable et où l'effet d'entraînement sur les régions voisines sera le plus grand pour se rapprocher le plus possible de l'échelle à laquelle se joue l'impact sécheresse. Il est nécessaire en effet d'atteindre une certaine «masse critique», en deçà de laquelle, la pesanteur de l'homme et des facteurs écologiques défavorables finira par faire disparaître l'action réalisée. Cette masse critique devrait selon le cas, dépasser les dizaines de milliers d'hectares, voire les centaines de milliers et ce, le plus rapidement possible afin de gagner de vitesse l'extension des phénomènes de désertification dont le processus est heureusement assez lent. Ceci postule que les interventions soient maintenues pendant des dizaines d'années. Notons que la prodigieuse capacité de récupération des groupements végétaux en zone soudano-sahélienne, dès que les conditions écologiques s'améliorent, montre que la lutte peut ne pas être vaine.

Si l'homme au sens très large du terme, c'est-à-dire aussi bien le paysan que le décideur politique ou financier, est un des éléments les plus actifs du processus de désertification, il est seul capable de le ralentir, voire de le stopper. Pour ce faire, il faut qu'il s'engage, volontairement et en toute connaissance de cause, dans la lutte à mener et ce, pour de longues années. Ce n'est qu'à ces conditions que la participation de la population, véritable préalable au succès dans la lutte à mener, deviendra réalité.

Sur le terrain, ceci postule d'asseoir les actions à mener sur la notion de «terroir villageois» ou de «terroir pastoral», comme la plus petite zone d'intervention géographique pour l'aménagement de l'espace.

L'excellente connaissance des éléments constitutifs de cette aire géographique à dimension humaine et notamment, de tous les problèmes qu'elle lui pose, doit permettre au groupe d'humains concerné de bâtir avec des appuis extérieurs un nouvel équilibre écologique, qui bloquera les processus de désertification et les conséquences néfastes de la sécheresse.

Il importe que ce nouvel équilibre écologique touche rapidement un très grand nombre de terroirs qui, s'épaulant mutuellement, devraient permettre d'atteindre la masse critique dont il est question plus haut.

4 La place des techniques de télédétection

Il importe de préciser avant tout développement sur cette question qu'il s'agit du point de vue de l'utilisation du client de ces techniques.

4.1 Caractéristiques principales de ces techniques

L'importance du facteur superficie, celle du suivi dans le temps et dans l'espace de phénomènes essentiellement dynamiques, l'urgence qu'il y a à intervenir, la difficulté à obtenir des séries d'informations fiables privilégient les techniques de télédétection dans l'éventail des instruments dont on dispose.

Et ce d'autant plus que, malgré une prise de conscience maintenant assez générale des problèmes que pose la désertification, l'homme est encore perdant dans la course dramatique qui se joue entre l'extension de ces phénomènes et la lutte menée pour les freiner, ou même pour les arrêter.

Les techniques de télédétection satellitaire permettent en effet une vue d'ensemble de certains phénomènes terrestres ainsi que de ses ressources naturelles.

En outre, la répétitivité de ces informations donnent une vision dynamique des phénomènes observés.

4.2 Leur champ d'application possible au titre de la lutte contre la sécheresse et sa première conséquence : la désertification

Au titre de la connaissance du milieu naturel et des ressources renouvelables ou non pour :

- hydrologie des rivières et fleuves, suivi des crues;
- inventaire et suivi des mares pérennes ou non en zone steppique;
- inventaire et évolution des superficies boisées, en pâturage, cultivée ou en jachère pour une écologie donnée;
- suivi et contrôle des feux de brousse;
- analyse dynamique de la phytomasse et charge en bétail pour les pâtures sahéliennes et soudaniennes;
- identification et suivi des zones à haut risque d'érosion.

Au titre de la connaissance des phénomènes météorologiques dans leur relation avec une bonne gestion du milieu dans :

- la prévision des disponibilités en eau de crue des fleuves;
- le bilan hydrique par zone écologique aussi homogène que possible;
- Pour la cartographie :
 - mise à jour rapide et économique des documents cartographiques face au déplacement de l'habitat humain ou de l'occupation des sols par exemple;
 - établissement de documents thématiques : pâturages, etc.;
- Pour la démographie :
 - migration, nomadisme, amorce de la sédentarisation, etc.

4.3 Condition d'utilisation pratique de la télédétection : les limites d'emploi

Il est très vite apparu que si l'on veut pouvoir exploiter toutes les potentialités de la télédétection, il importe :

- 1) de bénéficier d'un éventail de capteurs ayant des caractéristiques diverses notamment dans les domaines de la résolution au sol et de la résolution spectrale;
- 2) de recevoir le plus rapidement possible les informations satellitaires.

Ce sont ces raisons qui ont amené la Communauté, à l'aide du budget Commission, à financer la mise à hauteur de la station de Mas Palomas aux îles Canaries pour lui permettre de recevoir, en direct, les satellites Landsat, NOAA-AVHRR et SPOT, et ce, pour la quasi-totalité de l'Afrique de l'Ouest.

En outre, cette station a reçu, depuis 1987, les équipements nécessaires pour assurer les prétraitements des données et la fourniture des «quick-looks».

Grâce à ces équipements complémentaires, un grand progrès a été fait au point de vue rapidité de transmission des informations satellitaires vers les laboratoires européens de traitement des images (de 2 à 3 mois à 10 jours). Mais c'est encore trop lent pour pouvoir intervenir en temps utile, c'est-à-dire presque réel dans certains domaines tels que : la prévision des crues, le suivi des cultures, superficies notamment, en vue d'une estimation de la production, etc.

La situation est encore plus préoccupante pour l'utilisation par les bénéficiaires finaux des informations résultant du traitement des images. On peut dire qu'actuellement, à quelques exceptions près, l'information reste presque intra-européenne malgré les programmes de formation de spécialistes nationaux, exécutés au CRTO (Centre régional de télédétection de Ouagadougou, Burkina Faso) par exemple, ou en Europe. Car les structures nationales spécialisées dans le domaine des techniques de télédétection et qui devraient servir d'interface avec l'utilisateur final sont quasi inexistantes ou dotées de moyens encore insuffisants, si l'on fait exception du Sénégal.

Ceci a une première conséquence : les utilisateurs thématiques qui sont le dernier maillon de la chaîne et qui, souvent, ont reçu une bonne formation perdent rapidement leur connaissances techniques, faute de les mettre en pratique.

Une deuxième conséquence, complémentaire de la première, est le manque d'informations sur ces techniques qui sont incomprises ou mal comprises par les décideurs politiques et techniques du développement, soit qu'ils les considèrent comme un luxe ou les jugent trop sophistiquées pour les pays en voie de développement, soit qu'ils y voient une solution miracle à tous les maux, ce qui n'est pas mieux.

Un autre point important est la distorsion croissante entre la masse énorme d'informations fournies par les satellites, après traitement des données, les moyens importants qu'il faut mettre en oeuvre pour accéder aux satellites, pour traiter et transmettre les informations, et l'usage - pour l'instant très limité - qui en est fait concrètement sur le terrain ou plus simplement au niveau des projets où ces techniques interviennent.

On a le sentiment d'être en présence d'une chaîne dont les premiers maillons sont particulièrement solides et bien attachés les uns aux autres ou sont au moins en voie de l'être, tandis que les autres maillons sont extrêmement légers et peu soudés les uns aux autres.

Si nous ne renforçons pas cette deuxième partie de la chaîne, l'emploi de la télédétection, pourtant si nécessaire dans la lutte contre la désertification, restera marginal : on est en droit de se demander, par exemple, si ce bel outil si riche en potentialité qu'est la station de Mas Palomas ne doit pas être complété d'urgence par un réseau de structures nationales spécialisées dans ce domaine et servant d'interface active à l'utilisateur final pour :

- transmission des questions et demandes de la base;
- diffusion et adaptation à la situation locale des informations reçues de l'extérieur;
- coordination à l'échelon national des programmes de télédétection;
- valorisation de la formation des spécialistes formés ailleurs en les insérant dans une structure où leur capacité technique trouve à s'employer voire à se développer.

Il va sans dire que la prise en charge financière de ces structures devra être le fait, pour encore de nombreuses années, de l'aide extérieure, comme cela est le cas pour Mas Palomas et les relais régionaux du CRTO ou d'AGRHYMET qui eux aussi souffrent de la faiblesse du maillon national (Grégoire, 1984).

5 Quelques exemples de projets financés par la Communauté économique européenne et mettant en oeuvre des techniques de télédétection

5.1 Études «Caractérisation par les techniques de télédétection de la dynamique de la désertification à la périphérie sud du Sahara»

Si la dégradation des facteurs de production a été particulièrement remarquée pendant la phase de forte sécheresse de la période 1973-1984, cette dégradation est malheureusement un élément permanent auquel sont confrontés les pays de la périphérie du Sahara en Afrique de l'Ouest.

C'est donc une des composantes fondamentales sur lesquelles les gouvernements concernés doivent asseoir leurs réflexions en matière de développement rural et bâtir leur stratégie d'intervention.

Pour aider ces gouvernements dans leur lutte contre la désertification, la Commission des Communautés européennes finance depuis 1984 sur son budget propre un programme régional d'études destiné à mieux appréhender la dynamique des principaux phénomènes qui caractérisent la désertification.

L'ampleur de la zone géographique concernée, le caractère évolutif des phénomènes à étudier, l'insuffisance d'informations chiffrées fiables en matière de dégradation de l'environnement, ont tout naturellement poussé à utiliser largement les techniques de télédétection, en étudiant les possibilités réelles pratiques et les procédures optimales de transfert de cette technologie en Afrique soudano-sahélienne.

D'une manière plus spécifique, ce programme a pour objectif de développer, tester et démontrer la contribution de la télédétection à l'étude de la désertification et de déterminer les procédures optimales pour transférer la technologie en Afrique.

Le groupe d'étude constitué par les instituts de recherches de sept pays membres de la Communauté (Italie, Belgique, France, Danemark, République fédérale d'Allemagne, Royaume-Uni et Irlande) travaille sur les thèmes suivants :

- estimation des précipitations d'après les données satellitaires au Niger;
- suivi continu de l'érosion éolienne au Mali;
- estimation de biomasse ligneuse dans la zone d'impact des grandes villes soudano-sahéliennes (au Mali et au Burkina Faso);
- suivi continu des pâturages sahéliens au Niger;
- exploration de eaux souterraines dans l'Adrar des Iforas au Mali;
- modélisation hydrologique du Haut-Sénégal en Guinée et au Sénégal;
- études du bilan énergétique et hydrologique au Sénégal, Niger et Burkina Faso;
- développement d'un système bon marché de traitement des données et d'images satellitaires adapté aux conditions locales, le logiciel CHIPS, pour permettre un suivi continu de l'environnement au Sahel et qui, pour l'instant, n'est utilisé que par le Centre de suivi écologique de Dakar.

Les projets ont utilisé des données provenant de différentes plates-formes et divers capteurs dont Landsat MSS/TM, NOAA-AVHRR, Météosat, SPOT et MOS-1. Les stations de réception Landsat, NOAA et SPOT à Maspalomas, récemment installées, ont considérablement amélioré la couverture des données à l'intérieur de la région qui dispose par ailleurs d'une station de réception NOAA-AVHRR à Niamey (Niger).

Les études se sont concentrées sur l'Afrique sub-saharienne, particulièrement sur le Sénégal, le nord de la Guinée, le Mali, le Niger et le Burkina Faso mais sont conçues de telle façon qu'elles ont vocation pour l'ensemble de la sous-région soudano-sahélienne.

Les principales difficultés rencontrées se situent au niveau de la fourniture des images, Landsat TM et MOS notamment, et des échanges d'informations entre les différentes équipes d'études, ce qui augmenterait considérablement l'efficacité de chacune (Justice et Prince, 1987). Un progrès important a été fait dans ce sens en 1988 et 1989 et il est prévu une réunion générale de fin de la tranche d'études en cours en 1990 au Centre commun de recherche d'Ispra à laquelle devraient participer, outre les équipes de recherches et la Commission, des représentants d'AGRHYMET, du CRTO de Ouagadougou (Burkina Faso) et de services nationaux susceptibles d'utiliser les premiers résultats.

En effet, il s'agit maintenant de déterminer ensemble, scientifiques européens et africains, les procédures optimales pour transférer la technologie mise au point sur l'ensemble de la zone soudano-sahélienne.

Dans le même esprit, mais plutôt destiné aux décideurs politiques et financiers, aux planificateurs et aménagistes, etc., sera établi en 1990 un document qui, tout en gardant valeur scientifique, donnera les résultats obtenus et les orientations souhaitables sous une présentation qui en rendra la lecture possible aux non-spécialistes de ces questions.

5.2 Projet régional d'aménagement de bassins versants élémentaires en Guinée : Fouta Djallon et haut bassin du fleuve Niger

5.2.1 Problématique

La plupart des grands fleuves soudano-sahéliens prennent leurs sources en Guinée, dénommée pour ce fait, le château d'eau de l'Afrique de l'Ouest. C'est aussi en Guinée qu'ils reçoivent l'essentiel de l'eau qu'ils vont véhiculer plus au nord dans les régions moins arrosées et pour lesquelles, ils représentent une potentialité de production agricole très importantes : potentiel qu'essaient de mobiliser les nombreux aménagements hydro-agricoles réalisés ou prévus dans leurs lits majeurs (>500 000 hectares).

Malheureusement, ces fleuves ont un régime de plus en plus torrentiel avec des crues très variables d'une année à l'autre, pouvant avoir des pointes très marquées mais, dans la plupart

des cas, peu étalées dans le temps, gênant considérablement la mise en eau des aménagements. Notons que deux barrages, d'ailleurs à vocation première hydro-électrique, Sélingué sur le Sankarani, affluent du Niger, et Manantali sur le Bafing, affluent du Sénégal, devraient jouer un certain rôle régulateur.

Les raisons de cette dégradation du régime des fleuves sont diverses mais deux raisons semblent prédominer :

- une modification climatique en Guinée où le volume des pluies a diminué depuis une dizaine d'années de 100 à 200 mm suivant les lieux et même 700 mm les années les plus sèches, avec un rétrécissement marqué de la période pluvieuse;

- une dégradation du couvert arboré, particulièrement marquée au Fouta Djallon sous la triple pression de feux de brousse sauvages, des défrichements pour mise en culture, de la dent d'un bétail domestique dont l'importance numérique va croissante.

S'il n'est pas possible présentement de modifier le climat, il est possible d'en atténuer les effets négatifs et surtout, il est possible de freiner, et peut-être à long terme, d'arrêter la dégradation du couvert arboré, et donc de lutter contre la dégradation des facteurs naturels de productions en zones agricoles.

On connaît actuellement l'essentiel des techniques permettant de freiner, voire d'arrêter, le processus de dégradation : d'ailleurs quelques applications réussies font apparaître, de ci de là, des oasis de verdure au milieu d'immenses régions de plus en plus dégradées.

La région géographique concernée, plateau du Fouta Djallon et piémont des massifs montagneux frontaliers avec la Sierra Leone et le Libéria, couvre environ 150 000 km² soit 15 000 000 d'hectares, mais les effets se font indirectement sentir en zone soudano-sahélienne sur des superficies encore plus grandes. C'est dire l'ampleur des problèmes auxquels il importe de s'attaquer. Et ce n'est donc qu'en travaillant à cette même échelle, que l'on peut espérer avoir un certain effet, à moyen terme, sur cette situation.

Parallèlement à cela, seule une participation généralisée des populations rurales à la mise en oeuvre des techniques de défense et restauration des sols peut permettre, avec les moyens financiers dont on dispose, de toucher des superficies importantes, ce qui a comme corollaire que ces techniques doivent être simples, peu onéreuses pour pouvoir être reproductibles aisément, mais aussi que les populations y trouvent, à cette occasion, solution à leurs problèmes immédiats.

Ce sont ces différentes contraintes qui sont à la base de la méthode mise en oeuvre pour exécuter le programme d'aménagement des hauts bassins versants en Guinée, première tranche. Celle-ci concerne :

- la réalisation d'un premier train d'études en vue d'aménagements sur 250 000 hectares;
- la réalisation d'un aménagement de l'espace sur ces 250 000 hectares dans les quatre années à venir;
- le lancement d'un deuxième train d'études pour une deuxième tranche d'aménagements concernant plus de 500 000 hectares.

5.2.2 La méthode utilisée

La mise en oeuvre s'articule autour de quatre points de référence :

- une cartographie de l'ensemble des bassins versants élémentaires pour un haut bassin donné et un classement des bassins élémentaires en fonction de critères hydro-écologiques;
- une ouverture des populations au dialogue pour qu'elles expriment leurs problèmes et que soient définies avec elles les conditions de leur participation au programme;
- la mise en oeuvre, pour une meilleure gestion de l'espace rural, de techniques simples et sûres, peu onéreuses, pouvant être reproductibles dans l'espace;

- une superficie importante rapidement touchée, même si le résultat à l'unité de surface est médiocre.

Les techniques de télédétection sont à la base du premier et du dernier point et elles seules ont permis au niveau des études, et permettront au niveau des aménagements, d'atteindre ces objectifs dans un laps de temps minimum et à un coût raisonnable.

Leur emploi a été établi par l'Institut de télédétection du Centre commun de recherches d'Ispra en 1985-1988 et rodé sur un premier quadrilatère situé entre Kankan, Kouroussa, Faranah et Kissidougou concernant les bassins versants élémentaires du Niger supérieur, du Niandan, du Mafou et du Milo et couvrant environ 30 000 km². Utilisant images satellitaires Landsat, photographies aériennes au 1:50 000 et cartes au 1:200 000, la méthode a permis de cartographier les limites de 199 bassins élémentaires, d'en effectuer un zonage en huit groupes, en fonction d'un certain nombre de critères hydro-écologiques, enfin de mettre en évidence une quarantaine de bassins élémentaires particulièrement parlant au point de vue «érosion» grâce à la comparaison des images d'avril-mai 1975 et de celles de la même époque de 1985 (Grégoire et Gales, 1987).

Cette période de fin de saison sèche a été choisie afin d'éliminer les effets de la strate herbacée pour le calcul d'indice de végétation normalisée à partir des informations enregistrées par les radiomètres. La synthèse de l'imagerie et de la carte des limites de bassins permet réellement d'avoir à la fois l'information et la localisation de l'information. C'est particulièrement précieux pour les feux de brousse que l'on peut remarquablement suivre en se basant sur les informations satellitaires et plus généralement pour des interventions futures en matière de gestion de l'espace arboré (Grégoire *et al.*, 1988).

La méthode a aussi fourni une série de documents cartographiques permettant de visualiser, à un moment donné, la situation d'un bassin hydrologique, ce qui peut servir de base à une analyse dynamique de l'évolution du milieu. En outre, elle a fait apparaître un certain nombre de sites privilégiés, où l'on peut utiliser des images satellitaires à haute résolution de type SPOT qui seraient très coûteuses si l'on devait les utiliser sur l'ensemble d'un bassin.

Enfin, elle a permis, dans un laps de temps court, de cerner les limites géographiques pour les interventions des équipes socioculturelles et techniques sur le terrain afin de bâtir les avant-projets d'aménagement de l'espace en une année, 1988, avec démarrage des actions au cours de l'année 1989.

Bien sûr, les informations satellitaires ont été confrontées avec la réalité-terrain à l'occasion de missions conjointes sur le terrain par le Centre commun de recherche d'Ispra, les équipes sociologiques et techniques, et les autorités guinéennes qui ont en charge le projet.

Depuis, cette méthode a été appliquée par des bureaux d'études européens sur les hauts bassins du Sankarini, du Bakoy, de la Haute Gambie et de la Koulountou.

5.2.3 Les évolutions prévisibles de la méthode

De toutes les façons, les informations continueront d'être exploitées voire affinées sur les bases suivantes :

- examen non plus des indices de végétation moyens par bassin, mais de la répartition de valeurs d'indices au sein de chaque bassin pour mieux évaluer la superficie de chaque strate de végétation;

- choix de sites d'observation au sol pour un suivi visuel du couvert végétal;

- examen d'une évolution au sens vrai du terme : c'est-à-dire voir comment l'on est passé de la situation de 1975 à celle de 1985; pour cela utilisation des images NOAA-AVHRR de 1981-1985 et même au-delà de cette dernière date, pour une surveillance méthodique des

bassins parallèlement à l'utilisation de données à plus hautes résolutions spatiales type Landsat ou SPOT; les informations NOAA-AVHRR 1981-1985 devraient être opérationnelles en 1990 avec une première évaluation vers juin 1989;

- mise en place, en liaison avec le projet, d'un réseau de stations de collecte automatique hydro-agrométéorologiques.

5.3 Étude méthodologique pour une meilleure gestion de l'eau de surface ou souterraine en Afrique de l'Ouest

5.3.1 Gestion des eaux de surface : exemple : essais de prévisions des crues du fleuve Niger en amont du delta central nigérien

Le problème posé était le suivant : dans le cadre de l'effort que le Mali fait pour satisfaire ses besoins céréaliers, une meilleure maîtrise de l'eau par submersion contrôlée dans les plaines d'inondation du fleuve Niger ensemencées en riz devrait à la fois augmenter la production totale annuelle et surtout en atténuer les variations interannuelles suite à une pluviométrie irrégulière. D'où un programme important d'aménagements hydro-agricoles décidé par le Gouvernement malien et financé par le Fonds européen de développement. Or, malgré l'aménagement de superficies importantes, les résultats étaient loin d'atteindre les espérances, en partie à cause du manque d'informations locales fiables sur la pluviométrie, les superficies, le régime de la crue, etc., et ce qui entraînait un gaspillage d'imputs annuels très important et un mauvais emploi des investissements réalisés.

Compte tenu du contexte local, l'on s'est tourné vers les techniques de télédétection, à titre expérimental, pour connaître le plus tôt possible la crue du fleuve afin d'en déduire les emblavures à mettre en riz et donc de programmer, en temps utile, tous les imputs nécessaires pour les cultures.

Lancé en 1980, ce projet a permis d'obtenir, au point de vue méthodologique, des résultats intéressants.

Il a mis en évidence l'intérêt que peut présenter le suivi d'une série de réservoirs hydrologiques dans le haut bassin du Niger en Guinée comme indicateurs précoces de la crue utile dans la région des aménagements hydro-agricoles du Mali soit 300 à 400 km en aval.

La méthode a pu être testée pendant la saison des pluies 1986 grâce à trois images SPOT, exceptionnellement sans nuage, qui ont permis de suivre certaines mares semi-permanentes en bordure du Milo (affluent du Niger) en Guinée, comme indicatrices de l'état hydrologique d'un bassin versant.

Malheureusement, la qualité des séries d'images à haute résolution laisse souvent à désirer en saison des pluies à cause de la nébulosité abondante. Il y a là une limite à l'utilisation pratique de la méthode.

Une solution consisterait peut-être à utiliser, pendant la saison des pluies, les images NOAA plus abondantes mais à faible résolution, leur nombre permettant de profiter plus facilement des éclaircies dans la couche nuageuse, pour le suivi hydrologique du bassin et notamment des mares-témoins; tandis que l'on pourrait obtenir en fin de saison sèche ou en début de saison des pluies par les satellites à haute résolution type SPOT, un état de la situation hydrologique de départ qui servirait de référence à l'analyse hydrologique de la saison des pluies qui suit.

En outre et parallèlement, cette situation en fin de saison sèche pourrait être comparée avec celle des années précédentes et l'état de remplissage des mares-témoins à cette période, pourrait donner une première indication de ce que va être la «vie» hydrologique du bassin en question.

5.3.2 Gestion des eaux souterraines : exemple : étude de la recharge des aquifères du socle cristallin en milieu fissuré sous climats sahélien et soudanien

Dans le cadre de la lutte contre les effets de la sécheresse, la Communauté européenne participe avec de très nombreux bailleurs de fonds à une large campagne de forages qui veut répondre à la satisfaction des besoins élémentaires des populations et de leurs animaux domestiques en matière d'eau. Ceci a lieu principalement dans les zones climatiques sahéliennes et soudanaises de l'Afrique de l'Ouest.

Or, les techniques de forage deviennent de plus en plus performantes notamment dans les roches dures et l'on peut, dans certaines conditions, obtenir des débits d'eau suffisamment importants pour que l'on puisse songer à une certaine irrigation ou à l'alimentation en eau de petits centres urbains.

Les risques sont donc grands de voir tarir plus ou moins rapidement ces réserves d'eau, avec les conséquences graves que cela peut avoir sur les populations concernées, si l'on ne peut apprécier leur éventuel renouvellement.

Dans une première phase qui s'est étalée de 1984 à 1987 au Burkina Faso, on a testé, par la méthode de traceurs radioactifs (tritium, deutérium et oxygène 18), la possibilité d'abord, puis la capacité et le rythme d'une recharge possible des aquifères en milieu fissuré à partir des pluies.

On en a déduit des normes d'exploitation possible de ces aquifères, en fonction de la recharge annuelle et de sa variabilité interannuelle, ceci en vue de guider les campagnes de forage dans les roches dures et d'aider à optimiser l'usage de l'eau souterraine sans épuiser les réserves.

Au cours de la deuxième phase qui a débuté en 1988, pour satisfaire à la petite agriculture irriguée, il s'agit :

- d'améliorer les techniques de prospection en vue de découvrir plus vite des sites susceptibles de donner les débits nécessaires;

- d'observer les réactions des aquifères de milieu fissuré à des sollicitations longues et intenses sous la forme de pompages à fort débit et de définir les limites d'exploitation des milieux testés;

- de choisir des types de cultures économiquement intéressantes et utiles aux agriculteurs, et les rythmes d'irrigation compatibles avec la disponibilité des ressources en eau.

La télédétection a été utilisée à des fins de prospection par l'exploitation de plusieurs images SPOT couvrant les 3 sites expérimentaux du projet et ce sous deux aspects :

- recherche de sites favorables à l'implantation de forages à forts débits en fournissant des éléments descriptifs du milieu fissuré;

- recherche des zones aptes à la mise en culture pour la réalisation des périmètres irrigués.

Si, pour deux des sites, la participation de la télédétection a été très limitée du fait de la présence d'une importante couverture de latérite, pour le 3^e site, on a assisté à un gain très net en efficacité tant sous l'angle de l'aptitude des terres à la mise en culture que sous celui du potentiel de reconstitution de la ressource en eaux souterraines, car elle a permis de mettre rapidement en évidence des zones hydrologiquement et agronomiquement favorables qui soient aussi proches que possible les unes des autres (BRGM/Aquater, 1986).

6 Conclusions

6.1 Les aspects positifs de l'utilisation des techniques de télédétection

En simplifiant à l'extrême, avec tous les risques que toute simplification entraîne, l'on peut dire que les notions fondamentales du contrôle de la désertification sont :

- le long terme;
- les grands espaces géographiques.

Les techniques de télédétection répondent parfaitement à ces deux notions. Elles peuvent en effet analyser des phénomènes sur de longues périodes et ce, sans se soucier de frontières administratives ou humaines.

Mais ces notions de durée et d'espace sont consommatrices d'énergie et d'argent, deux éléments toujours limités : elles postulent donc un engagement politique au niveau des instances gouvernementales nationales ou sous-régionales avec aussi, parallèlement, un engagement volontaire et réfléchi au niveau du simple citoyen.

Par ailleurs, les techniques de télédétection permettent aussi un gain de temps très important, et donc finalement d'argent, par rapport aux techniques classiques permettant d'inventorier et de suivre les connaissances indispensables tel que l'évolution de la superficie du couvert arboré dans l'espace et le temps. Mieux même, elles rendent possibles ce qui, sans elles, seraient dans le contexte actuel, humainement et financièrement parlant impossible, tel qu'inventorier, classer, cartographier les bassins versants élémentaires constitutifs du haut bassin d'un fleuve donné et ce année par année.

Leurs interventions majeures semblent se situer principalement au niveau des études préparatoires à un projet de développement agricole, plutôt qu'au niveau de l'exécution du projet, si l'on fait exception de l'évaluation concomitante et du suivi des actions où elles retrouvent toute leur potentialité.

6.2 Contraintes et risques de l'utilisation des techniques de télédétection

Toutefois, les techniques de télédétection, même insérées dans un éventail d'autres techniques, chacune épaulant l'autre, ont besoin pour faire épanouir toutes leurs possibilités, d'une véritable chaîne technologique allant des satellites de support des capteurs, à l'utilisateur final qui doit pouvoir «lire» les informations tirées des images satellitaires pour un terroir donné, comme support de ses interventions en matière de développement rural - impliquant, entre autres, la lutte contre la désertification.

Or, le risque est très grand, devant l'évolution rapide des techniques et la recherche de performances accrues, au niveau de la résolution par exemple, ou sous la pression de «clients» plus exigeants dans les pays économiquement avancés, de voir cette chaîne - pourtant déjà bien légère - se distendre chaque jour davantage, creusant ainsi le fossé déjà très large entre les potentialités offertes par la télédétection et l'usage trop limité que l'on en fait pratiquement.

Sur ce point, la responsabilité des pays industrialisés doit être fortement engagée afin de limiter ce risque. Dans la négative, les techniques de télédétection ne seront pas facteurs de développement, ce développement qui est finalement le but recherché par une meilleure connaissance du processus de désertification, laquelle permettra une lutte plus efficace contre la désertification, et pour finir, la préservation des facteurs naturels de production, soubassement indispensable à tout développement solide.

7 Références

BRGM/AQUATER, 1986. La recharge naturelle des aquifères de socle sous climats sahélien et soudanien. Études expérimentales en Afrique. —Orléans.

L'expérience communautaire en matière d'utilisation de la télédétection

- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, 1986. Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen. Protection des ressources naturelles- Lutte contre la désertification en Afrique. —Direction générale du développement, Bruxelles.
- GRÉGOIRE, J.-M. et D. GALÈS, 1987. Comparaison de l'état du couvert végétal arbustif et arboré en 1975 et 1985 sur le haut bassin du fleuve Niger en Guinée; exploitation de l'indice de végétation normalisé déduit des enregistrements Landsat-MSS. —Centre commun de recherche, Commission des communautés européennes, Direction générale de la recherche, Ispra.
- GRÉGOIRE, J.-M., S. FLASSE et J. P. MALINGREAU, 1988. Évaluation de l'action des feux de brousse de novembre 1987 à février 1988 dans la région frontalière Guinée-Sierra Leone. — Centre commun de recherche, Commission des communautés européennes, Direction générale de la recherche, Ispra.
- GRÉGOIRE, R., 1984. Coopération entre pays industrialisés et pays en voie de développement dans le domaine de la télédétection. —Direction générale du développement, Commission des communautés européennes, Bruxelles.
- JUSTICE, C. O. et S. D. PRINCE, 1987. Évaluation première phase de l'étude sur la caractérisation par télédétection de la dynamique des phénomènes de désertification à la périphérie sud du Sahara. —Queen Mary College, Université de Londres.

11

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

DANIEL GUILLEMYN, MARIE-FRANCE BELLAN et FRANÇOIS BLASCO

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

Résumé

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

1 Introduction

1.1 Généralités

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

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

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

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

1.2 Localisation de la zone d'étude

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

1.3 Climatologie

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

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

1.4 Les données utilisées

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

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

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

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

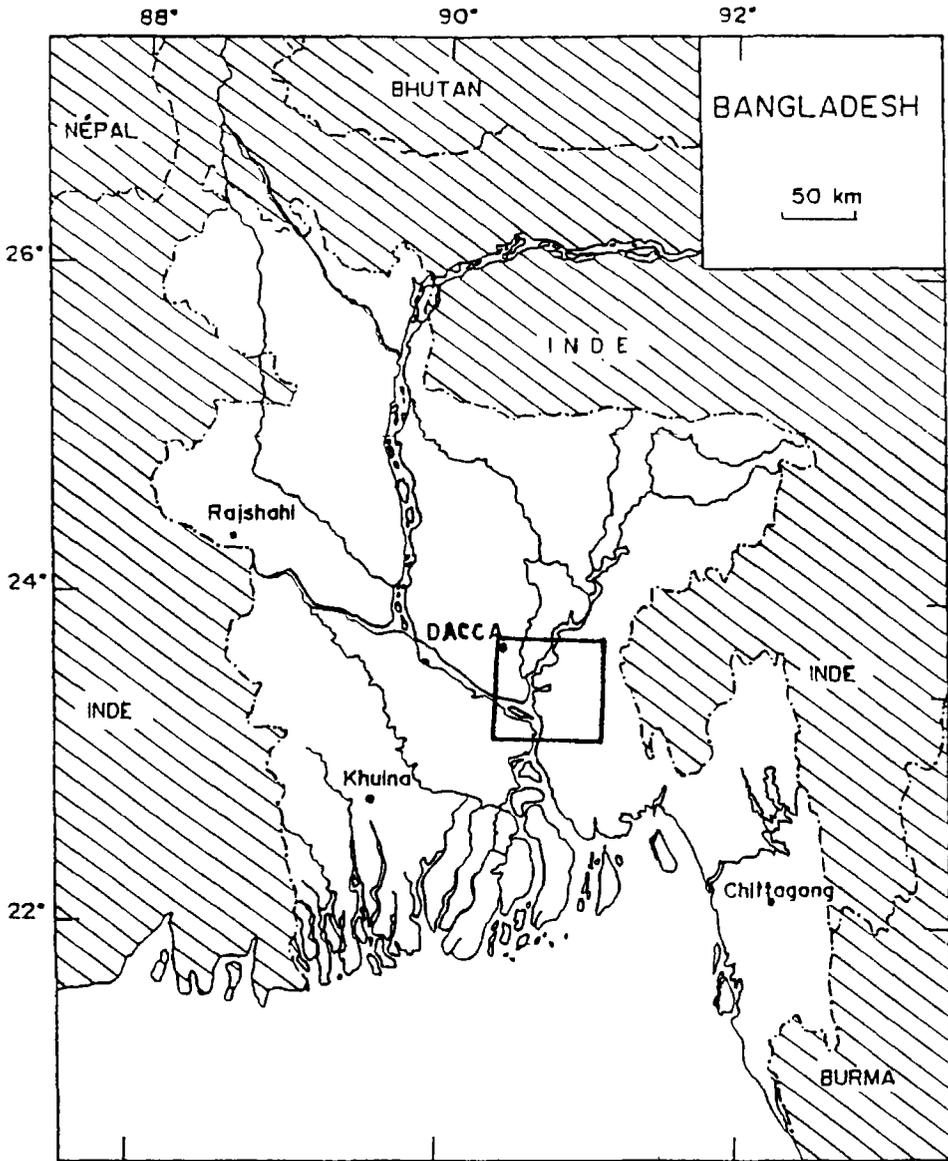


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et contour du cadre SPOT

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

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

2 Étude des données satellitaires

2.1 Interprétation classique des données

2.1.1 Approche qualitative

a) Méthode

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

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

b) Résultats

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

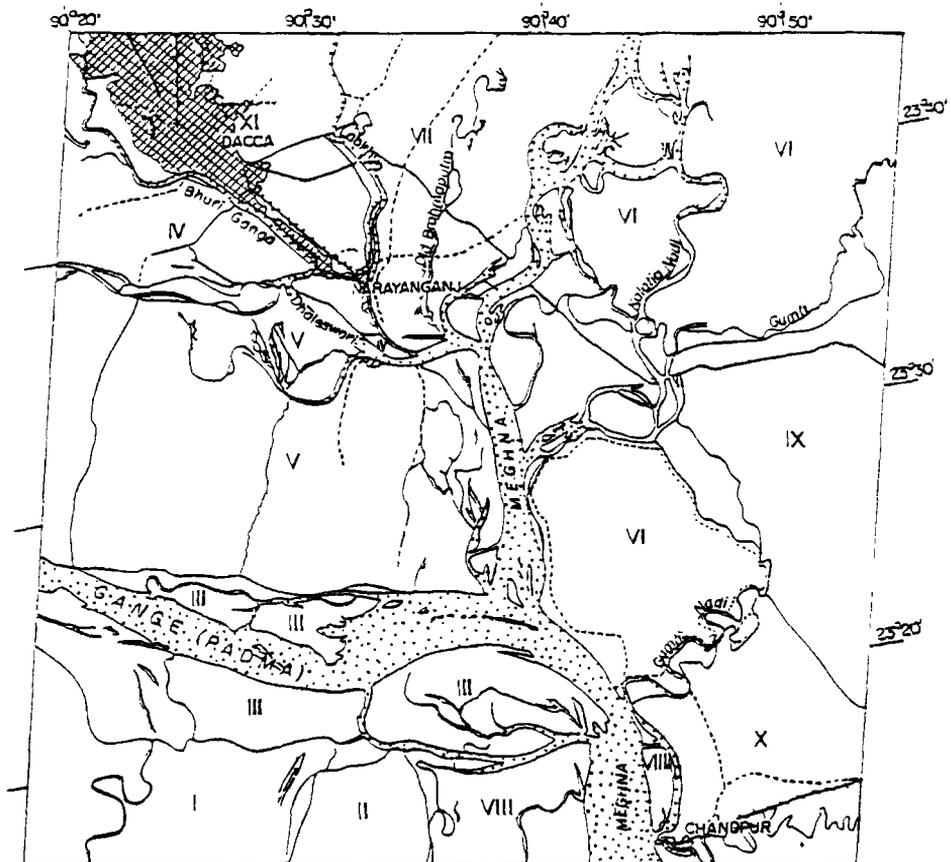


Figure 2. Zonage par photo-interprétation

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

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

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

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

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

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

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

Les zones IX et X sont bien protégées.

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

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

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

2.1.2 Approche quantitative

a) Méthode

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

b) Résultats

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

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

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

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

2.2 Traitement numérique des données

2.2.1 Sur la zone entière

a) Méthode

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

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

b) Résultats

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

Tableau III. Surfaces couvertes en eau obtenues par traitement numérique

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

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

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

2.2.2 Étude locale de Dacca

a) Méthode

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

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

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

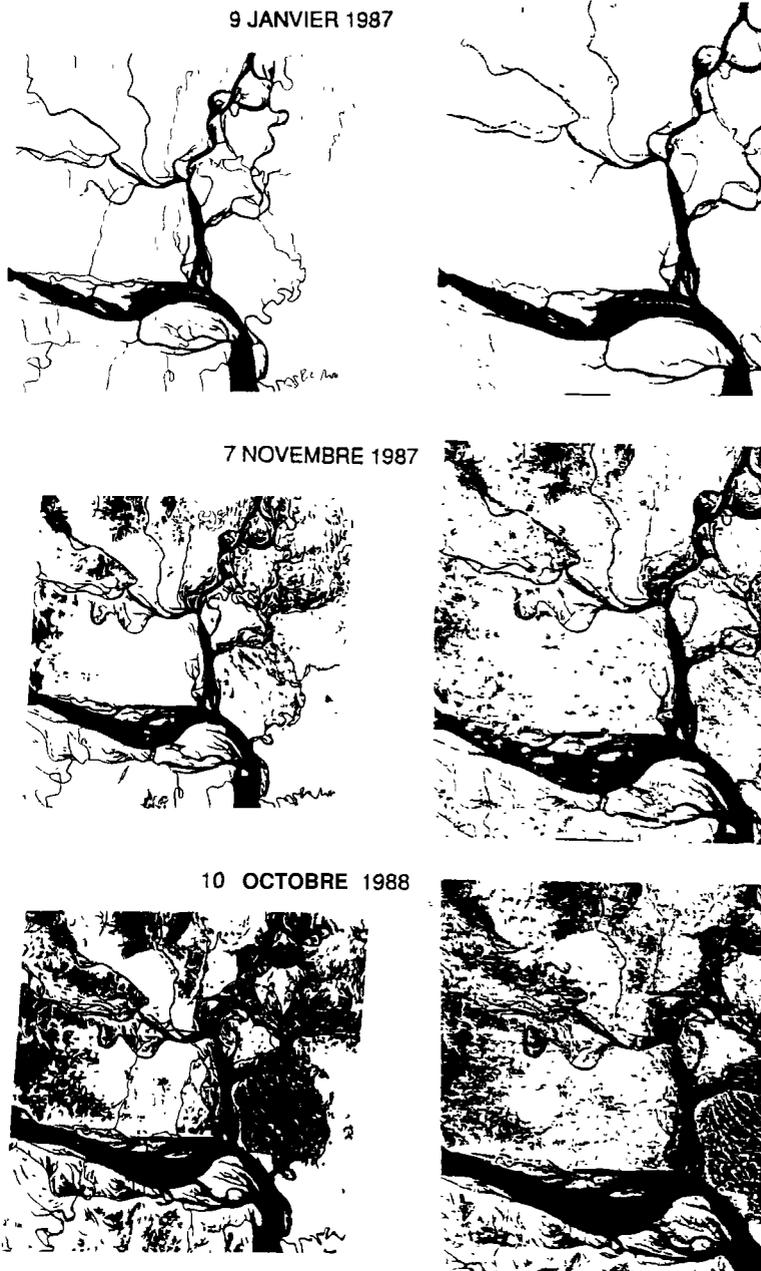


Figure 3. Résultats obtenus par photo-interprétation (colonne de gauche) et par traitement numérique (colonne de droite)

b) Résultats

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

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

2.3 Analyse des résultats

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

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

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

3 Conclusion

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

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

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

4 Bibliographie sommaire

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

12

Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole au Sahel

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

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

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

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

Résumé

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

1 Introduction

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

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

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

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

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

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

2 Objectifs du projet «Télédétection-Aménagement-Sahel»

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

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

3 Région d'étude

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

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

Dans la région de Tillabéry, on observe :

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

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

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

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

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

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

4 Données disponibles

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

Les données auxiliaires sont composées :

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

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

5 Méthode globale utilisée

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

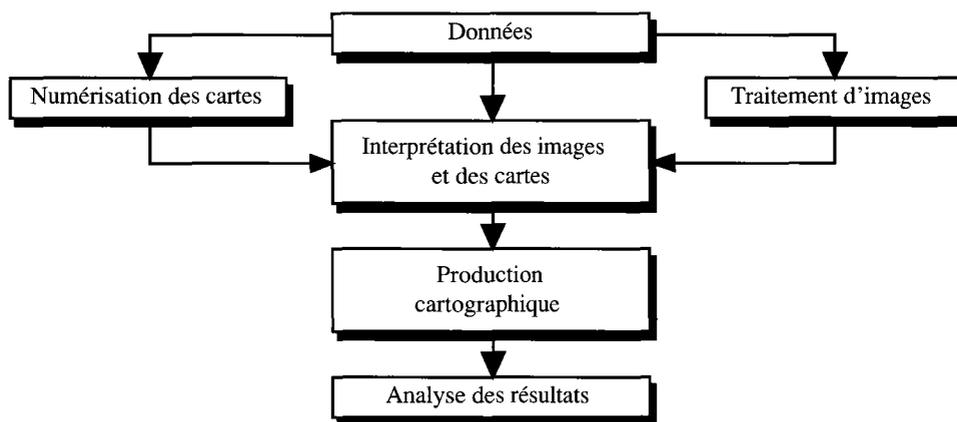


Figure 1. Méthode globale utilisée

5.1 La numérisation des cartes

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

5.2 Le traitement d'images

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

6 Résultats

6.1 L'interprétation des images

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

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

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

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

6.2 La production cartographique

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

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

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

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

7 Conclusion

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

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

8 Références

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

Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole au Sahel

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

13

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

CHRISTINE JACQUEMINET

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

Résumé

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

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

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

1 Comment déterminer des indicateurs morphologiques sur images satellitaires

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

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

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

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

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

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

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

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

Le traitement des données satellitaires comporte trois phases :

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

2 L'orientation des modelés dunaires

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

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

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

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

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

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

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

2.2 La modélisation des formes dunaires

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

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

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

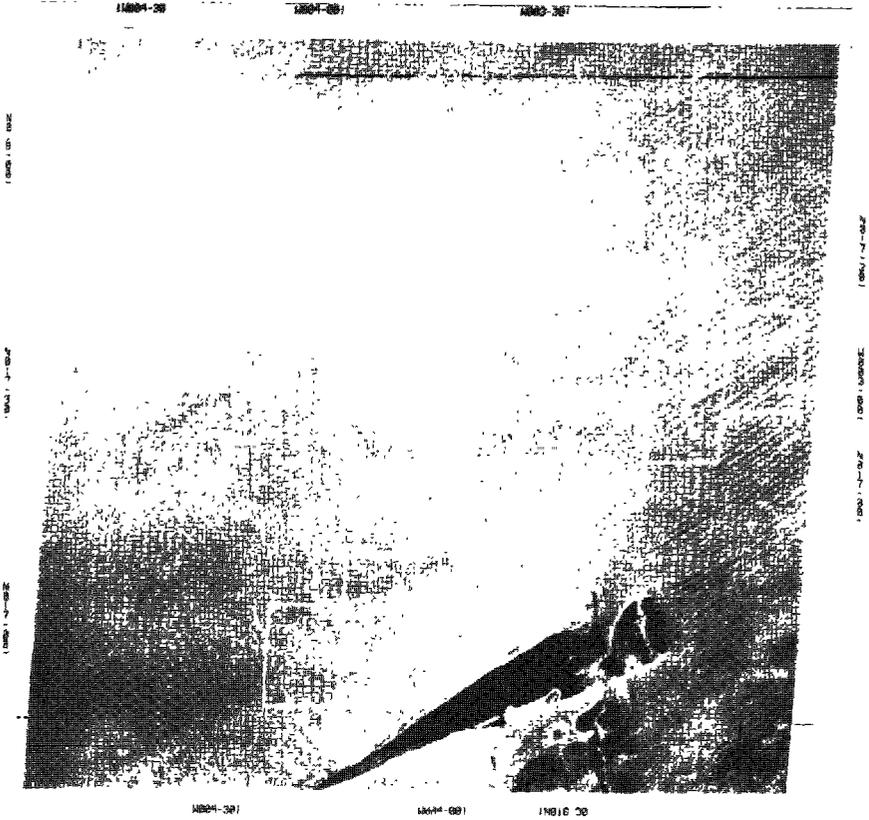


Figure 1. Localisation des échantillons sur l'image Landsat MSS du 10 mars 1982, canal MSS4

2.3 Le calcul des orientations des structures dunaires

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

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



Figure 2. Échantillon A, première composante principale

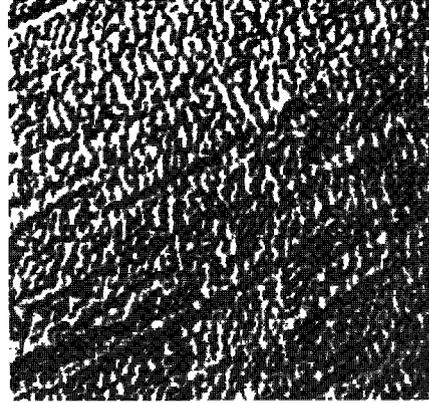


Figure 3. Échantillon A, filtre Gabarit «direction»

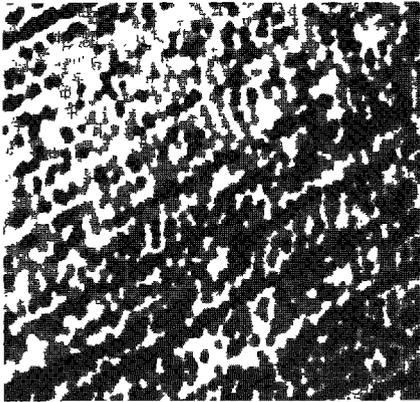


Figure 4. Échantillon A, fermeture de rayon 2

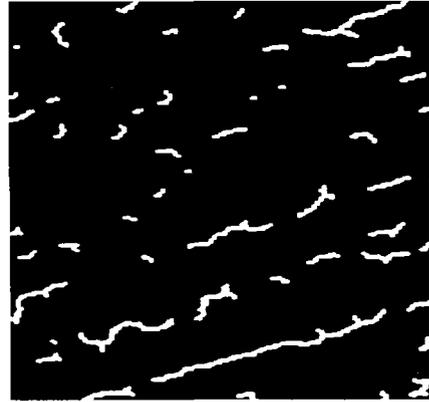


Figure 5. Échantillon A, squelette

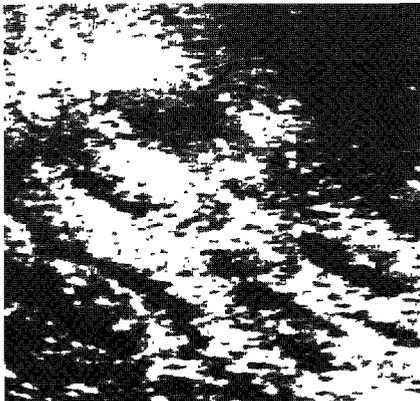


Figure 6. Échantillon I, première composante principale

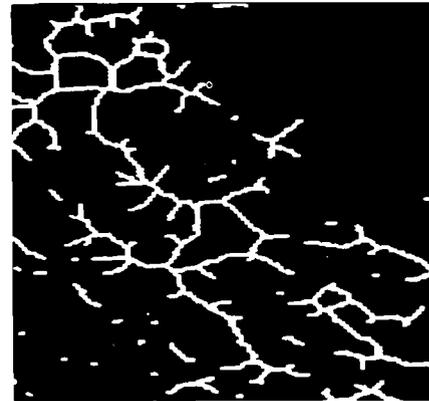


Figure 7. Échantillon I, squelette

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

3 L'organisation spatiale du couvert ligneux

3.1 La région d'Oursi et les textures végétales rencontrées

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

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

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

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

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

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

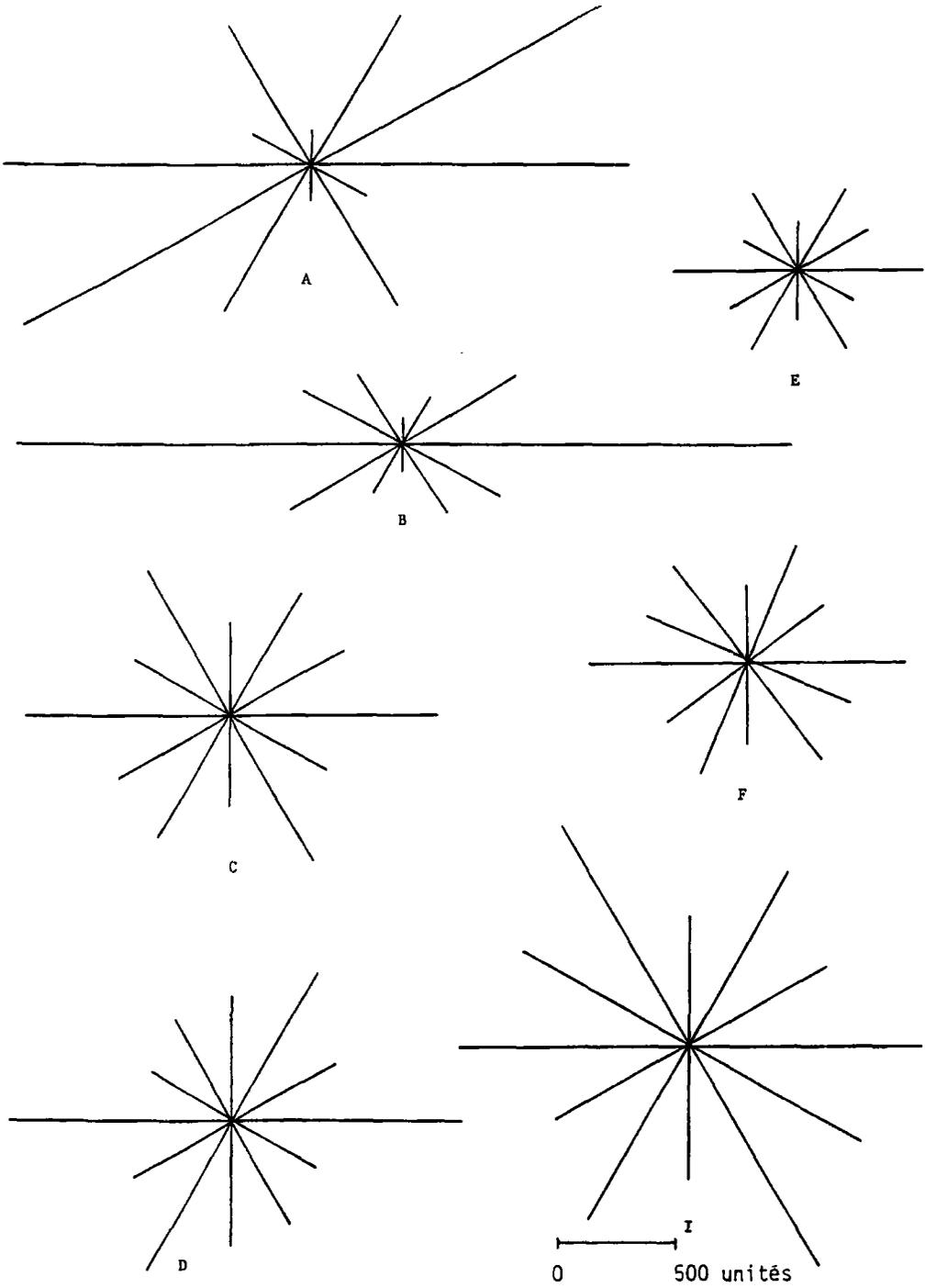


Figure 8. Roses des directions calculées sur les squelettes des cordons dunaires

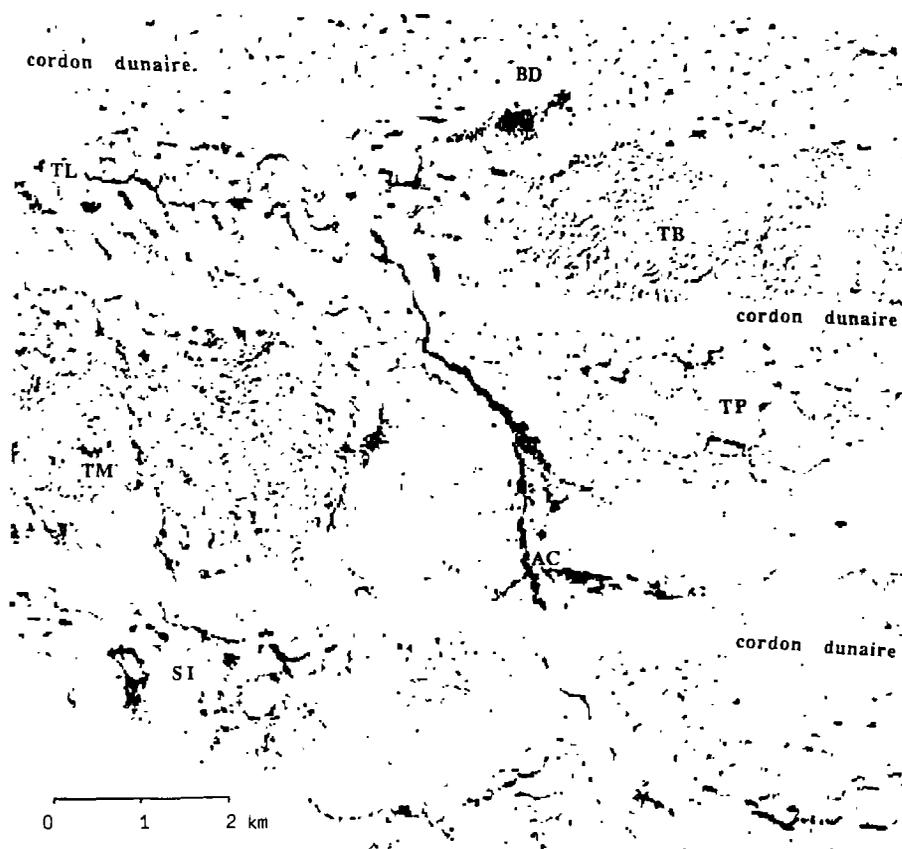


Figure 9. Les textures végétales sur l'image de la classe «végétation ligneuse» (BD: bosquets sur cordons dunaires, TB: brousse tigrée à lanières, TL: brousse tigrée à lanières, TM: brousse tigrée mouchetée, TP: brousse tigrée piquetée, SI: steppe des espaces interdunaires, AC: agrégats sur chenaux d'écoulement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

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

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

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

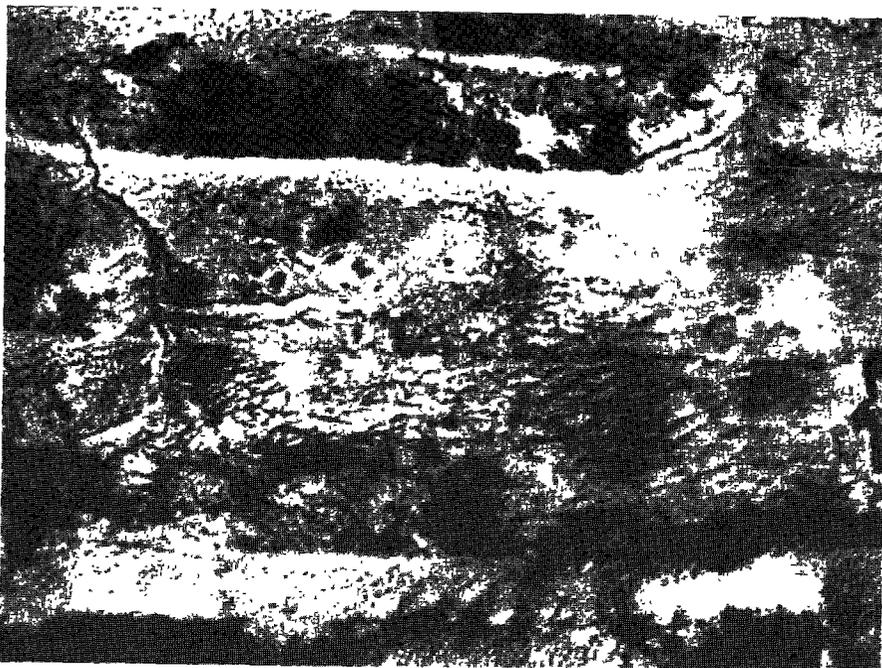


Figure 10. Reproduction monochrome d'une composition colorée extraite de l'image SPOT du 17/12/86



Figure 11. La classe «végétation ligneuse»

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

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

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

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

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

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

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

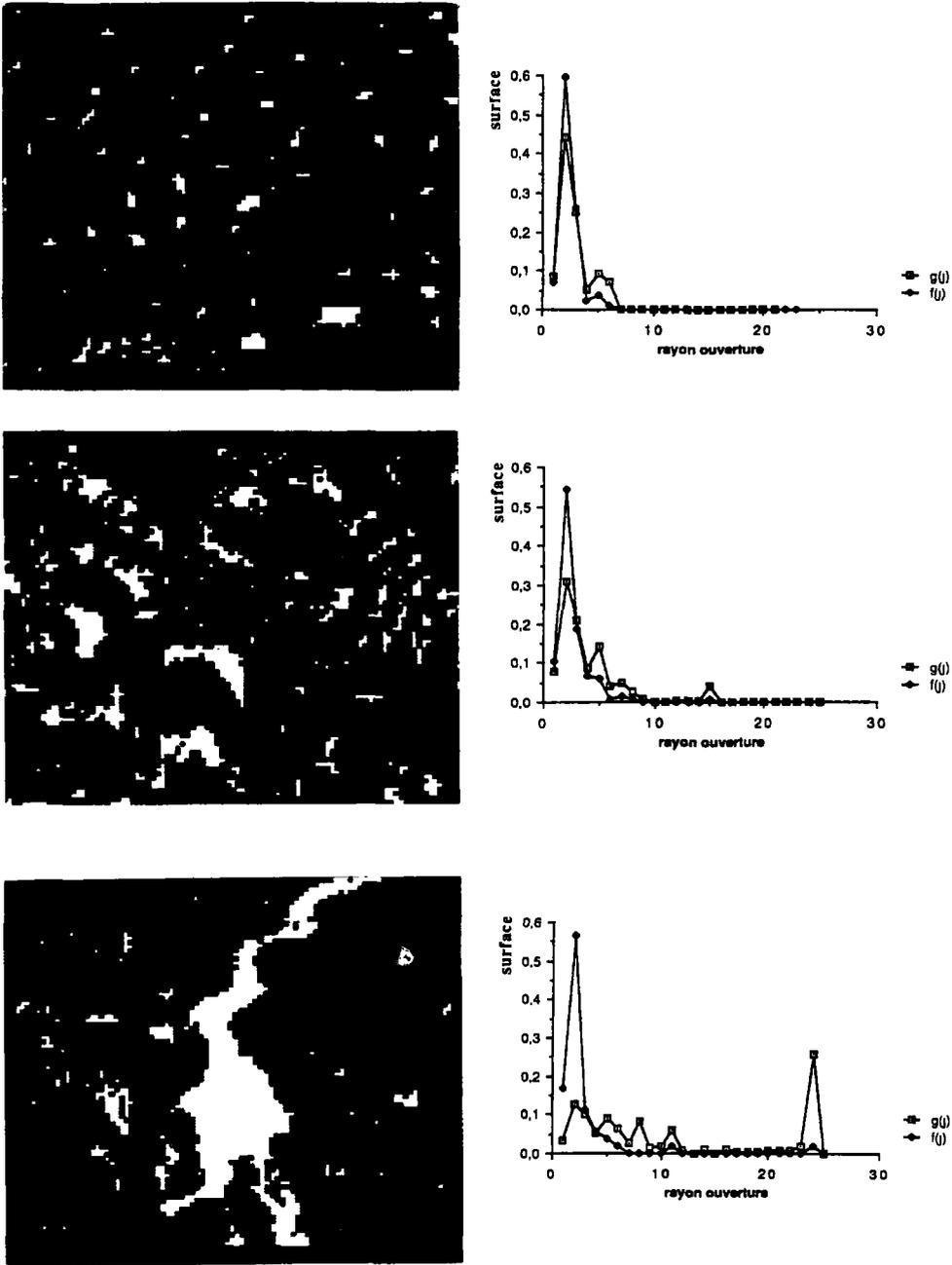


Figure 12. Les courbes de densité granulométrique en surface $g(n)$ et de densité granulométrique en nombre $f(n)$ calculées sur trois quadrats (en haut : bosquets sur cordon dunaire; au centre : brousse tigrée mouchetée; en bas : agrégats sur chenal d'écoulement temporaire)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

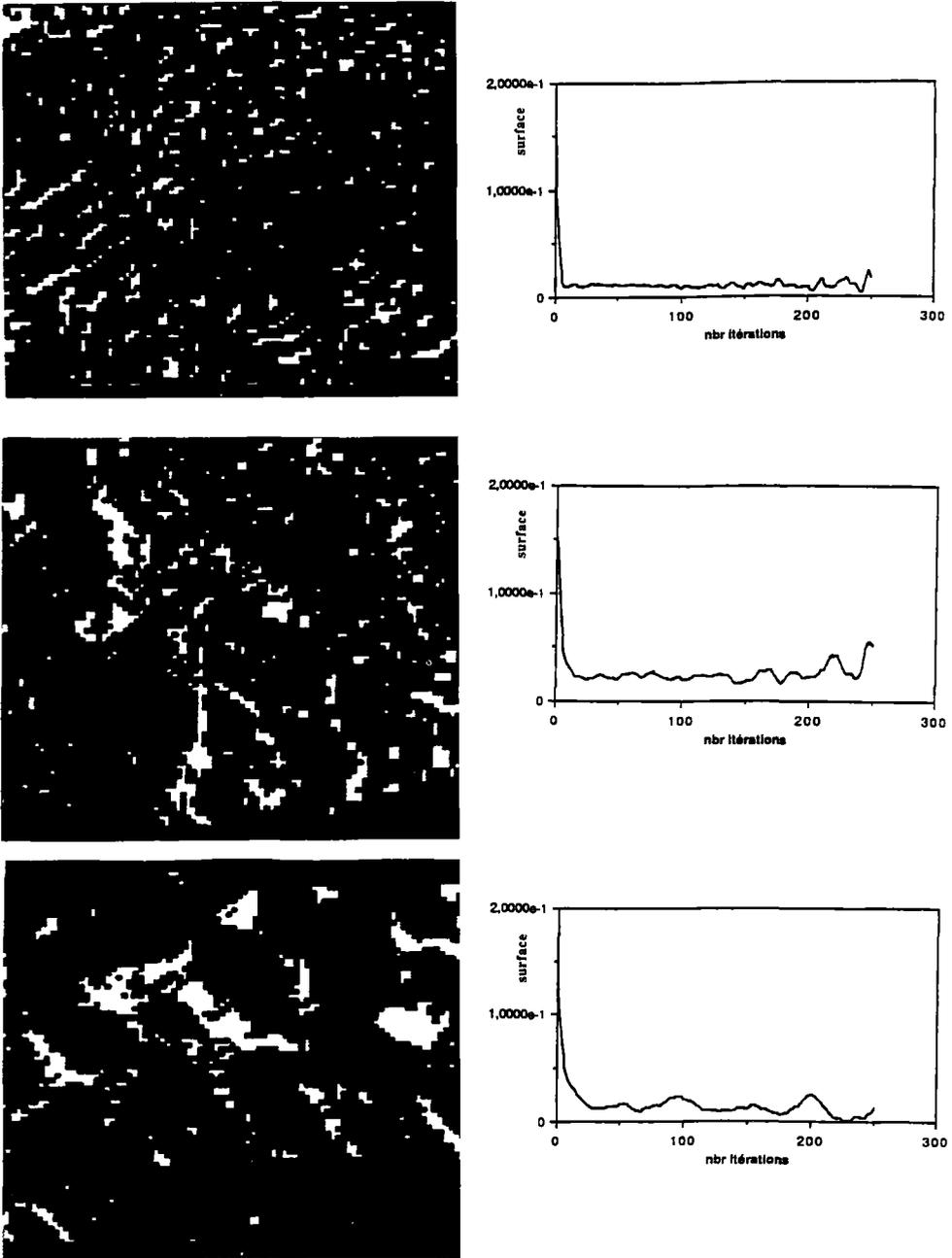


Figure 13. Les covariogrammes calculés sur trois quadrats de brousse tigrée de texture différente (en haut : brousse tigrée à bandes; au centre : brousse tigrée mouchetée; en bas : brousse tigrée à lanières)

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

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

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

4 Conclusion

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

5 Références

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

C. Jacqueminet

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

14

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

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

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

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

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

Résumé

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

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

1 Introduction

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

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

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

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

2 Cadre géologique

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

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

2.1 Le socle

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

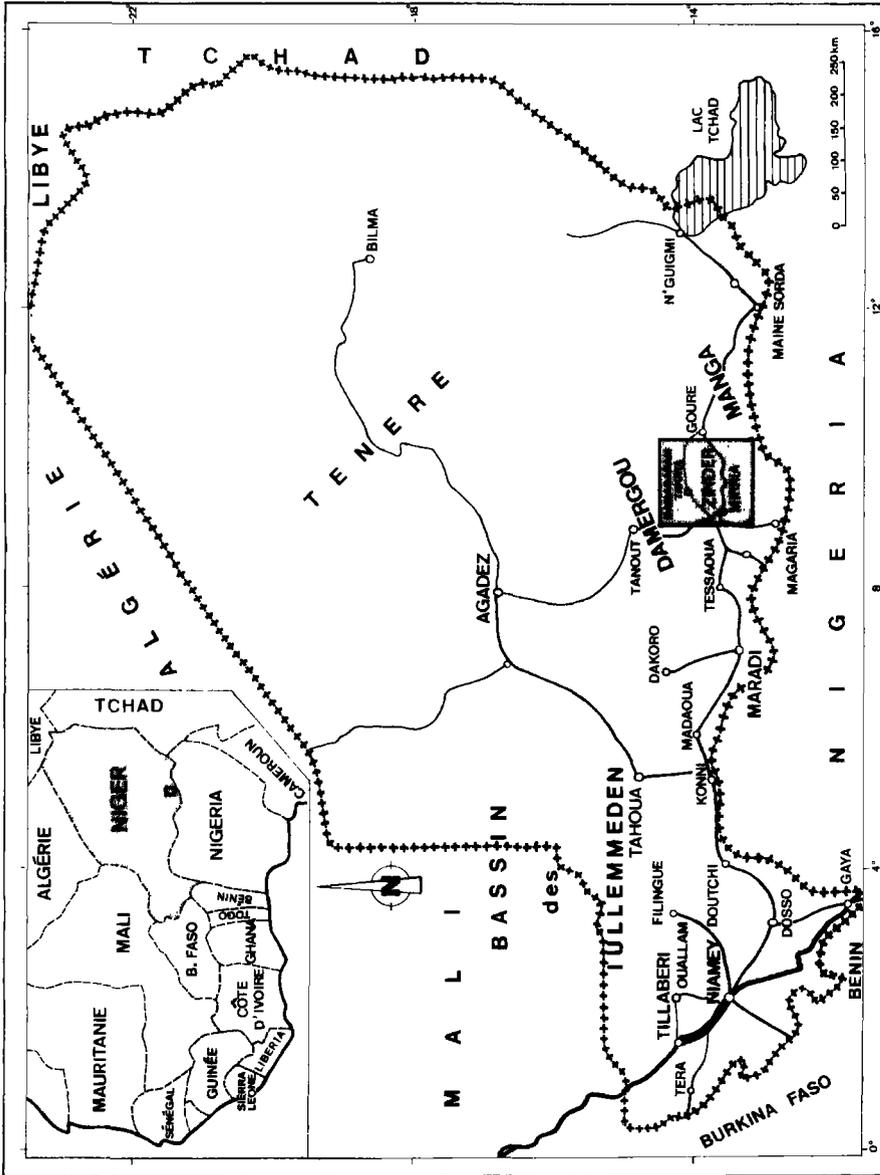


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

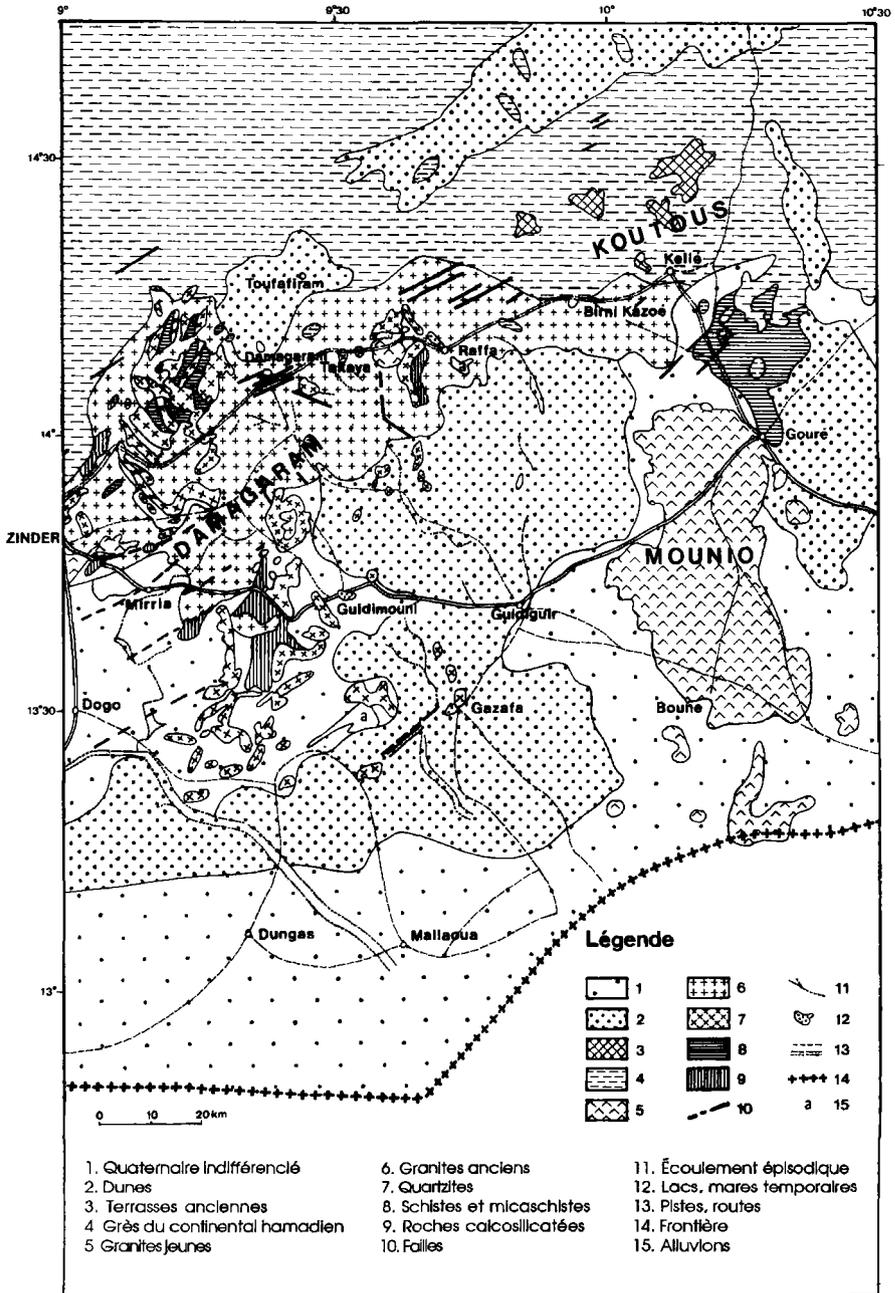


Figure 2. Carte géologique d'après H. Faure (1966)

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

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

2.2 Le continental hamadien

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

2.3 Les sables quaternaires

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

2.4 Tectonique

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

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

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

3 Climat

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

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

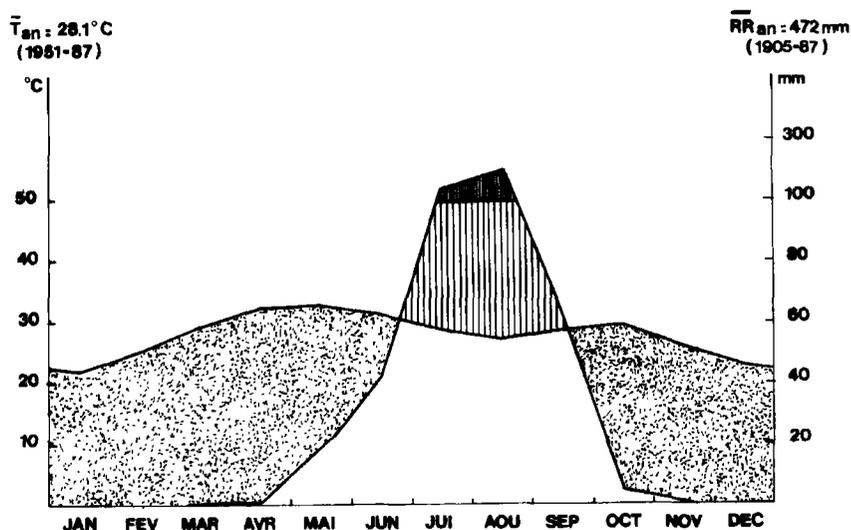


Figure 3. Diagramme ombrothermique de la station de Zinder

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

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

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

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

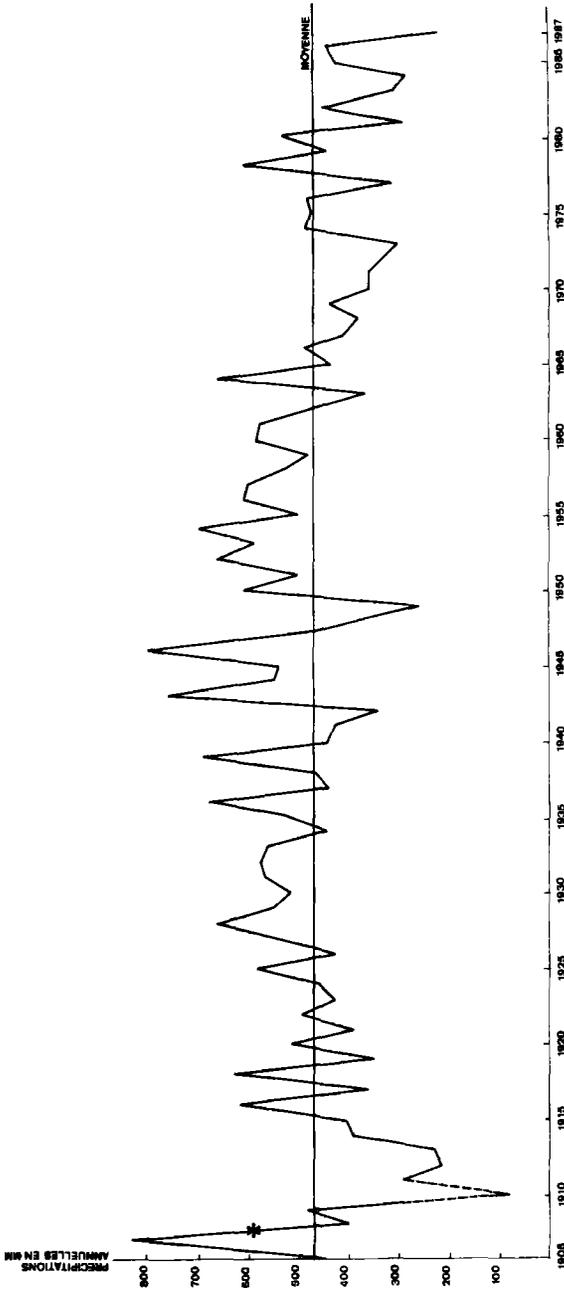


Figure 4. Évolution des précipitations annuelles à Zinder pour la période 1905-1987

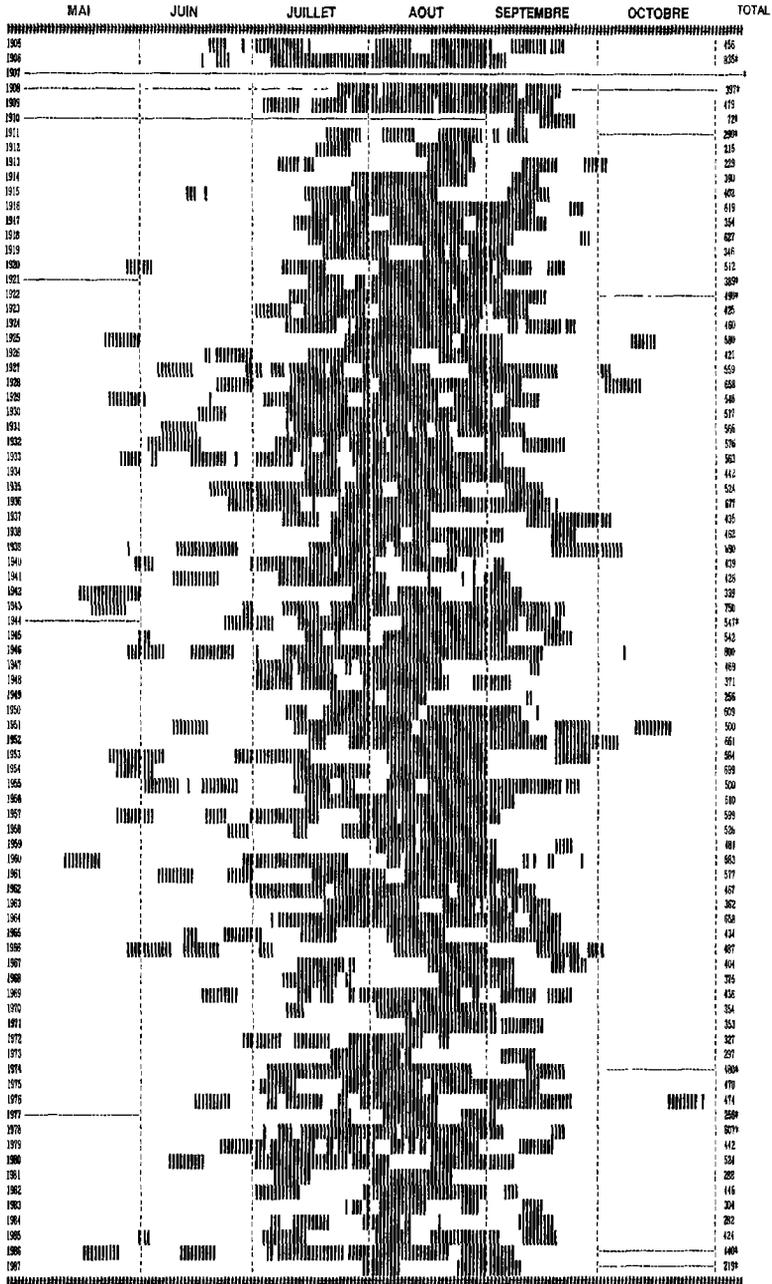


Figure 5. Évolution des précipitations à Zinder pendant la période 1905-1987 (- : pas de mesure de précipitation pour la journée, I : jour de la saison des pluies pour lequel le total des pluies des dix derniers jours est supérieur ou égal à 30 mm)

4 Étude photogéomorphologique

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

4.1 Les reliefs résiduels

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

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

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

4.2 La morphologie dunaire

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

4.2.1 Les dunes transversales

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

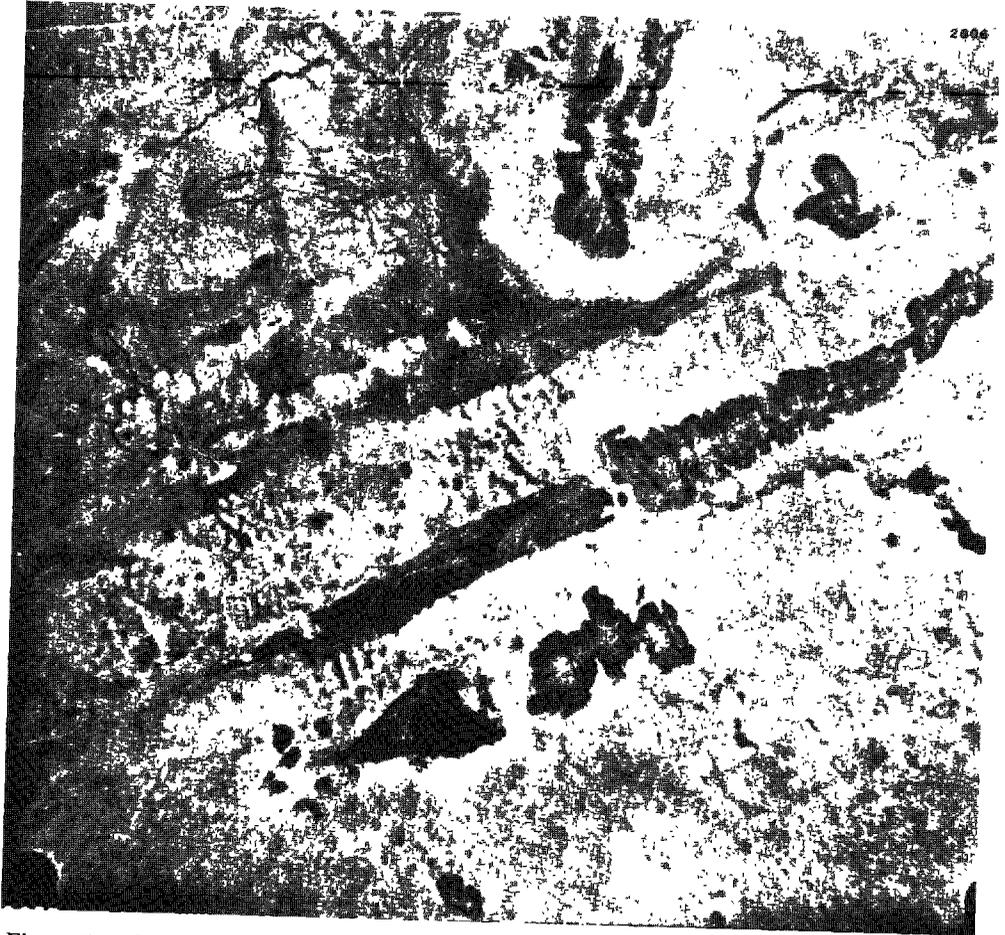


Figure 6. Illustration des reliefs résiduels (photo 2006)

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

4.2.2 Les dunes longitudinales

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

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

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

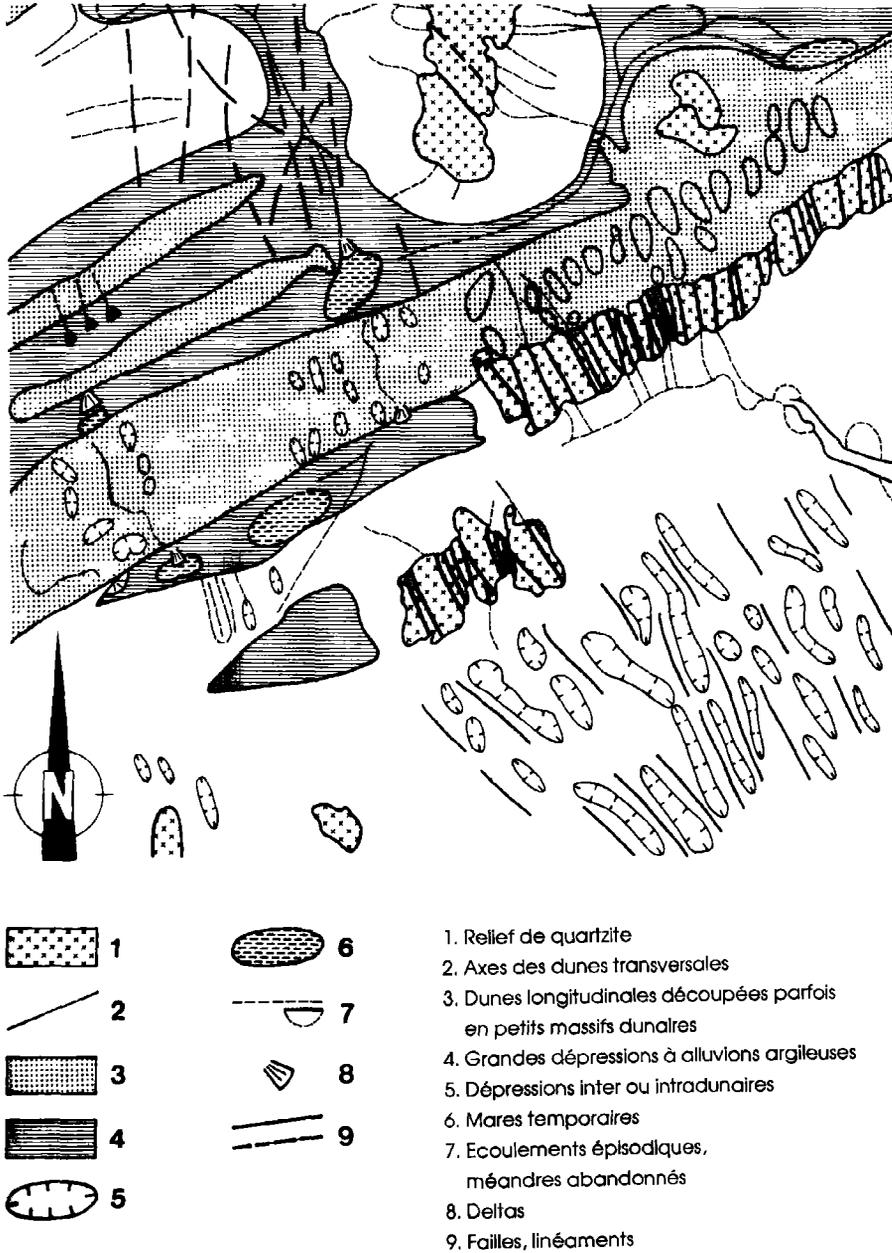


Figure 7. Illustration des reliefs résiduels (interprétation de la photo 2006)

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

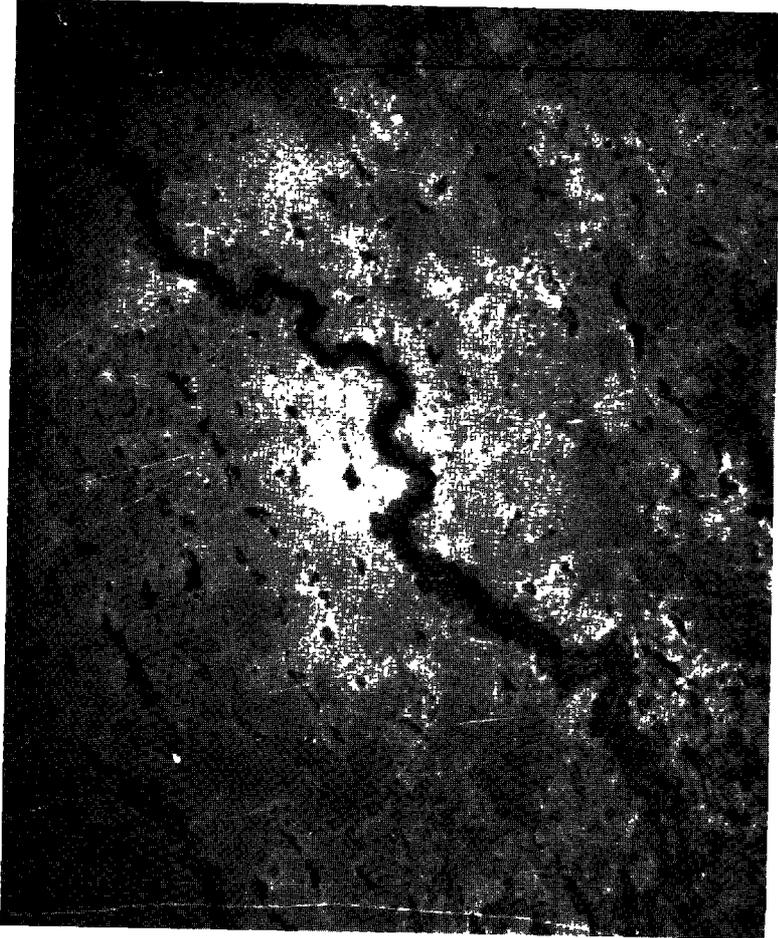


Figure 8. Illustration des dunes transversales (photo 1867)

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

4.3 Modelé éolien et réseau hydrographique

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

4.3.1 Les dépressions allongées à alluvions argileuses

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

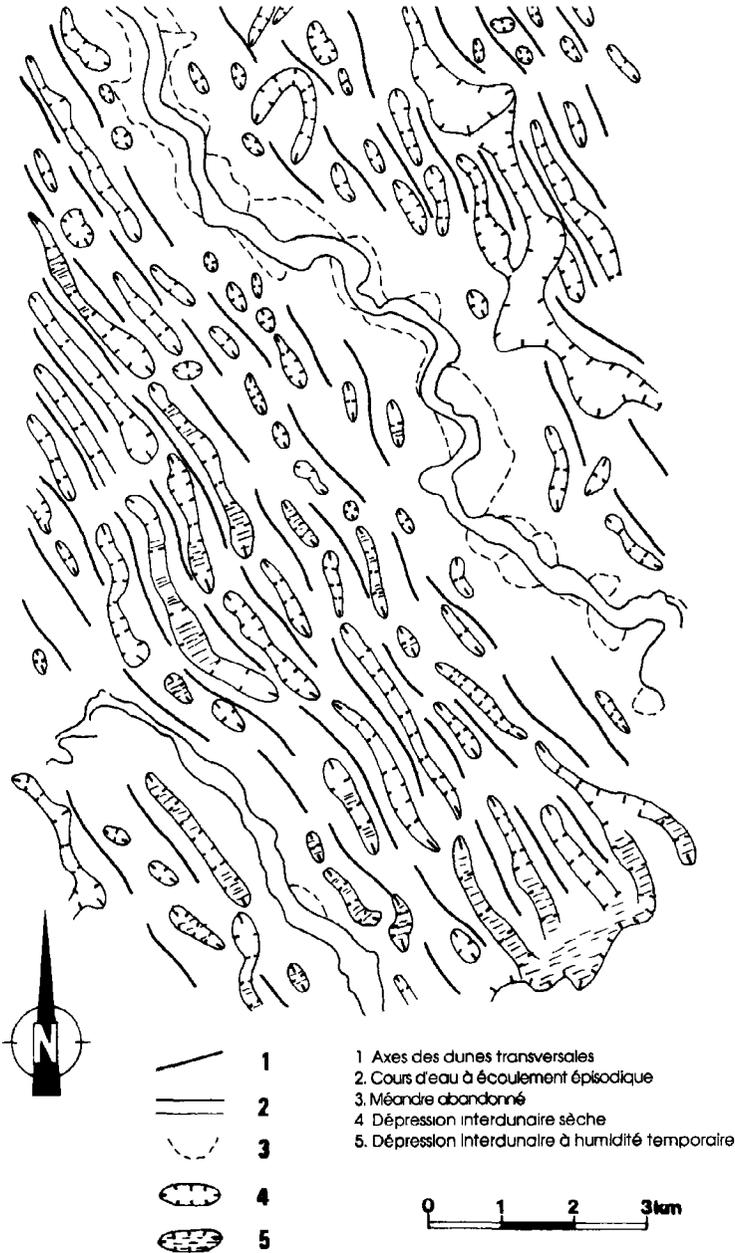


Figure 9. Illustration des dunes transversales (interprétation de la photo 1867)

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

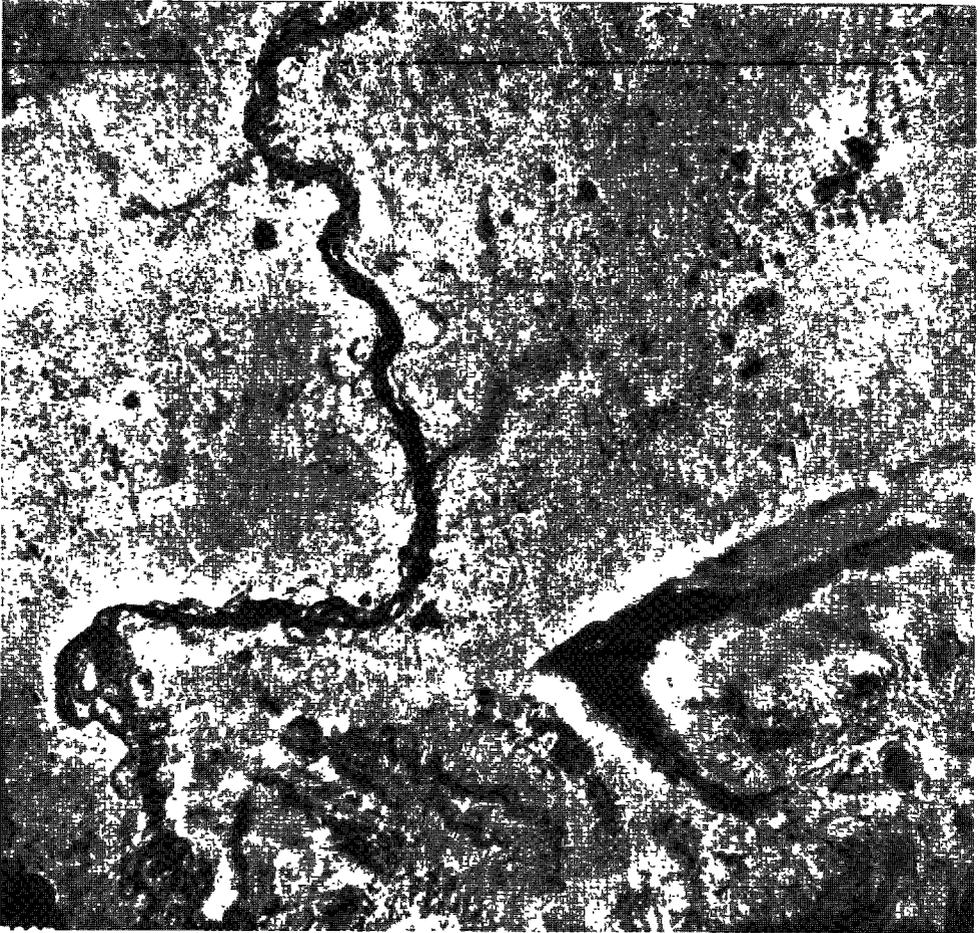


Figure 10. Illustration des dunes longitudinales (photo 2002)

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

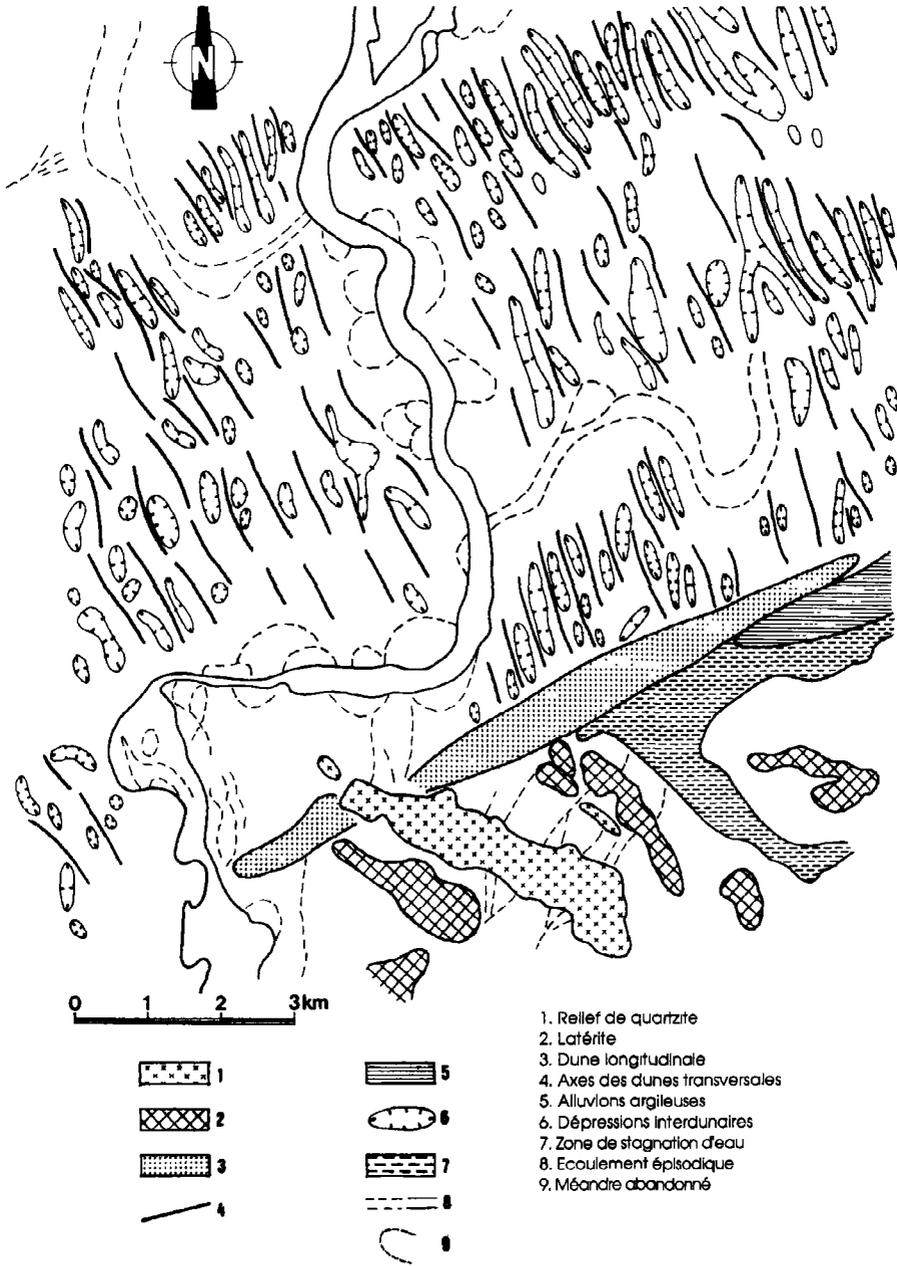


Figure 11. Illustration des dunes longitudinales (interprétation de la photo 2002)

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

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

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

5 Conclusion

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

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

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

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

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

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

6 Remerciements

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

7 Références

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

15

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

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

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

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

Résumé

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

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

1 Introduction

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

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

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

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

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

2 Présentation de la zone d'étude

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

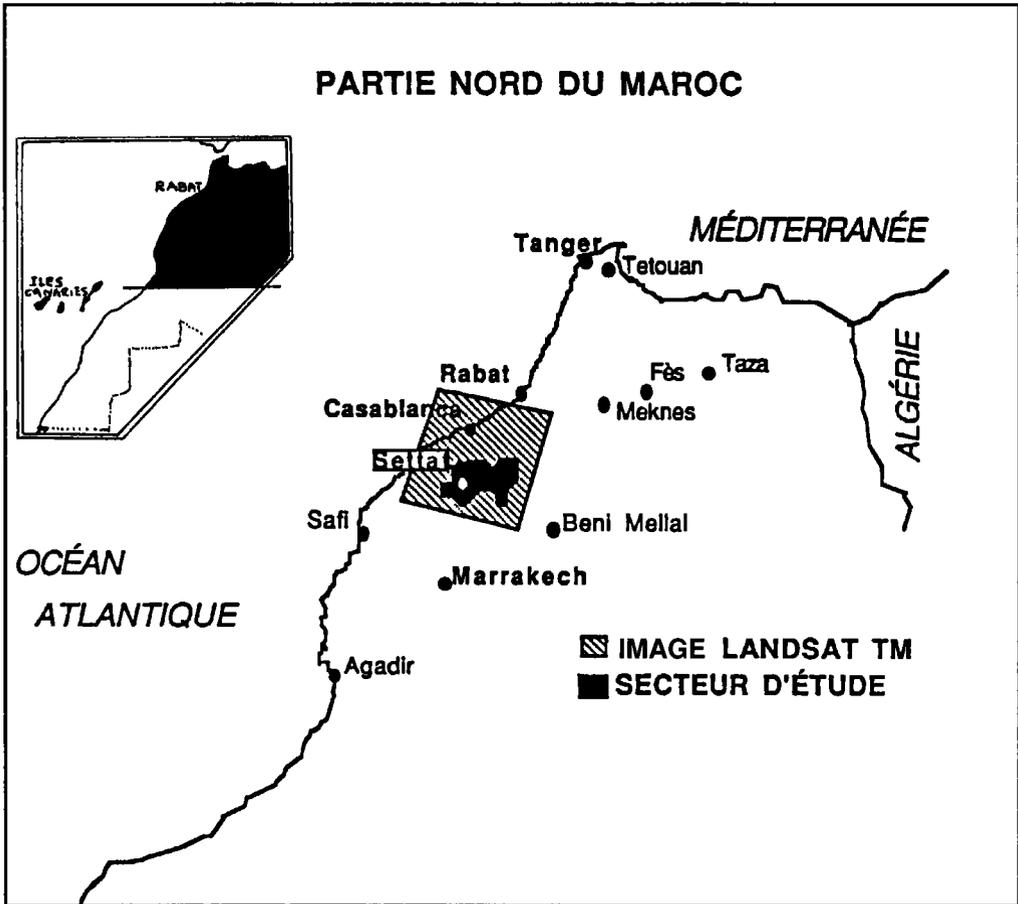


Figure 1. Carte de la partie nord du Maroc montrant la zone couverte par l'image satellitaire ainsi que le secteur d'étude

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

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

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

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

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

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

3 Méthode

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

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

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

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

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

4 Résultats et discussions

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

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

4.1 Les variables du classement

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

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

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

4.1.1 Roches tendres

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

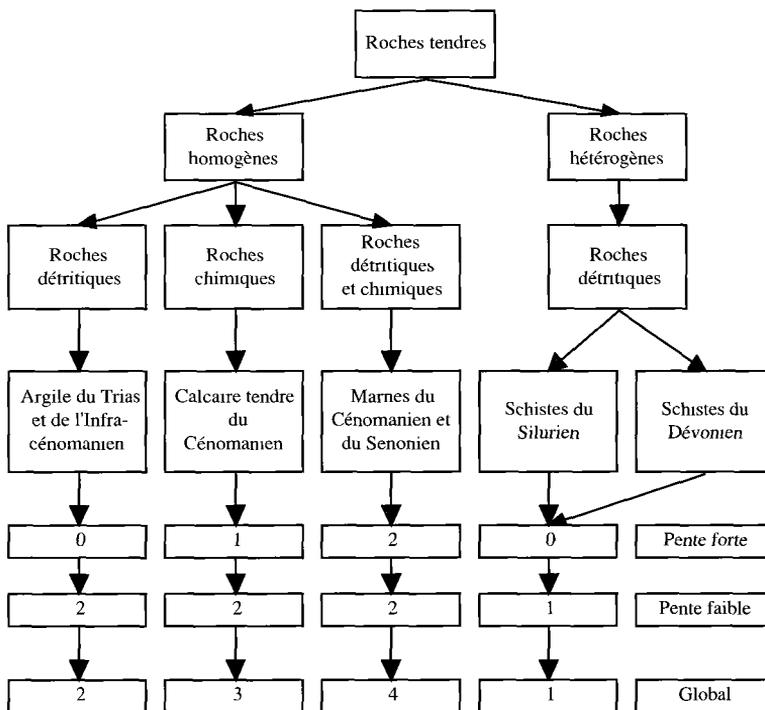


Figure 2. Principales subdivisions des surfaces en roches tendres dans la zone d'étude de Ben Ahmed et classement des possibilités d'intervention ou d'amélioration (0 : nulles, 5 : grandes)

4.1.2 Roches dures

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

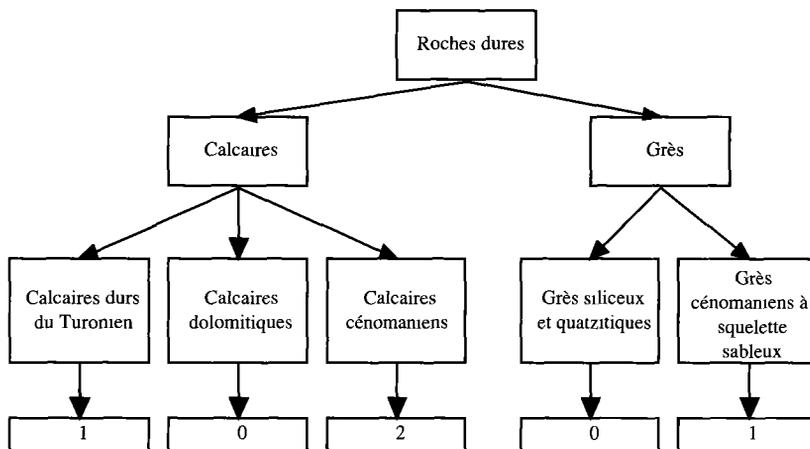


Figure 3. Principales subdivisions des roches dures trouvées dans la zone de Ben Ahmed et classement des possibilités d'intervention ou d'amélioration (0 : nulles, 5 : grandes)

4.1.3 Formations superficielles

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

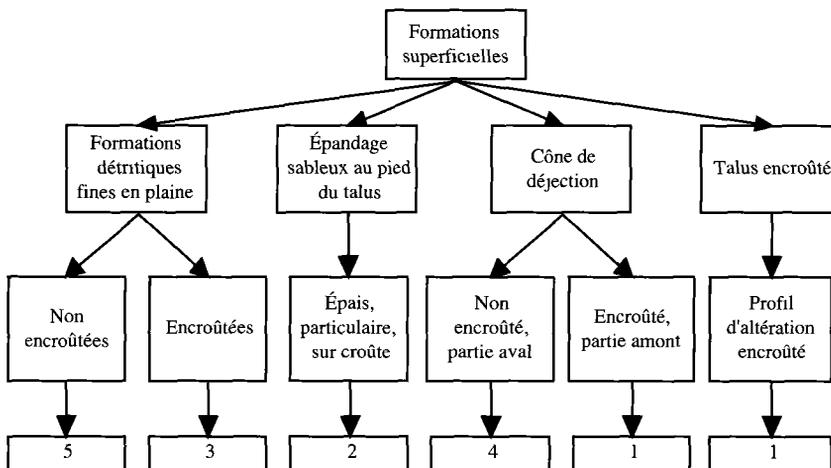


Figure 4. Principales subdivisions des formations superficielles trouvées dans la zone de Ben Ahmed et classement des possibilités d'intervention ou d'amélioration (0 : nulles, 5 : grandes)

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

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

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

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

4.2 Les catégories retenues

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

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

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

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

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

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

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

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

4.3 Apport de la télédétection

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

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

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

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

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

5 Conclusion

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

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

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

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

6 Remerciements

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

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

7 Références

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

16

Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal, par imagerie satellitaire

BERNARD MOUGENOT*, PATRICK ZANTE** et JEAN-PIERRE MONTOROI**

*ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, 70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy, France, téléphone : 48-47-31-95, télex : 235 453 F, télécopieur : 48-47-30-88

**ORSTOM, B. P. 1386, Dakar, Sénégal, téléphone : 32-34-80, télex : 468 SG, télécopieur : 32-43-07

Résumé

La région de basse Casamance au sud du Sénégal subit un déficit pluviométrique depuis 1968. Le domaine fluvio-marin le long du fleuve Casamance est en permanence envahi par les eaux marines. Les conséquences pour les sols et les nappes de bas-fond sont un accroissement de la salinité et une acidification consécutive à la baisse des nappes. La végétation naturelle de mangrove s'amenuise et la riziculture en domaine salé disparaît. L'imagerie satellitaire SPOT multitudes permet de suivre l'évolution saisonnière des états de surface et leur cartographie à partir des luminances. L'étude de séquences-test met en évidence de bonnes relations entre les états de surface et des caractères hydro-pédologiques. Des cartes dérivées de salinité des sols et des nappes sont extraites.

1 Présentation

La diminution des précipitations observée depuis une vingtaine d'années en zone sahélienne a également affecté des régions plus humides comme la basse Casamance au sud du Sénégal

(fig. 1). La station de Ziguinchor a enregistré une baisse des précipitations moyennes annuelles de 430 mm (fig. 2) entre les années 1921-1967 (1577 mm) et 1968-1988 (1148 mm). La principale conséquence est une modification du fonctionnement hydro-pédologique de ce milieu envahi par les eaux marines.

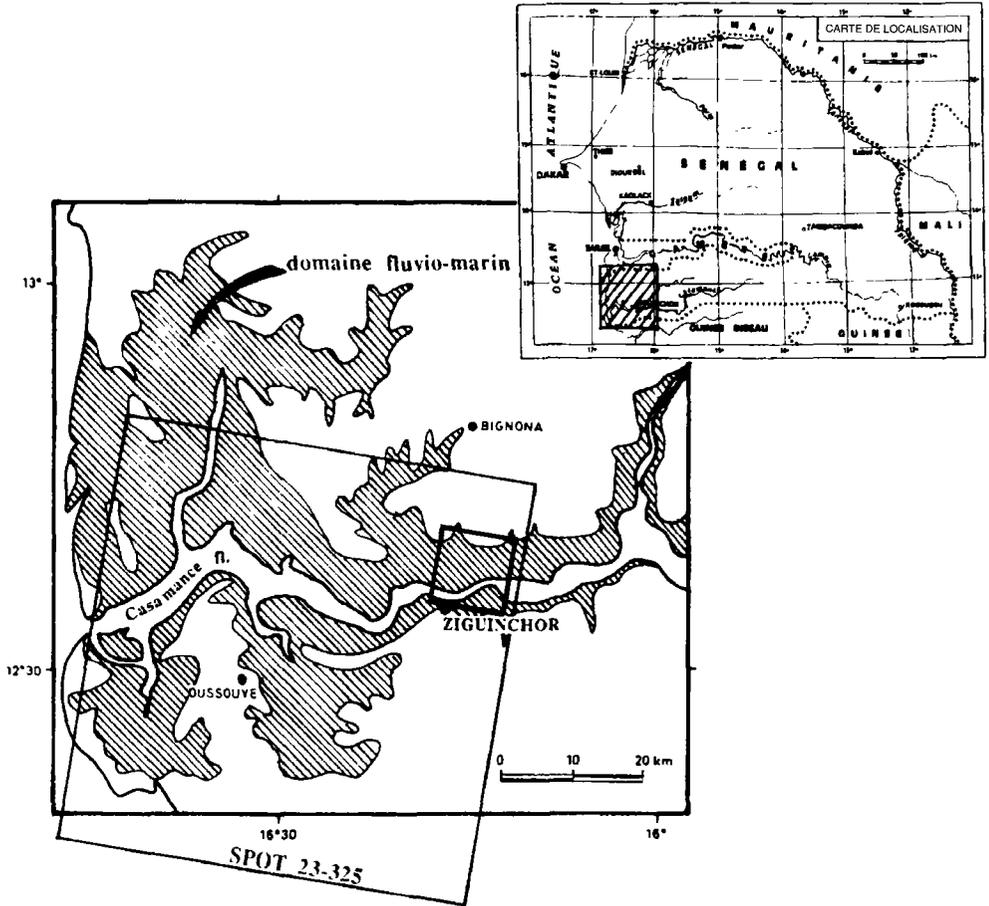


Figure 1. Carte de localisation

1.1 Le milieu

En aval de l'actuelle ville de Ziguinchor, l'ancien golfe nouakchottien s'est progressivement comblé entre 5000 et 1500 ans AA. Le domaine fluvio-marin est organisé en trois grandes unités de paysage le long du réseau hydrographique finement digité vers un plateau peu élevé (20 à 40 m) :

- bas-fond (couvert de palétuviers, salé et régulièrement envahi par les marées);
- tannes (étendues dénudées ou peu couvertes, hypersalées et très acides, régulièrement inondées);
- terrasses (peu ou non salées et acides).

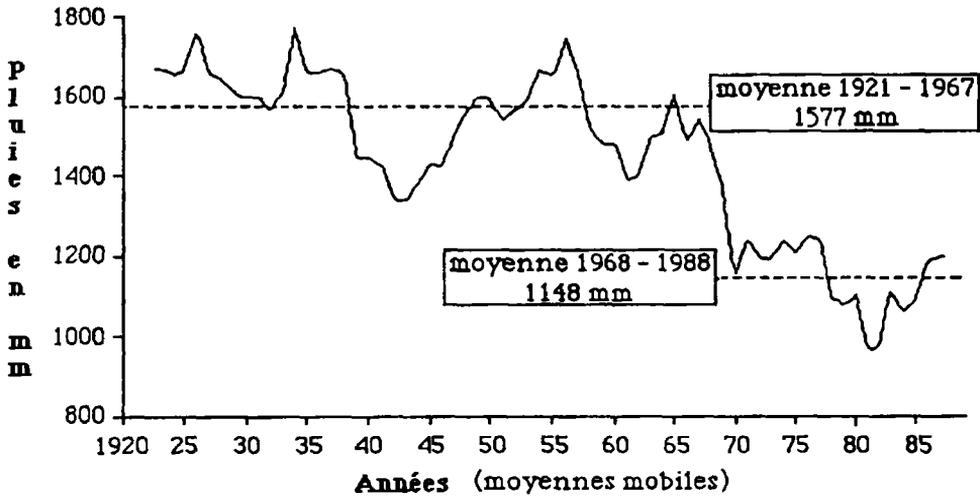


Figure 2. Évolution des précipitations moyennes annuelles de 1921 à 1988

En saison sèche sous l'effet de l'évaporation, les sels se concentrent dans la partie supérieure des nappes (bas-fond, tannes) et s'accumulent à la surface des sols salés à battement de nappe saisonnier (tannes).

La végétation de mangrove à *Rhizophora* est à l'origine d'une concentration de sulfures dans les sols (Marius, 1985). Leur présence entraîne, après une exondation prolongée, une acidification brutale, forte (pH 7 à < 3 en quelques jours) et irréversible.

1.2 Évolution actuelle

Le fleuve Casamance fonctionne actuellement en estuaire inverse. Son régime hydrologique très déficitaire et la faible pente favorisent l'intrusion pratiquement permanente des eaux marines qui se concentrent pendant les huit mois environ de saison sèche (Pagès *et al.*, 1987).

Le déficit et la mauvaise répartition des pluies a entraîné :

- une augmentation de salinité des nappes et des sols atteignant 2 à 3 fois et plus celle de l'eau de mer;
- une diminution du niveau moyen du toit des nappes superficielles de quelques centimètres à plusieurs mètres sous le plateau;
- l'acidification des sols de mangrove et de certaines terrasses.

Les conséquences sur la végétation naturelle sont catastrophiques avec en particulier la disparition progressive puis totale de la mangrove depuis l'embouchure vers l'amont. Elle laisse la place à des sols nus et à de nouveaux tannes. La riziculture traditionnelle en domaine salé a disparu et se limite à une partie des terrasses, aux parties hautes de vallées et en amont des aménagements anti-sel (Barry *et al.*, 1988).

L'absence d'une couverture aérienne récente sur l'ensemble de la région et l'évolution rapide des états de surface rendaient difficile la réalisation d'un bilan précis sur le milieu. Seule la télédétection spatiale apportait une solution. L'imagerie satellitaire SPOT a été utilisée pour réaliser une évaluation des zones atteintes par l'accroissement de la salinité et de l'acidité. Le milieu «mangrove» se prête bien à cette démarche du fait de la présence

d'espèces monospécifiques bien organisées dans le paysage et d'états de surface à évolution saisonnière contrastée (Berenger, 1985; Populus et Herz, 1985).

2 Matériel et méthode

2.1 Programmmations SPOT et acquisition des données de terrain

La résolution au sol de 20 m des données multispectrales du satellite SPOT est adaptée à l'observation des états de surface définis comme l'interface sol-atmosphère (Escadafal, 1989). Des programmations ont été réalisées en fin de saison des pluies (12/10/1986) et fin de saison sèche (08/05/1987) pour la caractérisation d'unités dynamiques à partir des deux extrêmes saisonniers favorables à la prise des images. Les sites de contrôle au sol sont implantés sous forme d'une trentaine de séquences-test réparties sur l'image, du plateau vers les marigots. Les travaux de terrain sont réalisés dans la période d'acquisition des images et au cours de l'année le long des séquences : descriptions des états de surface et photographies verticales depuis un mat de 6 m, photographies aériennes à basse altitude, prélèvements des sols et des nappes.

2.2 Traitements des données numériques

Les séquences sont repérées sur une composition colorée réalisée à partir des canaux bruts étalés. On échantillonne à l'écran les différents états de surface observés sur le terrain (5 à 10 environ par séquences). Ces zones sont classées (classification ascendante hiérarchique) d'après leurs réponses spectrales sur les canaux bruts et différents indices (indice de végétation : $XS3-XS2/XS3+XS2$; indice de brillance : $(XS2^2+XS3^2)^{1/2}$). L'utilisation des valeurs moyennes des canaux bruts XS2, XS3 et accessoirement XS1, a été suffisante (Guillemyn *et al.*, 1988) pour réaliser une classification dirigée des états de surface aux deux saisons (distance euclidienne). La superposition des images des deux dates permet de lever la plupart des confusions radiométriques. Cette classification est testée sur des séquences de contrôles à partir des photographies aériennes réalisées sur place.

Le document de base est une carte thématique d'états de surface multidates représentée ici à l'échelle de 1:80 000 (fig. coul. 16-3). L'intérêt de ce document est d'associer à chaque thème des données exogènes, non directement perçues par les capteurs. Elles sont obtenues sur les séquences-test au moment de la description et de l'analyse des échantillons. Les états de surface dans le paysage jouent le rôle de marqueurs de caractères hydro-pédologiques. Nous nous sommes ici intéressés à la salinité et l'acidité des sols et des nappes, principales contraintes à la mise en valeur de ce milieu.

3 Résultats

3.1 Cartographie des états de surface

On distingue sur la carte des états de surface, après regroupements, les six grandes unités suivantes, classées en fonction de l'inondation par les marées et les pluies, des parties basses du paysage vers les parties hautes :

1) mangroves hautes en bon état ou en voie de dégradation, quotidiennement inondées, sur bas-fond vers l'embouchure et le long de la Casamance;

2) mangroves hautes à basses dégradées et vasières, quotidiennement inondées aux marées moyennes, sur bas-fond;

3) surfaces nues à croûtes salines et micro-agrégats en saison sèche, inondables à rarement inondables, sur tannes vifs;

4) surfaces à strate herbacée halophile ou non, inondables à rarement inondables, sur tannes herbues;

5) surfaces à strate herbacée, arbustive à arborée, et rizières, sur terrasses;

6) surfaces à strate arborée à arbustive (palmeraie dominante), herbacée, et cultures sèches, limites entre le domaine fluvio-marin et le plateau.

Le pH neutre à faiblement acide *in situ* dans les sols de mangroves actives ou dégradées (sols potentiellement sulfatés acides) s'accroît brutalement sous les tannes (sols sulfatés acides). L'augmentation de la salinité se manifeste par la présence d'une végétation adaptée arborée à arbustive (palétuviers), puis herbacée halophyte, et dans les cas extrêmes avec des surfaces nues à croûtes salines ou à structure micro-agrégée. Sur les terrasses, les sols sont plus évolués, acides à localement hyperacides. Le front salin pénètre sous les basses terrasses.

La diminution de hauteur et de densité des palétuviers (Blasco, 1989), en général *Rhizophora* puis *Avicennia* en retrait, se produit sous l'action du stress salin. Du point de vue morphologique, les peuplements à *Rhizophora* constituent plutôt des plages homogènes alors que ceux à *Avicennia*, seul ou en mélange, forment des bosquets isolés ou anastomosés sur un sol nu plus clair. La combinaison de ces facteurs de terrain permet une bonne distinction radiométrique des types de mangroves.

Les deux dates apportent des informations complémentaires. En saison sèche par rapport à la saison des pluies, la strate herbacée n'est plus active et les rizières possèdent souvent des luminances de sols nus (confusions avec les tannes). La végétation pérenne se différencie selon l'importance des effets du stress hydrique et surtout salin. La dessiccation modifie la structure des horizons de surface salés et rarement inondés.

À partir de ce document synthétique, des cartes dérivées sont établies directement d'après les éléments décrivant les états de surface et leur évolution saisonnière : cartes de végétation, des zones cultivées, des zones inondables, et grâce aux données exogènes : cartes de salinité et d'acidité des sols et des nappes. Chaque unité correspond à un ou plusieurs thèmes radiométriques «états de surface». La légende exprime l'intervalle moyen de variation saisonnière ou spatiale du caractère étudié pour chaque unité.

3.2 Cartes des états de surface et du pH - exemple au nord de la ville de Ziguinchor

L'extrait de la carte des états de surface présenté à la figure couleur 16-3 correspond à une zone très dégradée au nord de la ville de Ziguinchor (15 thèmes de sols et d'eaux). La végétation de mangrove ne subsiste qu'en liséré le long des marigots (*Rhizophora racemosa* et *mangle*, associés à *Avicennia africana*). En arrière s'étalent des vasières nues régulièrement couvertes par les marées et d'autant plus salées que l'on s'éloigne des axes de drainage.

La figure couleur 17-4 représente la carte du pH de l'horizon de surface (mesures *in situ*). À chaque unité correspond un intervalle de pH (variation spatiale). L'importance de la gamme de pH observée sur les terrasses (unité 2) est due à la présence de sulfates d'aluminium non décelables radiométriquement. Les unités 4 et 5 pourraient être isolées comme domaines potentiellement acides du fait de la présence de sulfures dans les sols.

4 Commentaires

Des confusions existent encore entre des états de surface de tannes et de basses terrasses salées à faible couverture végétale (<15%), et entre des hautes terrasses et le plateau. Au moment de la superposition des images, les unités qui apparaissent à la limite des thèmes communs sont affectées à l'état de surface le plus proche.

Les pixels mal classés atteignent 5 à 15% selon les unités et parfois plus quand les limites correspondent aux domaines saturés par la marée au moment de l'acquisition. C'est le cas entre les états de surfaces des sols nus de bas-fond et des tannes.

L'extension des classifications réalisées à partir de séquences-test à une partie de l'image n'est satisfaisante que si le milieu possède un degré de dégradation et un stade de marée similaires. Il est donc nécessaire de découper au préalable l'image selon l'état de la mangrove et l'apparition de sols nus plus ou moins exondés de l'aval vers l'amont. Ceci pose rapidement des difficultés de raccordement entre les cartes et une multiplicité des thèmes.

Une approche plus globale consistera à mieux stratifier l'ensemble de l'image et à travailler sur les unités de paysage. Elles peuvent être définies en tenant compte de la structure de l'image en relation avec le réseau hydrographique et l'évolution saisonnière de la végétation. Une délimitation manuelle est aussi envisageable. Cette démarche s'avère d'autant plus indispensable que la couverture totale de la basse Casamance nécessite plusieurs images.

5 Conclusions

L'imagerie satellitaire est ici un outil adapté à la cartographie des états de surface et à la détection de caractères chimiques des sols et des nappes. L'approche diachronique permet une classification liée à l'évolution saisonnière des états de surface. La généralisation de cette méthode nécessite de mettre en évidence au préalable les structures du paysage. Particulièrement dans ce milieu, les cartes d'états de surface et de caractères doivent être actualisées. Cette étude pourra servir de référence pour des suivis ultérieurs, en particulier sur les nombreuses vallées aménagées.

6 Références

- BARRY, B., P. BOIVIN, D. BRUNET, J.-P. MONTOROI, B. MOUGENOT, J. L. SAOS, J. TOUMA et P. ZANTE, 1988. Sécheresse et modification des ressources hydriques en basse Casamance, conséquences pour le milieu naturel et son aménagement. — Deuxièmes Journées de l'eau au Sénégal, Eau et développement, 8-10 décembre 1988, Dakar, 22 p.
- BERENGER, A. C., 1985. Reconnaissance des terrains salés par télédétection. — Institut de la carte internationale du tapis végétal, CNRS/Université Paul-Sabatier, Toulouse, 39 p.
- BLASCO, F., 1989. Recherches en télédétection sur les mangroves africaines. — Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection, n° 114, 1989-2, p. 17-19.
- ESCADAFAL, R., 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). — Collection Études et thèses, Éditions ORSTOM, Paris, 317 p.

Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de Casamance

- GUILLEMYN, D., C. MARTEL, G. FLOUZAT et F. BLASCO, 1988. Études des forêts de berge de Gambie et des critères de détection de la mortalité. —SPOT-1 : Utilisation des images, bilan, résultats, Paris, novembre 1987. Cepadues Éditions, Toulouse, p. 113-120.
- MARIUS C., 1985. Les mangroves du Sénégal, écologie, pédologie, géochimie, mise en valeur et aménagement. —Collection Travaux et documents, n° 193, Éditions ORSTOM, Paris, 357 p.
- PAGÈS, J., J. P. DEBENAY et J. Y. LEBRUSQ, 1987. L'environnement estuarien de Casamance. —Revue Hydrobiologie tropicale, 20, 3-4, p. 191-202.
- POPULUS, J. et R. HERZ, 1985. Cartographie des mangroves de la côte sud-est du Brésil avec Landsat TM. —Photo-interprétation, n° 85-2, p. 31-37.

17

Étude de l'évolution de la végétation du «V Baoulé» (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection

KOUAKOU ÉDOUARD N'GUESSAN

Département de botanique et biologie végétale, Faculté des sciences et techniques, Université d'Abidjan, 22 B. P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Résumé

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet pilote PNUD/FAO-IVC/87/006 intitulé «Suivi du couvert végétal». L'exploitation des données satellitaires SPOT et Landsat a permis de discriminer la répartition des différentes formations végétales au contact des secteurs soudanien et guinéen ivoiriens, précisément dans la région du «V Baoulé», zone de mosaïque forêt/savane.

À l'aide de ces images, il a été possible de mettre en évidence l'évolution du couvert végétal de cette région sous l'effet d'actions d'origines diverses : défrichements agricoles, feux de brousse et urbanisation croissante.

Les traitements numériques effectués ont permis d'obtenir une classification supervisée de ces images, validée par des observations de terrain, et de noter les divers stades de dégradation de la forêt jusqu'aux différents types de savane.

Il ressort de cette étude que l'imagerie satellitaire utilisée permet de faire une cartographie qui rend compte de l'évolution d'ensemble de la région et de mesurer effectivement le sens de cette évolution.

1 Introduction

Cette étude entre dans le cadre du projet PNUD/FAO pour le suivi du couvert végétal de la zone forestière de la Côte d'Ivoire. On sait que la forêt ivoirienne subit, depuis plusieurs

années, de fortes pressions diverses entraînant une dégradation dramatique des ressources naturelles renouvelables. L'importance de cette dégradation des formations végétales naturelles a de graves incidences aussi bien sur la production agricole et le potentiel ligneux que sur l'écosystème en général.

Toutes les études effectuées par divers auteurs (Chevalier, 1909; Aubreville, 1957; Lanly, 1969) sur le couvert forestier national ont stigmatisé la régression régulière des ressources végétales. En effet, si au début de l'ère coloniale le pays disposait d'une belle couverture forestière naturelle estimée à 15 millions d'hectares, les différents inventaires établis par l'administration forestière ont révélé que la déforestation s'est faite à un rythme accéléré.

Ainsi, il ressort qu'entre 1956 et 1966, le rythme moyen de déforestation était de 28 000 ha/an et, entre 1966 et 1980, de 31 000 ha/an.

On estime également que le taux de boisement de la région forestière est passé de près de 60% en 1956 à moins de 20% en 1966.

Cette dégradation de la végétation naturelle concerne aussi les savanes guinéennes largement défrichées pour l'acquisition de nouvelles surfaces agricoles. Pour ces savanes, ce phénomène est accentué par le fait que, même abandonnées après les cultures, elles sont parcourues de nouveau par les feux saisonniers.

La destruction régulière des formations naturelles végétales est due à diverses activités si bien que celles-ci évoluent des stades primaires de la forêt dense aux différents faciès de dégradation et de reconstitution et enfin à l'invasion des surfaces par l'agriculture.

Cette dernière, dans bien des cas, est pratiquée sans fertilisant ou rotation culturale et est itinérante. Tout ceci est accéléré également par une démographie et une urbanisation croissante.

Face à la disparition du couvert forestier national, le gouvernement ivoirien a reconnu, comme préalable à toute action de planification et de gestion, la nécessité d'acquérir les données de base indispensables à l'élaboration de façon prioritaire et urgente d'une politique de développement et de gestion agro-sylvo-pastorale équilibrée.

Il est également nécessaire d'étudier et de cartographier les changements du couvert végétal de même que de mettre au point une méthode de surveillance de la déforestation et un système capable de protéger effectivement les zones classées et leurs espèces. Pour cela, le point sur l'état de l'occupation du sol en général et du couvert végétal en particulier est à réaliser le plus rapidement possible.

L'utilisation des données satellitaires à haute résolution SPOT et Landsat TM permet de mettre en évidence, comprendre et analyser les mécanismes des différents changements.

L'exploitation de ces données est donc importante pour déterminer et suivre les différentes évolutions. L'étude du «V Baoulé», zone de contact forêt/savane, entre dans ce cadre.

En effet, la répartition des types de végétation dans cette zone au contact des secteurs guinéen et soudanien a connu de nombreuses investigations scientifiques il y a plusieurs années. Bien que la problématique de cette question ne soit pas encore entièrement élucidée, ce sujet est depuis une dizaine d'années relativement moins bien étudié. Cela est essentiellement lié aux limites des moyens traditionnels d'études. Avec l'apport de l'imagerie satellitaire, la problématique ne réside plus dans la connaissance de l'origine climatique, édaphique ou anthropique des savanes, comme c'était le cas dans les études classiques, mais dans la mise en évidence du sens de l'évolution de la végétation dans la zone de contact elle-même.

Ainsi, la divergence des conclusions, avancé ou recul forestier, provient du fait que jusqu'ici les différentes études ne permettent pas de faire une généralisation car les stations d'observations, toujours peu nombreuses, ne suffisent pas pour montrer une évolution d'ensemble.

Actuellement, tout porte à croire que le sens de l'évolution est favorable à la savanisation; il n'a, en fait, jamais été mesuré ou quantifié effectivement.

2 Objectifs de l'étude

Les objectifs de cette étude, décrits dans le document de ce projet IVC/87/006, sont les suivants :

a) À long terme :

- «Donner aux organisations gouvernementales les moyens de disposer d'une information précise et actuelle sur la gestion et la protection des ressources naturelles de la Côte d'Ivoire»;
- «Permettre une plus grande efficacité dans l'inventaire et la cartographie des surfaces et dans le suivi et l'évolution des ressources naturelles».

b) À court terme :

- «Apporter une assistance dans l'analyse et l'interprétation des images satellitaires pour la gestion des ressources naturelles»;
- «Réaliser des études méthodologiques sur des zones-tests utilisant la télédétection avec des cibles choisies».

Cette étude pilote «Suivi du couvert végétal» entre dans cet objectif immédiat car son but est d'étudier l'évolution de la zone de contact forêt/savane dans la région du «V Baoulé» (Yamoussoukro-Toumodi-Dimbokro).

Elle s'appuie sur deux projets actuellement en cours qui sont :

- la réalisation et la mise à jour de la carte des forêts classées de la Côte d'Ivoire au 1:100 000 par télédétection;
- la réalisation et la mise à jour de la carte d'occupation du sol pour l'ensemble du territoire au 1:100 000 par télédétection.

3 Approche méthodologique pour la classification de la végétation étudiée : principe et caractéristique

L'étude et la cartographie de la couverture végétale naturelle ou cultivée exigent au préalable que l'on définisse les types de végétation à délimiter. Ceci suppose non seulement que l'on ait une bonne connaissance des formations concernées, mais impose surtout l'adoption de principes et concepts de classification adéquats.

Une revue sommaire des concepts et classifications de la végétation naturelle existants montre que, depuis Humboldt en 1805, de nombreux auteurs ont essayé de définir et classer les types de végétation avec des critères variés, fondés :

- soit essentiellement sur les caractères propres de la végétation elle-même tels que la physionomie et la flore des groupements végétaux (Beard, 1944; Aubreville, 1956);
- soit principalement sur les paramètres climatiques tels que la température et la pluviométrie (Aubreville, 1949);
- soit sur des caractères écologiques et dynamiques en montrant la relation entre la végétation et le milieu ainsi que l'action du facteur biotique (Champion et Seth, 1968).

Il apparaît que les critères de classification de la végétation sont peu nombreux et peuvent être regroupés et rattachés en quatre ordres de considérations qui sont physionomiques, écologiques, floristiques et évolutives.

Par contre, on dénombre une multitude de systèmes de classification définis selon une terminologie propre à chaque auteur suivant un objectif particulier, créant ainsi une grande confusion dans la nomenclature des formations végétales.

Afin d'utiliser des systèmes de classification couramment employés et universellement reconnus et acceptés, des classifications internationales ont été définies. Pour le monde tropical, on distingue essentiellement :

- la classification de Yangambi (Trochain, 1957) fondée principalement sur des bases physionomiques mais également écologiques; elle s'applique surtout à l'Afrique;
- la classification de l'UNESCO (1973), qui est un essai de classification universelle, établie en vue d'une cartographie de la couverture végétale mondiale à petite échelle; elle est basée sur la physionomie et la structure en liaison aux habitats ou environnements écologiques importants.

L'analyse des différents types de classification cités montre que les principes et concepts de classification doivent dépendre en premier lieu des objectifs de l'étude et également correspondre à la nature des éléments étudiés. Ils doivent enfin être compatibles avec les classifications déjà existantes dans le monde tropical.

Dans le cas de cette étude, la zone du «V Baoulé», cadre de l'étude, constitue en elle-même une région possédant un contexte écologique et floristique caractéristique; dans cette région, nous nous sommes attachés à définir les types de formations végétales selon les classifications de Yangambi et de l'UNESCO. L'action humaine est également considérée surtout dans l'interprétation des images satellitaires car les types de végétation sont classés en tenant compte aussi de leur degré d'ouverture donc en fonction de leur état de dégradation. Ainsi, les différents faciès de dégradation et de reconstitution pris par les formations végétales à la suite des interventions humaines sont notés.

La carte d'Adjanohoun et Guillaumet (1971) était notre document de référence.

4 Présentation de la zone d'étude

4.1 Localisation

La zone d'étude (fig. 1) couvre les départements de Yamoussoukro, Toumodi et Dimbokro sur une superficie d'environ 632,11 km² et est comprise entre les fleuves Bandama à l'ouest et N'Zi à l'est.

Elle occupe ainsi l'interfluve de ces deux fleuves. La partie sud a la forme d'un profond saillant constituant une grande échancrure de savane ouverte dans la forêt dense formant un «V» couramment appelé le «V Baoulé». C'est la partie méridionale de la zone de contact forêt/savane qui matérialise le passage entre le domaine guinéen au sud et le domaine soudanien au nord. Cette zone est située entre les longitudes 5° E et 6° O et les latitudes 7° N et 6° S.

4.2 Climat, sols et végétation

4.2.1 Climat

La zone étudiée est entièrement soumise au climat équatorial de transition atténué (climat baouléen) caractérisé par une saison sèche qui dure de novembre à avril et précède une saison des pluies marquée par deux maxima pluviométriques : pluviosité de 1 200 à 1 600 mm/an. Le déficit hydrique cumulé varie de 250 mm à 450 mm.

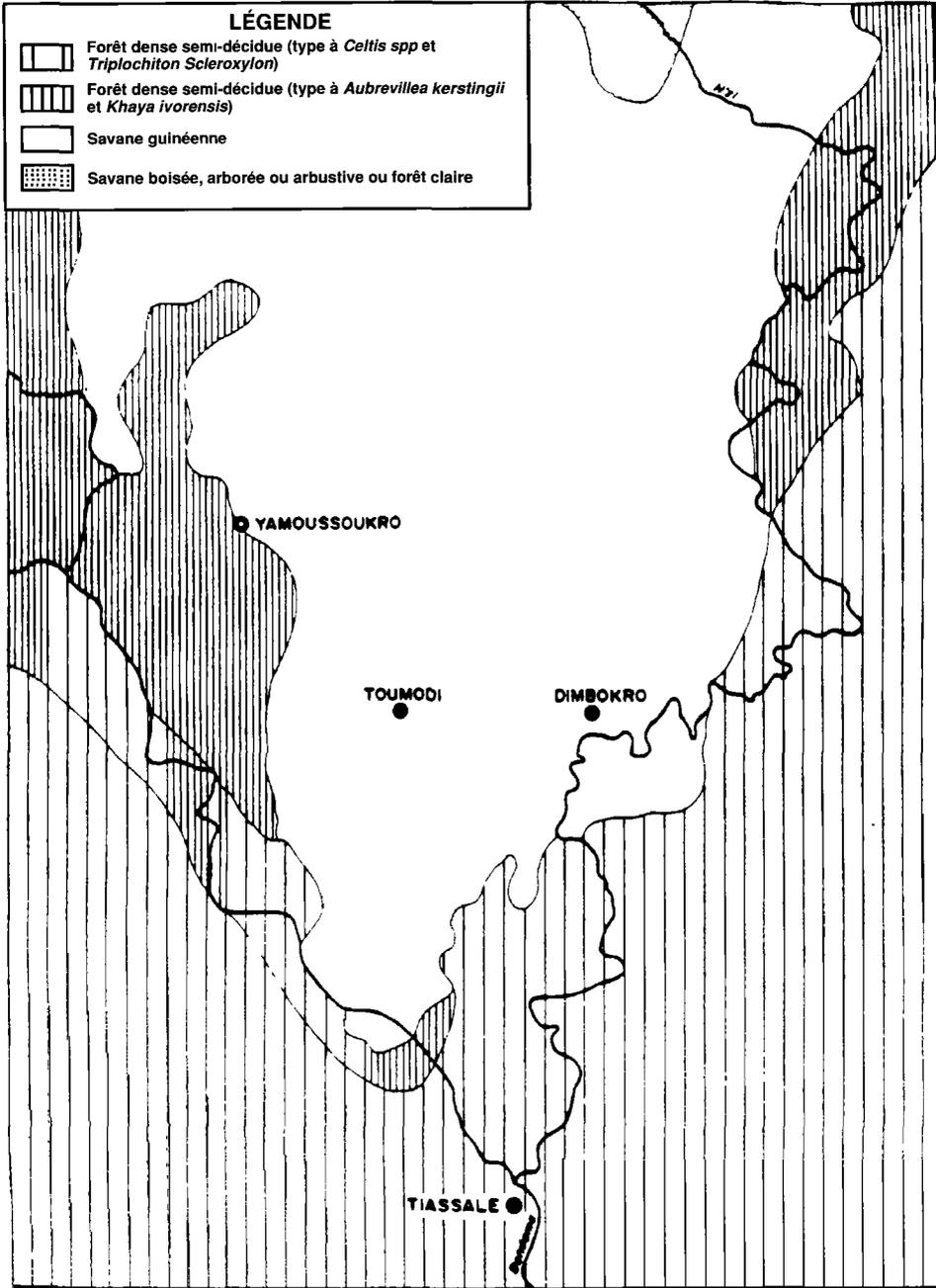


Figure 1. Zone d'étude du «V Baoulé»

4.2.2 Sols et sous-sol

Le sous-sol de la région est constitué par de vastes massifs granitiques et de roches métamorphiques et schisteuses en longues chaînes orientées NNE-SSO. Les points culminants de cette zone (450-500 m) sont l'Orumbo-Boka, le Kokumbo et le mont Dodo.

On rencontre de nombreux types de sols juxtaposés dans cette région. Ce sont des sols ferrallitiques plus ou moins remaniés, des sols ferrugineux dérivés des colluvions granitiques sableuses. Ces derniers sont localisés dans le couloir du N'Zi et dans la région de Toumodi.

4.2.3 Végétation

La végétation est une mosaïque de savane guinéenne et de forêt dense humide semi-décidue type à *Celtis spp* et *Triplochiton Scleroxylon* et type à *Aubrevillea kerstingii*.

La savane guinéenne est, quand à elle, composée généralement de hautes graminées parmi lesquelles on distingue des arbres et arbustes de dimensions variables et des forêts-galeries densément boisées autour des cours d'eau.

5 Données utilisées

Nous disposons pour cette étude des données suivantes :

- cartes topographiques de l'Institut géographique de Côte d'Ivoire (IGCI) au 1:200 000 de 1971;
- carte de végétation de la Côte d'Ivoire au 1:500 000 (Adjanohoun et Guillaumet, 1971);
- deux images multispectrales SPOT et TM sur bandes magnétiques (image SPOT 49-337 du 03/08/86; image TM 196-56 du 05/12/84);
- deux tirages sur papier en compositions colorées au 1:100 000 des images précédentes;
- cartes d'occupation du sol au 1:100 000 des départements de Yamoussoukro, Dimbokro, Toumodi réalisées au Service autonome de télédétection de la Direction et contrôle des grands travaux de Côte d'Ivoire (SAT/DCGTx).

6 Méthode

La méthode utilisée pour réaliser cette étude comprend les différentes phases suivantes.

6.1 Collecte des données

Au cours de cette phase, nous avons collecté toutes les données nécessaires pour une connaissance meilleure et approfondie de la région du «V Baoulé». Ce sont des données bibliographiques sur les caractéristiques climatiques, géomorphologiques, pédologiques et sur la végétation, de même que les nombreuses études réalisées sur la station expérimentale de Lamto située à 5° 02' de longitude ouest et 6° 13' de latitude nord dans cette région.

Nous avons aussi procédé à la réalisation du fond planimétrique de la carte à partir des films au 1:100 000 des cartes topographiques IGCI d'où sont extraits les réseaux hydrographique et routier et certains détails caractéristiques.

Nous avons aussi recalé sur ce calque les images satellitaires SPOT et TM qui sont également au 1:100 000.

6.2 Analyse visuelle

Elle a consisté à faire une interprétation visuelle, c'est-à-dire l'application de la méthode classique de la photo-interprétation à l'image satellitaire. Ainsi, l'examen des compositions colorées des tirages papiers Geopic et SPOT a permis d'identifier des zones homogènes grâce aux critères de couleurs et des textures.

Ces zones correspondent à des unités physionomiques de végétation sur le terrain. L'interprétation est facilitée par la corrélation entre les tonalités de couleur sur les compositions colorées et notre connaissance de la végétation et de l'écologie de cette zone.

Les contours de ces différentes unités physionomiques ont été tracés sur les compositions colorées. Cette interprétation a permis de déterminer les unités thématiques suivantes :

- forêt dense à canopée fermée;
- forêt dense à canopée ouverte;
- forêt dégradée;
- mosaïque de cultures et de végétation (forêt ou savane);
- forêt-galerie;
- bois fourrés, savane boisée;
- savane arborée, savane arbustive;
- savane herbeuse;
- cultures (industrielles ou vivrières);
- sols nus (inselberg, affleurements rocheux, sols indurés et cuirasses), habitations;
- étendues d'eau libre (barrages, retenues d'eau et mares), fleuves.

Les compositions colorées analysées sont les tirages SPOT et TM (Geopic) réalisés respectivement selon les canaux 3, 2 et 1 (pour SPOT) et 3, 4 et 7 (pour TM).

6.3 Étude de terrain

Une mission d'étude sur le terrain a été effectuée du 22 au 27 mai 1989 dans la zone-test. Elle avait pour but de :

- reconnaître et définir les différentes formations végétales et toutes les autres unités thématiques selon leurs réponses spectrales sur les compositions colorées;
- caractériser les types de végétation en fonction de leur physionomie, leur composition floristique et leur évolution;
- vérifier les résultats de l'interprétation visuelle des images satellitaires et apporter des précisions pour les zones difficiles à interpréter, soit à cause des nuages (très présents sur l'image TM), soit à cause des feux de brousse, très nombreux dans cette région;
- contrôler le calage géographique en fonction de certains repères parfaitement identifiables tels que les villages, les carrefours de pistes, les coudes de cours d'eau ou le croisement des fleuves N'Zi et Bandama;
- noter l'impact de l'action humaine dans cette évolution de la végétation;
- indiquer, si possible, tous les changements reconnus à partir de la comparaison de l'interprétation visuelle préliminaire des images satellitaires et de la carte de végétation d'Adjahoun et Guillaumet;
- apporter d'autres informations impossibles à extraire des images satellitaires comme la stratification des différentes formations végétales.

L'observation directe du paysage aide donc dans la compréhension des réponses spectrales des entités au sol et permet de saisir le rôle des ligneux suivant leur densité dans ces réponses.

Cette mission sur le terrain s'est faite en s'appuyant sur toutes les cartes déjà disponibles et les interprétations préliminaires des images satellitaires.

6.4 Validation de l'interprétation par les données de terrain

Cette étape a permis d'améliorer l'interprétation visuelle. Elle a consisté à transférer les données acquises sur le terrain sur le calque d'interprétation des images étudiées, permettant ainsi soit de corriger l'interprétation soit de la compléter. Ainsi, les contours et les formes des unités physiologiques délimitées essentiellement sur les images satellitaires ont été reconnus et vérifiés au cours de la mission sur le terrain. Certaines unités homogènes suffisamment représentatives de la diversité de la zone entière, reconnues au préalable sur les images et sélectionnées sur l'itinéraire de terrain, ont été contrôlées pour la vérification de leur homogénéité réelle. C'est à l'intérieur de ces unités homogènes qu'ont été choisies les parcelles d'entraînement ou d'apprentissage dans la classification supervisée lors des traitements numériques.

6.5 Traitements numériques

L'analyse visuelle est soumise à des risques d'erreurs et à des confusions car la photo-interprétation des compositions colorées d'images satellitaires comporte certaines difficultés liées à celles-ci.

Ainsi, des objets identiques peuvent avoir des couleurs et des teintes différentes d'une image à l'image. La séparation des thèmes peut également être difficile à délimiter visuellement.

Nous avons donc été amené à effectuer des traitements numériques afin d'affiner les résultats de l'analyse visuelle en utilisant les données quantitatives et qualitatives des images traitées par des moyens informatiques. Ces traitements ont été effectués sur le système de traitement d'images du SAT/DCGTx.

La totalité des deux images SPOT (44-337) et TM (196-56) a été visualisée grâce au système I²S. Ensuite, après seuillage et amélioration de la dynamique, une composition colorée pour l'ensemble de l'image SPOT selon les canaux 3-2-1 et une autre pour l'image TM selon les canaux 4-7-3 ont été réalisées.

Notons que l'image TM (196-56) comporte un très fort pourcentage de nuages. Ce qui rend son exploitation impossible dans certaines parties.

6.5.1 Découpage des fenêtres et réalisation des compositions colorées

La suite des traitements s'est effectuée sur un micro-ordinateur avec le logiciel DIDACTIM. Compte tenu de la capacité de mémoire du micro-ordinateur utilisé, nous avons choisi de travailler sur des fenêtres de 512 par 512 pixels correspondant à des carrés de 10,24 km de côté.

Ainsi, six fenêtres de 512 par 512 pixels très représentatives de la diversité du milieu d'étude que constitue la zone du «V Baoulé» ont été choisies.

La composition colorée améliorée de l'une de ces six fenêtres est présentée à la figure couleur 17-2.

6.5.2 Les indices de végétation

Nous avons procédé à la création d'un nouveau canal issu de la combinaison linéaire des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR). L'équation utilisée est la suivante : $IV = (PIR - R) / (PIR + R)$, où IV est un indice de végétation.

Il présente l'avantage d'être sensible au taux de couverture au sol et à la biomasse.

La visualisation de l'indice de végétation nous a permis de distinguer les formations boisées très denses, les formations peu denses et les zones très dégradées ou les sols nus, figure couleur 17-3.

6.5.3 Les parcelles d'apprentissage

Ces parcelles d'apprentissage sont la base des traitements effectués. À partir des observations de terrain, les parcelles ont été localisées et toutes tracées sur les compositions colorées qui représentent mieux la vérité terrain.

Leurs contours ont été délimités en évitant de prendre en compte les pixels de bordure afin de limiter la variabilité intraparcellaire.

6.5.4 Classification supervisée

Grâce au logiciel DIDACTIM, une classification barycentrique a été effectuée à partir des caractéristiques statistiques des classes relevées dans chacun des canaux lors de la phase d'apprentissage (tableau I). Ensuite, après avoir vérifié la qualité de l'apprentissage grâce au calcul de la matrice de confusion, la classification a été généralisée à l'ensemble de l'image. Ces traitements ont ainsi permis d'améliorer les résultats de l'analyse visuelle et de préciser les contours des unités thématiques.

Tableau I. Valeurs statistiques des parcelles d'apprentissage pour les différents thèmes dans les canaux bruts de SPOT

Classes	XS1		XS2		XS3	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Forêt dense à canopée fermée	40,7	0,9	23,5	0,7	93,0	6,4
Forêt dense à canopée ouv., galerie forest.	40,9	1,1	23,7	1,4	76,6	5,0
Forêt dégradée	41,5	0,7	23,4	0,5	109,8	3,9
Savane arborée ou arbustive	44,4	1,2	29,6	1,5	65,8	4,7
Savane herbeuse	45,5	0,9	26,6	0,8	107,9	3,9
Sols nus	60,1	4,5	49,7	3,9	65,8	4,1
Eau	37,1	0,6	21,4	0,6	24,6	2,2

7 Résultats

7.1 La classification supervisée

Le résultat de la classification supervisée obtenue sur la fenêtre-test de Toumodi est visualisé sur la figure couleur 17-4. Sur cette image classée, on distingue les forêts denses à canopée fermée (en rouge pur), les forêts denses à canopée ouverte (en rose), les forêts dégradées (en marron), les savanes arborées et arbustives (en vert), les savanes herbeuses (en jaune vif), les sols nus et zones dégradées (en blanc) et les étendues d'eau, fleuve et lac (en bleu marine).

Le tableau II donne le pourcentage des unités thématiques (classes) discriminées sur cette fenêtre classée.

Tableau II. Fenêtre Toumodi

Classes	Effectifs	%
1 : Forêt dense à canopée fermée	11 884	4,53
2 : Forêt dense à canopée ouv., gal. forest.	52 469	20,02
3 : Forêt dégradée	1 380	0,53
4 : Savane arborée ou arbustive	167 326	63,83
5 : Savane herbeuse	13 101	4,99
6 : Sols nus	15 617	5,96
7 : Eau	367	0,14
Total	262 144	100,00

Pour chaque classe, le programme informatique calcule dans chaque canal la moyenne des valeurs des points de tous les échantillons de la classe et l'écart type (tableau I).

La matrice de confusion de la classification a été calculée (tableau III). Cette matrice permet de vérifier la qualité de l'apprentissage et donne une estimation de la validité de la classification. On constate également les confusions spectrales entre les différentes classes.

Tableau III. Matrice de confusion de la classification effectuée à partir des canaux bruts de SPOT

Classes	Numéro de la classe de réaffectation						
	1	2	3	4	5	6	7
1 : Forêt dense à canopée fermée	90,5	0,4	1,7	0,0	0,2	0,0	0,0
2 : Forêt dense à canopée ouv., gal. forest.	3,6	91,7	0,1	4,2	0,4	0,0	0,0
3 : Forêt dégradée	2,7	0,0	97,3	0,0	0,0	0,0	0,0
4 : Savane arborée ou arbustive	3,3	5,8	2,0	93,3	0,4	0,2	0,0
5 : Savane herbeuse	1,3	0,0	0,0	0,0	97,5	1,9	0,0
6 : Sols nus	0,0	0,0	0,0	0,1	2,0	97,9	0,0
7 : Eau	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	98,9

Dans ce tableau, les lignes représentent l'affectation des pixels à chaque thème après classification, alors que les colonnes indiquent la répartition réelle des pixels dans chaque thème. La diagonale représente les pourcentages des pixels bien classés.

On constate que toutes les classes sont discriminées avec un pourcentage supérieur à 90%.

Le contrôle de la classification avec des parcelles de contrôle issues des observations faites sur le terrain, autres que celles ayant servi pour l'apprentissage, a permis de montrer que les résultats obtenus sont satisfaisants.

7.2 Les unités physiologiques

Toutes ces investigations, à savoir l'interprétation visuelle des compositions colorées, standards et améliorées, l'étude sur le terrain et les traitements numériques, nous ont servi à

discriminer les différentes unités de végétation de la zone étudiée et à établir la carte de la végétation à l'échelle du 1:100 000.

Les unités physionomiques représentant les différents aspects de la végétation de la zone du «V Baoulé» déterminées dans cette étude constituent la légende de la carte établie à l'issue de cette étude. Cette légende comprend les formations végétales, les sols nus et les unités carto-topographiques.

7.2.1 Les formations végétales

a) Végétation naturelle

1) Forêt dense à canopée fermée

Cette formation n'est plus représentée dans la zone du «V Baoulé» qu'à l'état de vestiges dans certains endroits accidentés ou difficiles d'accès comme sur les montagnes de Kokoumbo et de l'Orumbo-Boka. On la rencontre aussi localement sur de faibles superficies à l'ouest non loin des berges du Bandama et au sud-est de la zone étudiée.

Cette forêt est composée de plusieurs strates généralement denses ou caducifoliées. La strate dominante comprend de grands arbres pouvant atteindre 40 m de hauteur. La strate moyenne est continue formant une voûte forestière fermée empêchant la lumière de descendre jusqu'au sol, d'où sa désignation de forêt dense à canopée fermée. Selon la présence des espèces caractéristiques qui la peuplent, on distingue deux types forestiers :

- le type à *Celtis spp* et *Triplochiton scleroxylon* correspondant au type fondamental le plus méridional et le plus humide de la forêt semi-décidue qui sert de transition avec la forêt sempervirente; on l'appelle encore «moist semi-décidue»;

- le type à *Aubrevillea kerstingii* et *Kaya grandifolia* qui constitue le type le plus septentrional et le moins hygrophile.

L'évolution prévisible est la disparition rapide de ces formations en équilibre précaire pour deux raisons : d'une part, le climat se caractérise certaines années par une saison sèche plus marquée et d'autre part, la densité de population est extrêmement élevée et sans cesse croissante.

Cette forêt dense à canopée fermée est identifiable facilement sur les images satellitaires. Sur les compositions colorées standards comme améliorées analysées, elle apparaît en bleu foncé à bleu noir, bleu verdâtre et de texture granuleuse (sur le Geopic TM) et en rouge foncé à rouge noir (sur la composition colorée SPOT).

2) Forêt dense à canopée ouverte

Elle présente les mêmes caractéristiques que la précédente mais diffère de celle-ci par la présence d'ouvertures plus ou moins grandes au niveau de la couronne des grands arbres formant la voûte supérieure.

Dans ces ouvertures, la lumière favorise le développement d'une strate de nature herbacée et arbustive dense. Le taux de couverture des strates supérieures arborescentes est de 85 à 95%.

Cette forêt provient de la dégradation de la forêt dense à canopée fermée. Elle s'identifie très bien sur les images satellitaires par sa très forte densité. Elle apparaît sur les compositions colorées par sa couleur rouge à rose, sa texture identique à celle de la forêt dense à canopée fermée avec des taches roses ou oranges de textures lisses plus ou moins grandes.

3) Forêt dégradée

Ce type forestier découle de la dégradation des deux formations précédentes. Cette dégradation est provoquée soit par l'exploitation forestière soit par l'implantation de l'agriculture. Ce type forestier se retrouve un peu éparpillé et quelquefois en lambeaux dans la zone de la région du «V Baoulé».

Sa physionomie peut s'apparenter à celle d'un taillis. C'est une forêt appauvrie qui se présente sous une forme beaucoup plus mitée que la précédente, la canopée étant très ouverte par des trouées d'origine anthropique plus nombreuses. On y rencontre une strate inférieure herbacée et arbustive favorisée par la pénétration de la lumière jusqu'au sol. Le taux de couverture des arbres peut descendre jusqu'à 60% (fig. coul. 17-5).

Du point de vue de l'évolution, on peut dire que cette formation est vouée à la disparition d'ici quelques années si la dégradation incessante à laquelle elle est soumise n'est pas arrêtée.

Sur l'image satellitaire, l'identification de cette forêt est due à son aspect morcelé lié à son hétérogénéité et aux défrichements qui la minent. Sur les compositions colorées analysées, elle apparaît en rouge pâle à rose et un mélange de taches foncé à rose.

4) Forêt-galerie (galerie forestière)

Cette formation souligne dans le paysage le réseau hydrographique. Elle est généralement moins large, formant une frange étroite d'environ 500 m de largeur car elle est liée à des cours d'eau de moindre importance, permanents ou temporaires. Ces galeries forestières trouvent sur leurs berges des conditions d'humidité suffisantes pour leur plus ou moins grand développement à travers les savanes. Dans cette zone, elle constitue un véritable prolongement de la forêt dense.

Physionomiquement, elle se présente sous forme d'une végétation fermée dans laquelle on peut retrouver les traits marquants de la forêt dense tels que les arbres à contre-forts, les épiphytes, les lianes, etc.

Elle est facilement identifiable sur les images satellitaires car elle suit la forme du réseau hydrographique : cours d'eau et ruisseau. Elle apparaît en rouge pur et rouge sombre sur les compositions colorées (SPOT et TM).

5) Savane arborée/savane arbustive

Ces deux types de savanes constituent la végétation la plus largement représentée dans le «V Baoulé» (fig. coul. 17-6). Elles sont constituées d'arbres et d'arbustes disséminés parmi le tapis graminéen. La savane est dite arborée quand la densité de la strate arborescente varie entre 2 à 20%. Elle est constituée de trois strates.

La savane arbustive est, quand à elle, composée d'un tapis graminéen surmonté d'arbustes. L'étage arbustif a un recouvrement qui ne dépasse pas 20% et sa hauteur atteint rarement 5 m. Cette savane comprend également trois strates. Elle est basse et très espacée avec un couvert herbacé pouvant être dégradé par la présence de sols nus qui apparaissent par endroit. Ces deux types de savanes, savane arbustive et savane arborée, sont dits à Rhonier (*Borassus aethiopum*) eu égard à la présence importante de cette espèce dans ce milieu.

Ces savanes sont soumises chaque année à l'action des feux qui revigorent les graminées et maintiennent les ligneux pyro-résistants très rustiques s'accommodant bien aux incendies.

Ces formations, lorsqu'elles sont protégées des feux, peuvent évoluer vers des broussailles puis vers la savane boisée.

Sur l'image satellitaire, les savanes arborées et arbustives ont un aspect assez uniforme, quelle que soit leur écologie, et elle sont très bien identifiées. Les feux qui les parcourent sont également bien visibles. Elles apparaissent en bleu foncé et en vert-bleu sur les compositions colorées et sur le Geopic du TM analysé en vert-bleu et en vert piqué de points rouges.

6) Les savanes herbeuses

Cette formation est caractérisée par un tapis graminéen continu où arbres et arbustes sont généralement absents. La hauteur du couvert herbacé ne dépasse pas deux mètres. La strate herbacée est dominée par des graminées dont l'importance permet de distinguer plusieurs faciès ou groupements.

La savane herbeuse à *Loudetia simplex* est le groupement le plus représenté dans le «V Baoulé». Elle est présente depuis la pointe du «V Baoulé» de Singrobo aux environs de

Toumodi et s'étend également vers l'est dans la région de Dimbokro. On la rencontre aussi sur la péninsule granitique située entre l'Orumbo-Boka et Toumodi. Elle présente une structure régulière et homogène.

Au nord-est de la région d'étude de part et d'autre du Kan, affluent du fleuve N'Zi (au nord-est de Toumodi), on a le groupement à *Loudetia arundinacea*.

Ces savanes herbeuses occupent généralement les plateaux cuirassés aux sols peu profonds et les bas de versants aux sols alternativement saturés en eau puis très secs. Sur sols drainés, elles sont post-culturales et de faibles étendues. Atteignant 1,5 m à 2 m en fin de saison des pluies, ces graminées sont brûlées chaque année durant la saison sèche. Cette formation herbeuse est bien discriminée sur les images satellitaires. Elle apparaît en bleu clair sur la composition colorée SPOT et en vert clair sur le TM analysé.

b) Les formations liées à l'action anthropique

Très souvent, les plantations diverses sont mêlées à d'autres formations végétales naturelles plus ou moins dégradées. Ce sont par exemple des cultures de caféiers, de cacaoyers, d'ignames, de bananes et de manioc.

Ces plantations ne sont pas identifiables isolément sur les images satellitaires car elles peuvent être plus denses que les formations naturelles. Ainsi, il est difficile dans ces cas de les distinguer sur les images analysées.

On a donc regroupé ce complexe de cultures et formations naturelles sous le terme de mosaïque.

1) Mosaïques

Cette unité physionomique est utilisée pour caractériser un thème chaque fois que celui-ci, trop faible par sa superficie pour être différencié seul à l'échelle de cette étude, est disséminé à l'intérieur d'un autre plus vaste.

2) Mosaïque forêt/cultures

Dans ce cas, on a une forêt mitée par des cultures de café et de cacao ou des cultures vivrières telles que l'igname et le manioc réduisant ainsi la forêt en lambeaux. Selon l'importance de l'état du mitage et de la dégradation de la forêt, on a la mosaïque forêt/cultures avec dominante forêt. Cette mosaïque, sous la pression de l'agriculture, évolue vers une mosaïque forêt/cultures avec dominante cultures et finalement, la formation forestière naturelle disparaît. Sur l'image satellitaire, cette formation constitue une entité «homogène» caractéristique et identifiable.

3) Mosaïque savanes/cultures

Ici, le milieu originel qui constitue la végétation naturelle est la savane. Selon le degré de mitage des savanes par l'agriculture, on rencontre dans le «V Baoulé» deux types de mosaïque savanes/cultures. Les mosaïques savanes/cultures avec dominantes savanes (50% < savane < 90%) et les mosaïques savanes-cultures avec dominantes cultures (10% < savane < 50%).

4) Les cultures

Ce thème englobe tous les types de cultures pratiqués par les paysans des régions du «V Baoulé», c'est-à-dire aussi bien les cultures vivrières sur défrichement itinérant telles que l'igname et le manioc que les cultures pérennes sur de plus grandes superficies comme le café, le cacao et l'ananas. Les parcelles en cours de défrichement au moment des enregistrements satellitaires font aussi partie de ce thème.

5) Les cultures vivrières

La culture vivrière rencontrée dans cette partie du pays est surtout la culture de l'igname, aliment de base des populations Baoulé, à laquelle peuvent s'ajouter les cultures de manioc et de maïs ou de riz dans les bas-fonds.

6) Les cultures industrielles

Dans cette région du «V Baoulé», on rencontre comme cultures industrielles les plantations de cacaoyer, de caféier et d'ananas.

Les plantations de caféier et de cacaoyer sont généralement cultivées sur de petites surfaces et peuvent être aussi denses que les formations naturelles. Elles ne sont pas identifiées isolément sur les images satellitaires analysées. Il est difficile de les distinguer des formations naturelles.

Par contre, les plantations industrielles d'ananas qui ont une structure et une physionomie propres peuvent être reconnues sur les images satellitaires.

Selon leur état phénologique, elles peuvent avoir une réponse voisine des savanes mais leur structure régulière et leur aspect homogène sont des critères de distinction très nets. Ces plantations d'ananas sont localisées dans la pointe du «V Baoulé» dans la région de Singrobo. Elles apparaissent avec des formes géométriques bien distinctes soit en rouge, soit en bleu clair ou vert selon leur état phénologique.

7.2.2 Les sols nus

Sous ce thème ont été regroupés les sols indurés et les cuirasses latéritiques, les inselbergs et les affleurements rocheux et les zones dégradées. Ces zones sont parfaitement identifiables sur les images satellitaires. Sur les compositions colorées analysées, elles apparaissent en couleur blanche à grise blanchâtre à bleutée.

7.2.3 Les unités carto-topographiques

Ces unités, qui ont été matérialisées sur la carte réalisée, sont :

- pistes et routes bitumées et non bitumées;
- villes, villages importants;
- fleuves, cours d'eau, étendues d'eau libre (barrages, retenues d'eau, mares, lacs, marécages).

8 Conclusion

Cette étude a permis de déterminer et discriminer, par télédétection, les types de végétation d'une zone de contact forêt-savane dans la région du «V baoulé».

Les images satellitaires SPOT et TM utilisées ont permis de réaliser une cartographie de la végétation à l'échelle du 1:100 000 de la zone d'étude couvrant une superficie de 632 110 ha.

Cette étude a été faite par interprétation visuelle à partir des documents de base constitués par les compositions colorées SPOT et Geopic de Landsat TM. Les doutes et les confusions au niveau de la discrimination et l'identification des formations végétales dans les cas les moins évidents ont été résolus grâce aux traitements numériques effectués avec beaucoup de précisions sur ces zones et la vérité terrain.

Suivant les critères de reconnaissance et d'interprétation utilisés dans cette étude, on a pu distinguer :

- les formations forestières denses (leur structure homogène ou hétérogène indique leur état de dégradation);
- les types de savanes (savanes boisées, arborées, arbustives, herbeuses), entrecoupés par les galeries forestières qui bordent le réseau hydrographique et quelques îlots de boisements denses;

- les formations artificielles telles que les mosaïques à structure hétérogène et morcelée, les cultures et les sols nus;

- les types particuliers d'occupation du sol tels les défrichements récents et les avancés en inclusion dans les unités forestières et contrastant fortement avec ces dernières.

N'ayant pu disposer d'images satellitaires à des époques différentes pour une cartographie diachronique de la végétation de la zone-test, nous avons pris comme carte de référence pour suivre l'évolution du couvert forestier, la carte de végétation de Adjanonhoun et Guillaumet qui date de 1971.

On constate qu'il y a eu une régression des surfaces des forêts denses dans cette région. Ainsi, les forêts denses semi-décidues à *Celtis spp* et *Aubrevillea kerstingii* qui couvraient de larges surfaces d'environ 233 430 ha en 1971 le long du Bandama et du N'Zi, de même que dans la pointe sud du «V» formé par ces deux fleuves, ont été largement détruites. Il ne reste plus que 18 114 ha de forêts à canopée fermée d'après la carte réalisée par télédétection à la suite de cette étude.

Il ressort donc de cette étude que l'interprétation visuelle d'images satellitaires ou des traitements numériques simples mais fiables et performants permettent de suivre l'évolution du couvert végétal tropical de façon précise.

En effet, les grands types physionomiques de végétation ligneuse et d'occupation du sol sont facilement identifiés de même que les changements au niveau des formations végétales, les occupations agricoles à l'intérieur des unités forestières et l'intensité d'utilisation des sols.

On peut considérer que la méthode utilisée dans ce projet pilote, qui associe à la fois l'analyse visuelle, les traitements numériques, les contrôles de vérité-terrain et une bonne connaissance de l'écologie, de la flore et de la physionomie des types de végétation du milieu d'étude, est satisfaisante.

Elle est opérationnelle et peut donc être étendue à d'autres régions du territoire ivoirien et surtout constituer un moyen pratique pour la surveillance continue du couvert végétal.

9 Références

- ADJANOHOUN, E. et J. L. GUILLAUMET, 1971. La végétation de la Côte d'Ivoire. —in J. M. Avenard *et al.* Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, Paris.
- AUBREVILLE, A., 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. —Société d'édition géographique, maritime et coloniale, Paris.
- AUBREVILLE, A., 1956. Essai de classification et de nomenclature des formations forestières africaines avec extension du système proposé à toutes les formations forestières du monde tropical —Dactylographié.
- AUBREVILLE, A., 1957. À la recherche de la forêt en Côte d'Ivoire. —Bois et forêts des tropiques, n°s 56 et 58, Nogent-sur-Marnes.
- BEARD, J. S., 1944. Climax végétation in tropical America. —Ecology, 25 (2).
- CHAMPION, H. G. et S. K. SETH, 1968. A revised survey of the forest types of India. —Delhi.
- CHEVALIER, 1909. L'extension et la régression de la forêt vierge de l'Afrique tropicale. —CR AC SC t-149, p. 458-461.
- LANLY, J. P., 1969. Régression de la forêt dense en Côte d'Ivoire. —Bois et forêts des tropiques, 127, Nogents-sur-Marne, p. 45-59.

TROCHAIN, J. L., 1957. Accord inter-africain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale. —Bulletin de l'Institut d'État de Centrafrique, nouvelle série, n^{os} 13 et 14, Brazzaville, p. 55-93.

UNESCO, 1973. Classification internationale et cartographie de la végétation. —UNESCO, Paris.

18

Étude par télédétection de l'évolution de l'environnement péri-lagunaire de Bingerville, Bassam et Ono

KOUAKOU ÉDOUARD N'GUESSAN*, YOUPO OREGA** et MAMADOU FOFANA**

**Faculté des sciences et techniques, Université d'Abidjan, 22 B. P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

***Service autonome de télédétection, Direction et contrôle des grands travaux, 04 B. P. 945, Abidjan 04, Côte d'Ivoire*

Résumé

Des photographies aériennes de 1956 et des données satellitaires de décembre 1987 fournies par Landsat TM ont été utilisées pour étudier l'évolution d'un milieu particulier faisant partie de la zone péri-lagunaire.

Ces données ont été exploitées selon la méthode de photo-interprétation classique pour les photographies aériennes et pour le tirage papier de l'image satellitaire. Des améliorations apportées par traitement numérique ont contribué à affiner l'interprétation de l'image satellitaire. Ce travail présente l'état d'occupation du milieu en 1956 et décembre 1987. En conclusion, il apparaît que les zones marécageuses difficiles à mettre en valeur avec les moyens traditionnels des paysans sont les mieux conservées alors que les zones de forêts sur sols fermes ont toutes été colonisées par l'agriculture ou remplacées par des jachères plus ou moins anciennes.

1 Introduction

L'exploitation des ressources naturelles sans ménagement particulier conduit parfois à des dégradations irréversibles de certains milieux. Il paraît donc indispensable de procéder à une

évaluation environnementale systématique de l'état actuel des ressources naturelles dites renouvelables afin d'assurer leur contrôle et de prévoir leur tendance.

La télédétection, qui permet une vision globale des phénomènes, est le moyen d'étude privilégié pour contribuer à assurer une meilleure gestion de l'environnement. C'est dans ce cadre qu'a été initiée cette étude sur l'environnement péri-lagunaire compte tenu des spécificités qu'il présente dans ses composantes biotiques, en particulier ses formations végétales climaciques composées de mangroves, de forêts marécageuses, de forêts denses sur sol à forte humidité édaphique et de forêts denses de sol ferme bien drainé.

Le milieu d'étude a été choisi en fonction des documents photographiques disponibles, soit entre les lagunes Adjin, Potou et Ono situées dans les zones d'influence de Bingerville et Grand-Bassam.

Des photographies aériennes des missions AOF 1955-56 et CIV 046-400 de 1973 et l'image Landsat TM de 1987 de Grand-Bassam ont fourni les données de comparaison pour étudier l'évolution des différentes composantes du milieu.

2 Documents de référence

Les documents suivants ont été utilisés :

- carte de l'Institut géographique de Côte d'Ivoire (IGCI) au 1:200 000, feuille de Grand-Bassam, 2^e édition, juin 1965;
- photographies aériennes : mission OAF 1955-56 NB-30-IX-X, noir et blanc, 1:50 000; mission CIV 046-400, noir et blanc, 1:10 000;
- image Landsat TM : tirage Geopic du quart de l'image Grand-Bassam (embouchure Comoé) TM 3, 4 et 7, cadre 195 56, quadrant 3, 31/12/87; données numériques des canaux 4, 5 et 7 sur bande magnétique.

3 Présentation du milieu d'étude

Le milieu d'étude, choisi dans le sud-est de la Côte-d'Ivoire, est circonscrit plus précisément entre la lagune Potou et le fleuve Comoé jusqu'à leur confluent au sud, la lagune Ono à l'est, la rivière Mé à l'ouest et l'axe routier Alépé-Ahoutoué au nord (fig. 1).

Il fait partie d'un ensemble de bas-plateaux s'étageant de 40 à 50 m d'altitude et correspondant à des sédiments tertiaires argilo-sableux à sable fin ou argileux issus d'alluvions récentes recouvrant le socle. Dans l'ensemble, ce relief plat s'accompagne d'un mauvais drainage qui détermine les sols hydromorphes (Avenard, 1971).

Ce milieu appartient au secteur ombrophile du domaine guinéen soumis à un régime pluviométrique équatorial de transition caractérisé par des précipitations annuelles comprises entre 1 400 et 2 500 mm. Quatre principales formations végétales climaciques se partagent ce milieu :

- les forêts marécageuses à *Symphonia globulifera* (Guittifères) et *Mitragyna ciliata* (Rubiacées);
- la forêt dense sempervirente à *Diospyros spp.* (Ebenacées) et *Mapania spp.* (Cypéracées) sur sol à forte capacité de rétention en eau; cette forêt renferme les espèces les plus hygrophiles du secteur ombrophile;
- la mangrove sur sol hydromorphe à gley le long de la lagune Potou;
- la forêt dense sempervirente de sol ferme.

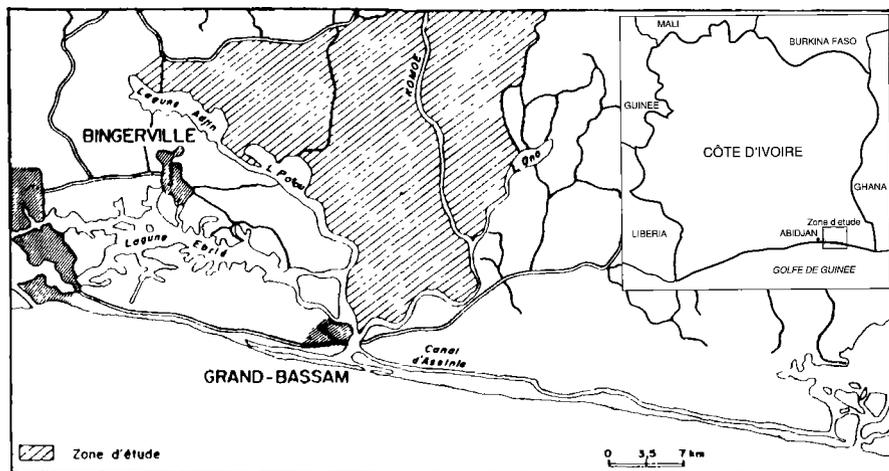


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et de l'image Landsat TM 195-56 Q3

4 Méthode

La réalisation de cette étude s'est opérée selon la démarche suivante.

4.1 Création d'un fond de carte

À partir de la carte IGCI au 1:200 000, il a été rédigé un fond planimétrique au 1:50 000 contenant le réseau hydrographique, les routes et l'habitat. Cette échelle a été choisie pour permettre le report direct des thèmes identifiés sur les photographies aériennes qui sont au 1:50 000.

4.2 Analyse des photographies aériennes

Les photographies aériennes ont été analysées sous stéréoscope à miroir pour délimiter, sur un calque d'interprétation, des plages ayant une même apparence physiologique suivant les différentes nuances de gris.

Après le montage d'une mosaïque sommaire, les unités délimitées ont été reportées sur le fond planimétrique au 1:50 000 par ajustement local.

4.3 Analyse visuelle de la composition colorée de l'image Landsat TM

L'analyse de la composition colorée des canaux 3, 4 et 7 du tirage Geopic et de la visualisation à l'écran de la composition colorée des canaux 4, 5 et 7 (fig. coul. 18-2) a d'abord consisté à extraire les thèmes carto-topographiques (réseau hydrographique, routes, habitat, etc.) et à délimiter ensuite les thèmes ayant le même rendu coloré.

4.4 Vérité terrain

Cette étape a été rendue nécessaire pour valider la nomenclature de certains thèmes proposée après l'exploitation des photographies aériennes et de la composition colorée de l'image Landsat. Elle a en outre permis de réaliser une classification supervisée dans l'étape du traitement numérique.

4.5 Traitement numérique

La composition colorée en trichromie classique (rouge, vert et bleu) des canaux TM3, TM4 et TM7 ayant déjà permis d'interpréter tous les éléments du milieu, le traitement, dont le but est l'amélioration de la perception visuelle des informations, a été limité à une classification supervisée (fig. coul. 18-3) et à la visualisation de l'indice de végétation (fig. coul. 18-4).

Un apprentissage avec six classes dans deux fenêtres de 512 par 512 pixels renfermant toutes les informations a été généralisé à l'ensemble de la zone d'étude par classification barycentrique. Des couleurs ont été affectées aux classes principales et le résultat a été imprimé au 1:69 000 grâce à une imprimante Tektronix.

4.6 Évaluation de l'évolution

Les plages de texture et de structure homogènes délimitées sur les photographies aériennes de 1956 ont été comparées au rendu visuel des surfaces équivalentes sur l'image satellitaire de 1987.

5 Remarques sur les données photographiques et satellitaires

Les photographies aériennes de la mission AOF 1955-56 qui ont été utilisées comme point de départ (temps initial) de l'étude sont de qualité médiocre et à une échelle qui ne permet pas une bonne discrimination des tons de gris. Les limites des différents thèmes ne sont donc pas nettes et ne peuvent se prêter à un planimétrage précis.

Les photographies de la mission CIV 046-400 de 1973, qui sont de bonne qualité, ont simplement contribué à confirmer certaines structures mises en évidence sur les documents de référence (1956).

Les données satellitaires, qui peuvent subir différents traitements numériques fiables et faciles à réaliser, permettent de tracer les contours précis des thèmes.

C'est pourquoi les données chiffrées des superficies ne sont qu'approximatives pour l'état de 1956 alors qu'elles sont assez précises pour 1987.

6 Règle d'interprétation

Le tableau I présente la règle d'interprétation des photographies aériennes et de l'image satellitaire.

Tableau I. Règle d'interprétation des photographies aériennes et de l'image satellitaire

Unité d'occupation	Photographies aériennes noir et blanc 1:50 000	Composition colorée (TM 3-4-7) 1:100 000
Forêt marécageuse (mangrove)	gris moyen homogène, cimes basses et compactes	rouge grenat
Forêt dense sur sol à forte humidité édaphique (forêt hydrophile)	gris sombre différencié	brun verdâtre
Forêt dense de sol ferme	gris sombre différencié, cimes hétérogènes	rouge dense
Forêt dégradée	mosaïque de gris sombre et de gris clair	moucheté de jaune, orange et bleu
Jachères ou cultures pérennes ombragées	gris clair à gris moyen	mosaïque de taches bleu - orange, jaune
Culture herbacée ou recrû herbeux	gris clair	jaune
Habitat	gris très clair, structure quadrillée	blanc bleuté
Eau	gris sombre	noir

7 Résultats

7.1 Phase d'interprétation

7.1.1 Apport des photographies aériennes

L'analyse des photographies aériennes a permis de proposer la nomenclature suivante (fig. 5) :

a) Végétation

- forêt marécageuse : elle apparaît sous forme de plages gris-moyen homogène; sous stéréoscope, les cimes sont assez compactes et basses par rapport aux formations de sol ferme;

- forêt dense de sol ferme : elle apparaît sous forme de plages gris-sombre différenciées; les cimes apparentes sont très hétérogènes;

- forêt dégradée : elle se présente sous forme d'une mosaïque de gris-sombre avec des cimes différenciées et de gris-clair sans cimes apparentes;

- mosaïque jachère-culture : elle apparaît sous forme d'une mosaïque de gris-moyen sans structure apparente et de gris-clair le long des voies de communication et autour des villages (la notion de jachère a été étendue à toute végétation spontanée non forestière).

b) Autres thèmes

- habitat : il est représenté par de petites plages gris-clair à blanc avec une structure quadrillée;

- eau : la réponse de l'eau varie du gris-sombre au blanc suivant son éclairage par le soleil;

- voies de communication : elles correspondent à des traits gris-clair à blanc reliant les structures quadrillées (habitat).

c) Analyse globale

Le report des différents thèmes sur le fond de carte met en évidence cinq secteurs homogènes (fig. coul. 18-2, 18-3 et 18-4) :

- le secteur de N'guechié à l'ouest du milieu d'étude;
- le secteur de Bono sur la rive droite du fleuve Comoé, au nord de N'gokro;
- le secteur du lac Kessiemie au centre-nord du milieu d'étude;
- le secteur de Atouanou entre la lagune Potou et le village de Atouanou;
- le secteur péri-lagunaire de Potou.

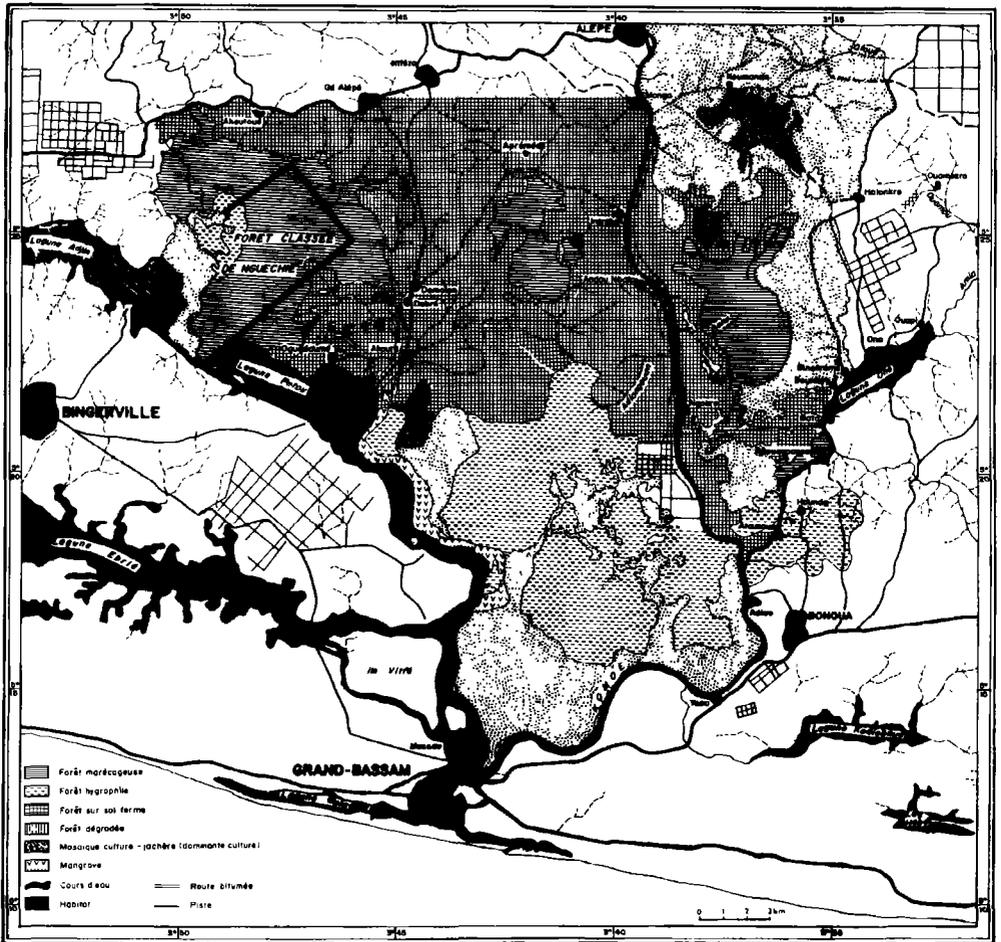


Figure 5. Cartographie du milieu péri-lagunaire de Bingerville-Bassam-Ono en 1956 par interprétation de photographies aériennes

7.1.2 Apport des données satellitaires : composition colorée TM 3-4-7, TM 4-5-7 et traitement numérique

L'interprétation de la composition colorée classique du tirage Geopic a permis de proposer la nomenclature suivante (fig. 6):

a) Végétation

- forêt marécageuse;
- forêt dense sur sol à forte humidité édaphique (forêt dense hygrophile);
- forêt dégradée et cacaoyères très ombragées sur sol à forte humidité édaphique;
- cultures et recrûs herbeux;
- mosaïques jachères-cultures et forêts dégradées sur sol ferme.

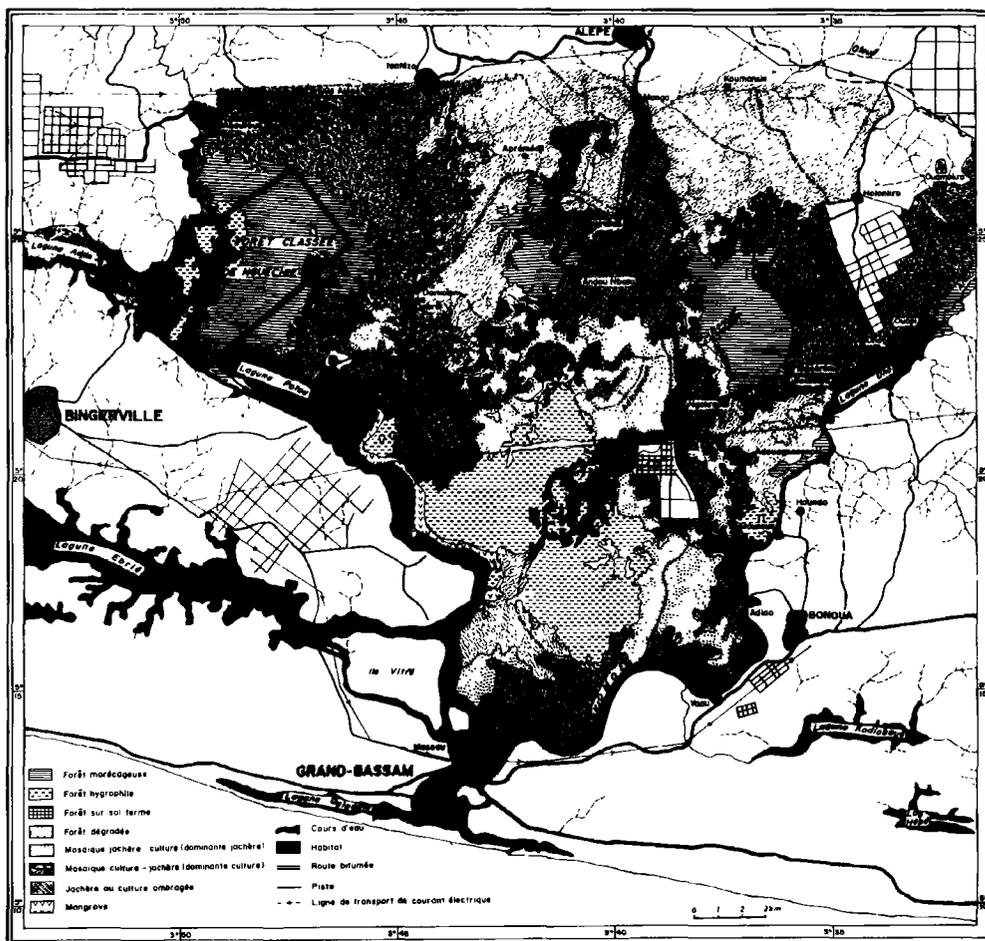


Figure 6. Cartographie du milieu péri-lagunaire de Bingerville-Bassam-Ono en 1987 par télédétection

b) Autres thèmes

- habitat;
- eau;
- voies de communication;
- lignes de transport de courant électrique.

La nomenclature définitive a été proposée après la classification supervisée.

Selon les couleurs attribuées aux classes principales, les thèmes suivants ont été retenus :

- forêt marécageuse;
- forêt dense sur sol à forte humidité édaphique (forêt dense hygrophile);
- cultures, recrûs herbeux;
- habitat, sol nu;
- eau;
- forêt dégradée, jachère, cacaoyère ombragée;
- mosaïque jachères-cultures;
- mosaïque cultures-jachères.

c) Analyse globale

Le report du calque d'interprétation des différentes unités confirme le découpage en cinq secteurs du milieu d'étude (fig. coul. 18-4).

7.2 Analyse du milieu naturel

7.2.1 Secteur de N'guechié

Il est essentiellement occupé par une forêt marécageuse à *Symphonia globulifera* Linn. (Guittifères) et *Mitragyna ciliata* Aubrév. et Pellegr. (Rubiacées) (Guillaumet et Adjanohoun, 1971) dont une partie de 2 800 ha est protégée par arrêté 319/SEF 28-1-45 portant classement de la forêt de N'guechié.

L'analyse détaillée des différents documents photographiques et satellitaires permet de distinguer trois nuances dans ce massif :

- forêt marécageuse sur sol organique à hydromorphie de surface permanente;
- forêt marécageuse sur sol à hydromorphie de surface temporaire;
- forêt de sol ferme à hydromorphie de profondeur.

La forêt marécageuse sur sol à hydromorphie permanente occupe toute la partie centrale du massif. Elle est bordée, sur le flanc ouest le long de la rivière Mé, de forêt dense de sol ferme et à l'est d'une forêt sur sol dont l'hydromorphie décroît du nord au sud si bien que vers Ogouedoume et Akoure, elle est pratiquement remplacée par une forêt de sol ferme.

En 1956, tout le massif était homogène à l'exception de quelques clairières intra-forestières vers le sud-est. L'ensemble du massif couvrait environ 5 360 ha.

En 1987, l'occupation humaine qui s'est opérée dans les parties les moins hydromorphes a entraîné une régression de 1 380 ha soit 27,5%.

La partie protégée couvrait, en 1956, 2 800 ha dont 2 510 ha de forêt marécageuse. En 1987, la forêt marécageuse a régressé de 320 ha soit 12,7% en 31 ans. Dans ce massif, il existe deux principales contraintes à l'occupation :

- existence d'une zone classée;
- hydromorphie de surface incompatible avec les systèmes d'exploitation traditionnelle.

7.2.2 Secteur du lac Kessiemié

C'est un petit secteur réduit à une forêt marécageuse qui couvrait 1 120 ha en 1956.

En 1987, la configuration globale du massif a été conservée mais un front d'attaque périphérique à partir de quelques clairières a entraîné une régression de 280 ha, soit 25% en 31 ans. L'occupation humaine s'est faite en priorité dans la partie nord moins hydromorphe.

7.2.3 Secteur de Bono

Ce secteur délimité sur la rive est du fleuve Comoé est occupé par un massif se composant d'une forêt marécageuse et d'une forêt de sol ferme.

En 1956, la forêt marécageuse était intacte alors que quelques clairières existaient déjà à l'intérieur de la forêt de sol ferme.

En 1987, la forêt marécageuse apparaît légèrement mitée à partir de l'ouest alors que toute la forêt dense de sol ferme est remplacée par une jachère ou des reliques de forêt dégradée.

Sur l'ensemble du massif qui couvrait 6 250 ha en 1956 dont 1 870 ha de forêt marécageuse et 4 330 ha de forêt de sol ferme, il ne restait plus en 1987 que 1 650 ha de forêt marécageuse, soit une régression de 11,7% alors que la forêt de sol ferme a totalement disparu.

7.2.4 Secteur de Atouanou

Ce secteur se compose de deux grands massifs forestiers séparés par une jachère dans le sens SO-NE.

Ces deux massifs établis sur sol argilo-sableux à forte capacité de rétention en eau correspondent à la forêt dense sempervirente à *Diospyros spp.* (Ebenacées) et *Mapania spp.* (Cyperacées) (Guillaumet et Adjanooun, 1971).

En 1956, ces deux blocs de forêt couvraient environ 7 220 ha. La superficie a régressé de 2 540 ha en 1987, soit une régression de 35% en 31 ans.

7.2.5 Secteur ripicole péri-lagunaire de Potou

Il est occupé par une mangrove ripicole, le long de la lagune Potou, et par une végétation d'arrière mangrove qui s'étend sur une largeur de 350 m. Il couvre environ 510 ha et sa superficie n'a pratiquement pas varié depuis 1956.

7.3 Évolution des unités carto-topographiques

7.3.1 Voies de communication

Depuis 1956, il y a eu une amélioration du réseau routier avec la création de nouvelles voies mises en évidence sur l'image satellitaire de 1987 :

- Bassam-Alepé : 42 km de route secondaire;
- N'gokro-Adouagossopié : 8 km de piste;
- N'gokro-Botoukro : 8 km de piste;
- Atounoua-Akouré : 19 km de piste;
- Atounoua-Dabré : 19 km de piste;
- piste forestière : 19 km entre Atounoua et la lagune Potou.

7.3.2 Lignes de transport de courant électrique

En 1956, il n'existait qu'une seule ligne traversant le nord de la zone d'étude suivant l'axe Alepé-Ahoutoué.

En 1987, une ligne de transport «haute tension» traversant la moitié sud de la zone d'étude est mise en évidence sur le tirage Geopic. D'autres lignes de moindre importance relient les principaux villages.

7.3.3 Habitat

Aux sites des habitats repérés sur les photographies de 1956 s'ajoute celui de Nougoussi.

8 Discussion

La méthode que nous avons adoptée pour cette étude découle de principes déjà expérimentés au cours de plusieurs projets concernant l'étude des forêts naturelles protégées à partir des données satellitaires Landsat et SPOT dans les régions forestières du centre-ouest et savaniques du nord. Cette méthode très simple dont les différentes étapes ont été succinctement décrites au cours de l'étude s'est avérée très fiable pour caractériser et déterminer les types forestiers et les cultures présents dans la zone d'étude.

En effet, on constate que les moyens nécessaires pour tirer les informations de l'imagerie satellitaire sont simples.

Ainsi, les traitements numériques appliqués pour obtenir ces résultats sont peu complexes et sont effectués sur des systèmes composés de micro-ordinateurs.

L'utilisation des photographies aériennes dans cette étude nous a permis de déterminer l'importance des formations forestières existantes dans cette zone en 1956 et 1973. Les surfaces de ces formations calculées à partir de l'interprétation des photographies aériennes constituent l'état de référence de l'évolution de la végétation dans cette zone péri-lagunaire.

Les limites de cette interprétation sont principalement dues à la qualité médiocre des photographies aériennes de 1956. En ce qui concerne l'image satellitaire Landsat TM de 1987, l'interprétation visuelle de la composition colorée standard TM 4, TM 7, TM 3 de l'image Geopic est apparue insuffisante pour discriminer de façon nette les unités d'occupation dans cette zone fortement transformée.

Par contre, la composition colorée réalisée à partir des canaux TM 4, TM 5 et TM 7 après seuillage et amélioration de la dynamique permet de mieux distinguer ces unités.

Ainsi, les parcelles d'apprentissage qui ont été tracées sur l'image améliorée et validées par plusieurs observations sur le terrain sont à la base des traitements numériques qui ont conduit à la réalisation d'une classification supervisée avec une assez bonne précision cartographique ou pourcentage de pixels bien classés (90%).

L'expérience conduite dans cette région montre que si l'imagerie satellitaire Landsat TM peut être utilisée à une résolution spatiale adaptée pour révéler l'évolution d'ensemble et noter les types de dégradation des formations végétales, les limites sont que de nombreuses observations de terrain sont nécessaires pour interpréter correctement la grande richesse des informations contenues dans celle-ci.

En outre, une meilleure définition spatiale de l'image satellitaire facilitera encore plus la tâche de l'interprète forestier.

Enfin, on retiendra que l'intérêt de cette étude réside dans le fait que les informations tirées des images satellitaires permettent de suivre l'évolution et la dynamique de la végétation soumise à des pressions diverses au cours de plusieurs années.

9 Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence des secteurs homogènes et de visualiser les modifications qu'ils ont subies depuis 1956.

Le mode d'occupation de ces secteurs a permis de distinguer dans l'ensemble du milieu :

- des zones très sensibles établies sur sols fermes exondés;

- des zones moins agressées correspondant aux formations marécageuses dans lesquelles l'occupation humaine est encore très faible.

La principale contrainte à l'occupation totale de ce milieu semble être la forte hydromorphie des sols mais aussi la densité de l'habitat qui reste assez faible.

Cette étude fournit surtout l'état actuel des principales composantes du milieu et devrait permettre d'éclairer les prises de décision relatives à la gestion de cet environnement.

10 Références

AVENARD, J. M., 1971. Aspect de la géomorphologie. —in J. M. Avenard. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, Paris, p. 11-67.

GUILLEMET, J. L. et E. ADJANOHOUN, 1971. La végétation. —in J. M. Avenard. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, Paris, p. 161-263.

19

Un exemple de suivi diachronique de milieux soudano-sahéliens au Burkina Faso par télédétection

JEAN-MARIE OUADBA

Institut de recherche en biologie et écologie tropicale, Centre national de la recherche scientifique et technologique, B. P. 7047, Ouagadougou, Burkina Faso

Résumé

Il est présenté ici, dans le contexte général du Burkina Faso, un exemple d'approche méthodologique pour le suivi diachronique de milieux soudano-sahéliens. La méthode consiste à travailler à différentes échelles sur des images Landsat MSS et des photographies aériennes panchromatiques judicieusement choisies.

L'interprétation visuelle des images ayant subi un traitement en équidensités colorées donne de meilleures informations sur l'état de l'occupation des sols à l'échelle régionale.

L'interprétation des photographies aériennes, notamment par la méthode de «délimitation par élimination convergente», permet de mieux caractériser cet état au niveau local ou terroir.

Les études au sol permettent, enfin, d'affiner l'analyse du suivi diachronique.

1 Introduction : contexte burkinabè vis-à-vis du thème des journées scientifiques

Le patrimoine foncier et sylvicole du Burkina Faso, à l'instar des autres pays sahéliens, subit depuis plusieurs décennies une dégradation sévère et continue.

Si l'importance des facteurs naturels (aléas climatiques en particulier) dans la dégradation des milieux est indéniable, ce sont les facteurs humains qui restent déterminants dans le processus de la désertification au Burkina Faso (CILSS/Club du Sahel, 1985).

Aussi a-t-on mis en place une stratégie globale de lutte contre les effets de la sécheresse et contre la désertification basée sur la concertation inter-sectorielle et la conduite de programmes nationaux appropriés.

Dans la conduite d'une telle démarche, l'utilisation des données de la télédétection peut, à certains égards, être d'un grand secours en raison de leur finesse, de leur répétitivité et de leur caractère synoptique.

C'est ainsi qu'au Burkina Faso les outils de télédétection prennent de plus en plus une place importante dans les activités de certains services de recherche et de développement.

Actuellement, il est techniquement possible d'assurer une surveillance continue de l'état de l'environnement burkinabè par la mise en oeuvre de procédé de télédétection devant permettre :

- une meilleure connaissance de la dynamique de l'occupation des terres par l'agriculture et la forêt;
- une appréciation de la vitesse, du sens et de l'intensité des impacts humains sur les milieux.

Ceci afin d'identifier et de suivre les zones en proie à la désertification, ou en voie de l'être.

Les résultats attendus seraient une meilleure connaissance du milieu et surtout la mise en oeuvre de nouveaux programmes d'actions concertées en vue de préserver et même de réhabiliter les écosystèmes sensibles, menacés ou dégradés.

Le travail présenté ici peut être considéré comme l'illustration d'une des possibilités qu'offre la télédétection (au sens large) à un service étatique comme le nôtre, disposant de moyens modestes. Il est basé sur une approche méthodologique relativement efficace et peu coûteuse de cartographie diachronique de l'occupation des sols en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso (Ouadba, 1983).

2 Matériel et méthode

L'objectif premier était de donner une vue synoptique des grandes classes d'occupation du sol à l'échelle régionale. Ensuite, il fallait analyser localement les vicissitudes de cette occupation.

Pour ce faire, la méthode à mettre en oeuvre ainsi que le choix du matériel doivent autoriser une analyse diachronique fiable du phénomène de l'occupation humaine et de dégradation du couvert végétal. Elle a été appliquée à la région de Ouagadougou, zone qui connaît de graves indices de désertification.

2.1 Matériel utilisé

Deux types de documents de base ont été utilisés.

Les premiers sont des images Landsat MSS au 1:1 000 000 (cadre 209-52), canaux 5 et 7 du 25/10/72 et du 8/11/78.

La période choisie est jugée favorable par Tricart (1976) et Hagen (1982) pour l'utilisation des enregistrements multispectraux en Afrique de l'Ouest, car il y a à ce moment une fréquence élevée des situations engendrant une bonne transmission atmosphérique et éliminant l'effet des feux.

Les images Landsat MSS sont présentées sous forme de positifs transparents qui vont subir un traitement en équidensités colorées.

L'analyse des documents finaux reposera sur l'élaboration de clés d'interprétation à partir d'une bonne connaissance des conditions écologiques régnant lors des prises de vue. Elle s'aidera, en outre, d'une étude à plus grande échelle de quelques zones-tests.

Les deuxièmes documents utilisés sont des photographies aériennes panchromatiques au 1:50 000 de 1950/56 et 1979, couvrant des sites choisis pour leur intérêt dans l'illustration des situations particulières de l'occupation du sol (occupation séculaire des terres, colonisation agricole récente et active, désertification). Ces photos sont examinées sous stéréoscope à miroir.

2.2 Méthode de travail

La méthode consiste à travailler à différentes échelles à partir des documents précédents et de la démarche suivante :

- interprétation visuelle des images Landsat MSS ayant subi un traitement photochimique en équidensités colorées, ceci afin d'extraire des informations sur l'organisation et l'état de l'occupation des terres à l'échelle régionale;
- interprétation de photographies aériennes, notamment par la méthode de «délimitation par élimination convergente», permettant de mieux caractériser les modalités d'occupation des terroirs villageois et d'estimer l'évolution de la strate arborée;
- étude au sol, à l'échelle stationnelle, afin d'analyser l'état et les tendances de la désertification dans la région étudiée et d'extrapoler les résultats dégagés sur d'autres régions similaires.

La richesse des informations recueillies à chaque étape et leur intégration dans un cadre analytique cohérent permet l'orientation des actions nationales de lutte contre la désertification et les effets de la sécheresse.

2.2.1 La technique des équidensités colorées comme méthode d'analyse

Le principe du procédé et le mode opératoire ont été décrits par Nony et Cazabat (1971) et Rey *et al.* (1973).

L'équidensitométrie colorée supplée la limitation physiologique de l'oeil humain, densitomètre médiocre dans l'analyse des gammes de gris des documents ou images demi-teintes. La transformation de ceux-ci en équidensités, en sériant les tonalités de gris par regroupement ou fusion des nuances les plus proches, permet d'accroître la «lisibilité» de phénomènes peu perceptibles comme les phénomènes évolutifs.

Il convient cependant d'être prudent dans l'analyse car une même valeur de gris ne correspond pas forcément à un même objet, et inversement des objets identiques peuvent être traduits par des nuances différentes.

C'est pourquoi l'on estime que le procédé n'est valable sur des zones restreintes et topographiquement sans relief. Par conséquent, son utilisation pour le traitement d'images satellitaires ne sera efficace que par un contrôle rigoureux des documents obtenus au moyen de documents thématiques et de vérité-terrain, contrôle permettant l'établissement des codes de correspondances analogiques révélés par chacun des niveaux de gris.

2.2.2 Méthode d'interprétation des documents en équidensités colorées

Les bases de l'interprétation sont liées à la nature et au type d'enregistrement, ainsi qu'à l'exploitation de la notion de signature spectrale des objets à laquelle se greffent celles de réflectance, de tonalité ou de combinaison de couleurs.

Chaque objet au sol a une signature différente d'une bande à l'autre. La «lecture» des images va donc consister en la recherche et l'interprétation de ces signatures élémentaires, en se référant à la documentation disponible. Elle s'appuiera essentiellement sur l'examen de la réalité végétale : par sa présence, ses variations, et souvent même son absence, la végétation est toujours significative directement ou indirectement dans des recherches relatives à diverses disciplines (Rey, 1974).

La démarche adoptée comprend trois étapes.

Premièrement, réalisation d'une esquisse d'interprétation primaire au moyen de l'image du canal 5 (détection des sols nus ou peu couverts), puis de l'image du canal 7 (affinage des contours des plages boisées). Il est important de travailler avec les documents originaux car ils contiennent toujours le plus d'information. Les canaux 5 et 7 (région du rouge et du proche infrarouge) sont choisis car la plupart des travaux ont montré leur efficacité pour une meilleure discrimination du couvert végétal par rapport aux deux autres composantes essentielles du paysage (sol, eau) (Kouda, 1981).

Deuxièmement, le document issu de la précédente étape est confronté à d'autres pour mieux préciser l'interprétation : compositions colorées diazochromiques, tirages spéciaux noir et blanc, documents thématiques divers, photographies aériennes, vérité-terrain. On obtient ainsi une esquisse d'interprétation définitive.

Troisièmement, ce dernier document est confronté à celui en équidensités colorées pour un essai d'analyse demeurant tout de même délicate. On obtient enfin une esquisse d'interprétation finale mieux élaborée que la précédente.

Ainsi, l'interprétation des documents initiaux doit guider celle des documents en équidensités colorées, ceux-ci n'apportant que des informations complémentaires, précieuses quant au comportement de certains phénomènes particuliers qui autrement échapperaient à l'analyse visuelle classique.

2.2.3 La photo-interprétation comme méthode complémentaire d'analyse

La photo-interprétation a été appliquée à des zones-tests de contrôle grâce à deux méthodes complémentaires :

- Une méthode dite de «délimitation par élimination convergente» telle qu'appliquée par Stigliano (1978) sur une zone soudano-sahélienne du Niger : elle autorise une approche synthétique de l'interprétation de phénomènes globaux tels que l'organisation anthropique de l'espace et son évolution dans le temps.

- Une méthode classique d'interprétation des photographies aériennes telle que préconisée par divers auteurs dont Rey (1967) et Guy (1966) : celle-ci, en intégrant à la fois les critères photogrammétriques et environnementaux avec les connaissances acquises par le photo-interprète, permet une analyse bien plus fine.

En outre, l'examen des photos sous fort grossissement (X 8) permet une estimation assez correcte de la réalité de l'évolution du couvert arboré.

3 Résultats et discussion

Les résultats obtenus à partir de la démarche adoptée et des méthodes utilisées ont été publiés dans le détail (Ouadba, 1983). Quelques-uns sont brièvement rappelés ici pour illustrer quelques étapes caractéristiques de la méthode.

3.1 Les images en équidensités colorées

Pour l'imagerie Landsat, les figures 1 et 2 représentent l'essai d'interprétation des images du 25/10/72 et du 8/11/78 traitées en équidensités colorées. Le tableau I en donne les éléments d'interprétation.

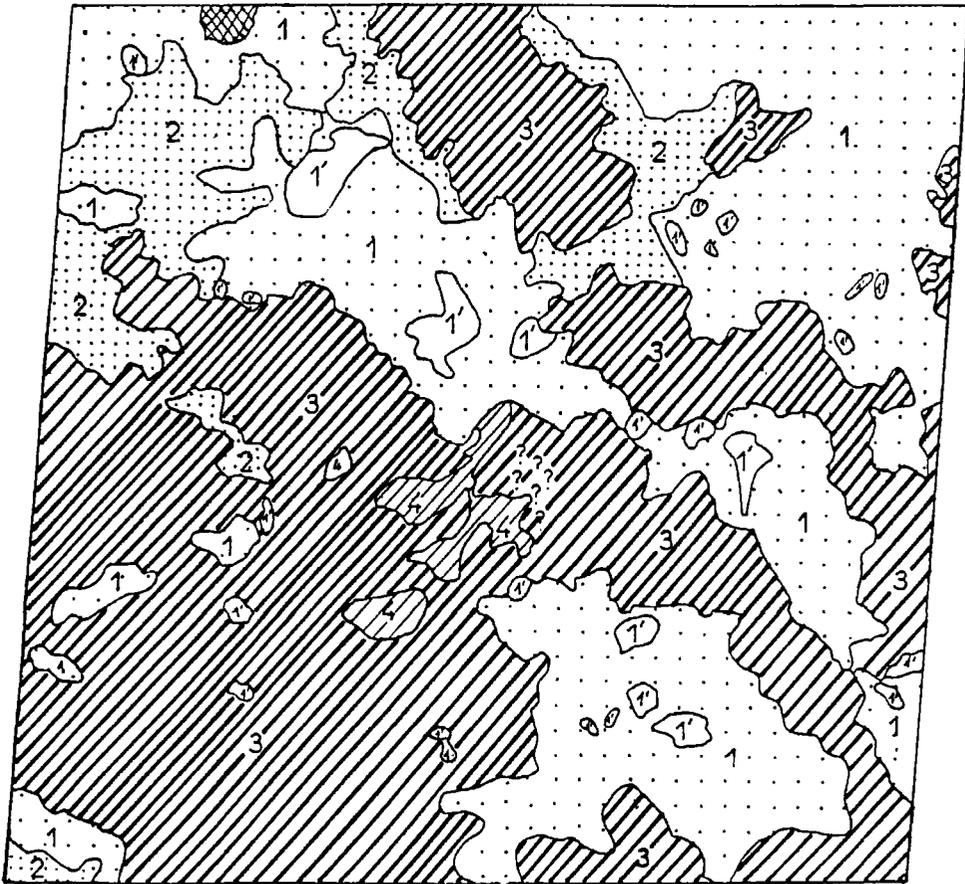


Figure 1. Essai d'interprétation synchrone des équidensités colorées (C5 + C7), image 209-52 du 25 octobre 1972 (légende au tableau I)

La synthèse diachronique permet de tirer les remarques suivantes quant à l'évolution qualitative des éléments du paysage entre 1972 et 1978.

Il y a une réduction notable du couvert arboré, en particulier dans le nord (régions de Ouagadougou, Zorgho et Koupèla) et le nord-ouest (région de Dassouri-Kokologo). Cette tendance, qui semble se cantonner dans les régions habitées, est consécutive à la régression de la classe 1 (cultures dominantes) au profit de la classe 1' (cultures + sols nus dominants). Elle résulterait de l'action conjuguée des facteurs climatiques et de la charge biotique.

On note également une régression générale des formations forestières, particulièrement dans le centre (régions de Saponé, Kombissiri, Manga et Nobéré) et à l'ouest (région de Nakantenga et du fleuve Nankabé ou Volta Blanche) du cadre. Cette tendance est à attribuer

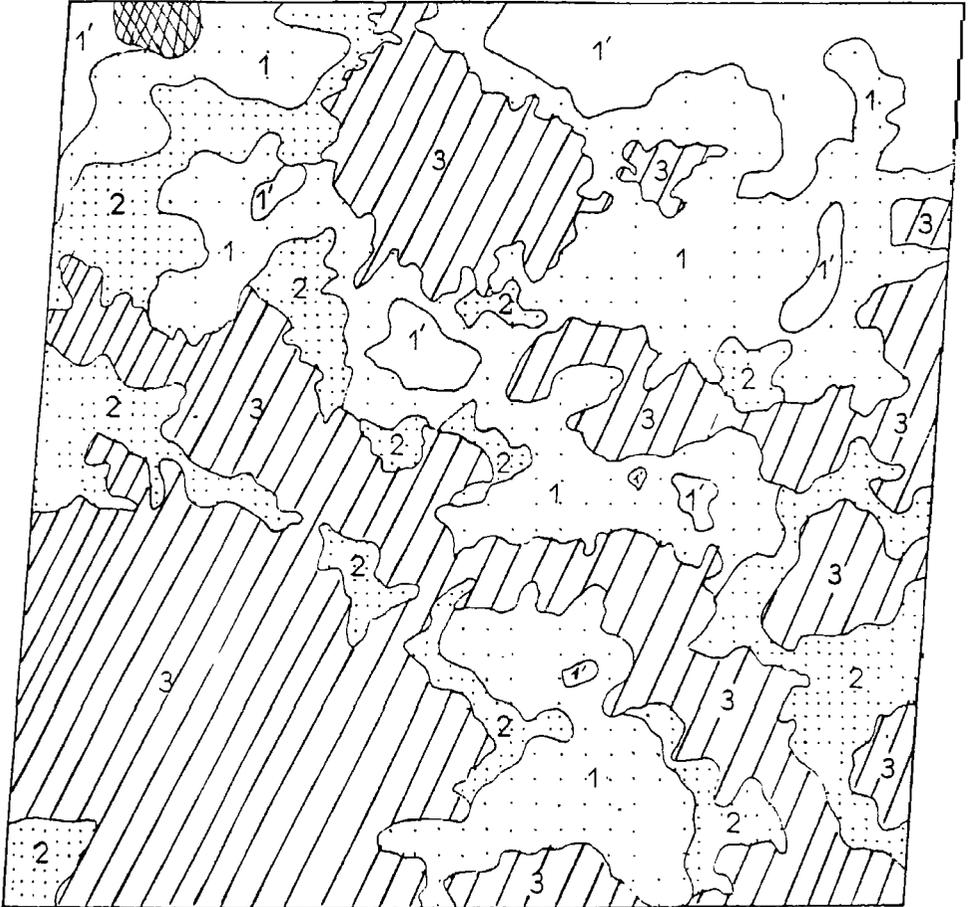


Figure 2. Essai d'interprétation synchronique des équidensités colorées (C5 + C7), image 209-52 du 8 novembre 1978 (légende au tableau I)

surtout à l'importante colonisation agricole qui a suivi la première sécheresse des années 1970-1972.

La méthode des équidensités colorées présente ainsi des avantages certains sur l'analyse visuelle classique des images brutes. En effet, le traitement photochimique (ou mieux, numérique) de ces images brutes permet de se bâtir un système de classification relativement contrôlé pour améliorer cette analyse visuelle. Cette amélioration est traduite ici par la finesse de la légende d'interprétation et en particulier dans l'estimation des recouvrements du sol par la végétation et de la mise en évidence d'une dynamique des feux de brousse.

Il y a lieu de souligner que, dans la méthode de télédétection utilisée, le nombre et l'étendue des plages de tonalité ou équiplages retenues sont fonction à la fois des niveaux d'énergie recueillie sur les images et du niveau de précision des manipulations photochimiques. La première caractéristique est liée aux conditions écologiques régnant lors des prises de vues : phénologie, état atmosphérique (brume sèche en particulier), feux de brousse. Le second facteur dépend des appréciations de l'opérateur et de son habilité à organiser les gammes de gris et leur traduction colorée, car son raisonnement et ses déductions sont très importants dans l'analyse des produits finaux.

Tableau I. Interprétation synchronique des équidensités colorées

Image du 28/10/72		Éléments du paysage	Image du 8/11/78	
Interprétation et observation	Teintes (C5 + C7)		Teintes (C5 + C7)	Interprétation et observation
- Le même motif se répète ailleurs - Repérage à l'aide de documents thématiques	Cyan tacheté de magenta, de jaune et de vert	Urbanisation (Ouagadougou)	Cyan tacheté de magenta, de jaune et de vert	- Le même motif se répète ailleurs - Les plans d'eau bordant la ville au nord sont bien soulignés
Recouvrement moyen à élevé	Magenta hétérogène	Zone à cultures dominantes (1)	Cyan	Recouvrement arboré faible à moyen
Recouvrement moyen	Cyan			
Recouvrement assez faible	Vert (jaune + cyan)	Zone à cultures et à sols nus (1')	Jaune	Recouvrement arboré très faible à nul
Recouvrement faible à nul	Jaune			
Savanes arborées ou arbustives à recouvrement divers	Pourpre ou magenta dégradé	Zone à jachères dominantes (2)	Magenta hétérogène	Recouvrement global élevé
Végétation naturelle (forêt sèche) peu ou pas dégradée	Magenta homogène	Zone à formations forestières diverses Magenta (3) Cyan (4)	Magenta	Zone peu dégradée; végétation naturelle de savanes boisées ou de forêts sèches denses
En zone peu ou pas occupée (savanes herbeuses ou arbustives claires) Interprétation délicate	Cyan			
—	—	Feux anciens sur 3	Vert	Les zones brûlées sont peu étendues à cette date
—	—	Feux récents sur 3	Rouge	La périodicité des feux peut être étudiée par équidensités

3.2 La photo-interprétation des zones-tests

L'analyse diachronique par photo-interprétation a été réalisée sur des sites choisis selon les caractéristiques de l'environnement (occupation du sol, colonisation agricole, désertification).

La zone-test de Naryarlé, située en bordure immédiate de la forêt classée du Nankabé (1958), a été soumise à une colonisation agricole très active depuis la persistance de la sécheresse. L'interprétation diachronique 1958-1979 fait apparaître une destruction quasi complète de la végétation naturelle (-73%) au profit des espaces agricoles. La figure 3 indique les proportions de cette évolution.

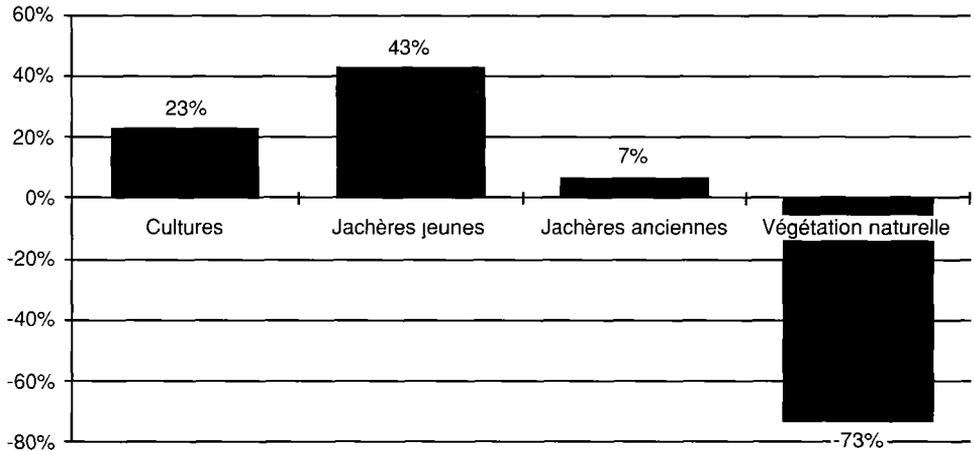


Figure 3. Utilisation du sol à Naryarlé 1958-1979

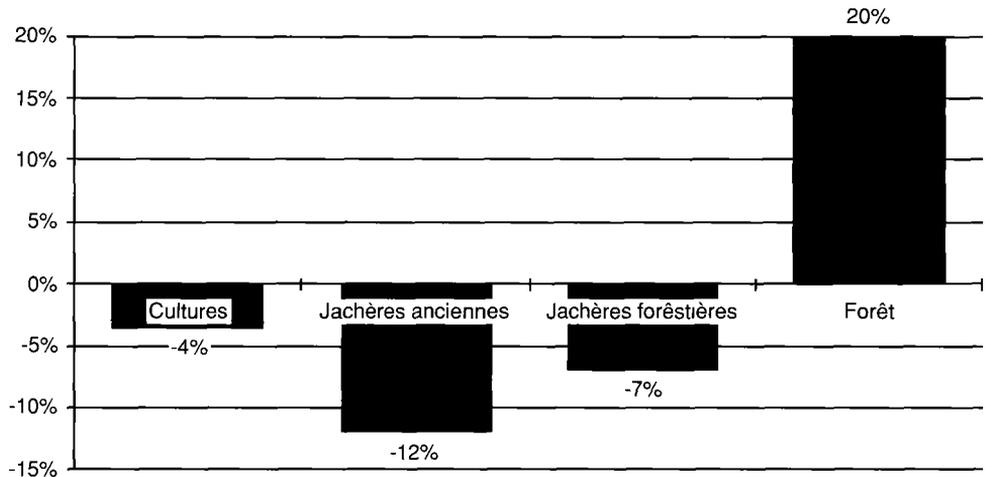


Figure 4. Utilisation du sol à Bazèga 1950-1979

Sur la zone-test de Saponé, située à 30 kilomètres au sud de Ouagadougou, l'analyse des surfaces occupées en 1950 et 1970 fait apparaître une relative stabilité dans l'affectation des terres. Ceci en raison sans doute de l'occupation séculaire de l'espace par une communauté rurale qui n'a ni beaucoup varié en population, ni changé ses modes de gestion traditionnelle de son terroir.

Le site de Bazèga, situé en lisière du parc national de Pô, est caractérisé par une diminution générale de l'emprise agricole (analyse 1950-1979). Cette déprise agricole, déjà perceptible en 1950, semble trouver ses origines dans la proximité des foyers onchocercariens qui ont longtemps contenu l'extension de l'espace agricole, et aussi dans la mise en valeur hydro-agricole de la vallée du Bazèga qui a eu pour effet de drainer les bras valides vers les secteurs du salariat agricole et la reconversion professionnelle.

La figure 4 traduit l'évolution de l'occupation des terres entre 1950 et 1979 et souligne la forte progression des formations naturelles boisées sur l'espace agricole.

La photo-interprétation se révèle donc un moyen complémentaire pour affiner l'analyse des images Landsat à de plus grandes échelles. Ici, elle a permis de mieux comprendre les vicissitudes locales de l'occupation du sol dans la région.

4 Conclusion

Les enregistrements de télédétection sont de remarquables outils de synthèse et de quantification offrant de nombreuses possibilités d'analyse à tous les spécialistes s'intéressant à l'espace géographique.

Les applications ici évoquées montrent que l'intégration des ressources de la photographie aérienne et de la télédétection spatiale constitue une voie efficace dans l'acquisition de données fiables sur la biosphère.

Des moyens annexes d'analyse comme la technique des équidensités colorées et la mise en oeuvre de méthodes d'interprétation appropriées permettent de progresser dans cette acquisition rendue aujourd'hui plus absolue par le développement des méthodes de traitements numériques.

Ceci est particulièrement important pour les pays en développement des zones semi-arides, comme le nôtre, dont l'effort au développement mériterait d'être soutenu par des voies originales d'acquisition de données aptes à éclairer tant soit peu les politiques nationales.

Pour le Burkina, pays particulièrement touché par la désertification, l'une des tâches les plus urgentes à envisager serait le suivi écologique de l'environnement naturel et humain, afin de promouvoir un développement en meilleure harmonie avec les équilibres naturels.

5 Références

- CILSS/CLUB DU SAHEL, 1985. Proposition de plan national de lutte contre la désertification. — Ministère de la planification et Ministère de l'agriculture et de l'élevage, Ouagadougou.
- GUY, M., 1966. Quelques principes et quelques expériences sur la méthodologie de la photo-interprétation. — Symposium international de photo-interprétation, Paris.
- HAGEN, R. T., 1982. Remote sensing applications to forestry in West Africa. — Sahel resource inventory and mapping coordination workshop, 20-24 mai, Bamako.

- KOUDA, M., 1981. Analyse synchronique et diachronique de l'évolution de la végétation en zone semi-aride (Haute-Volta) par télédétection multispectrale. —Thèse de troisième cycle, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 143 p.
- NONY, T. P. et C. CAZABAT, 1971. Les équidensités colorées. Applications à la photo-interprétation. —Bulletin de la Société française de photogrammétrie, n° 43.
- OUADBA, J.-M., 1983. Essai d'analyse diachronique de l'occupation du sol en Haute-Volta par photo-interprétation et télédétection. —Thèse de troisième cycle, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 262 p.
- REY, P., 1967. La place de la photographie aérienne dans les méthodes d'étude du milieu vivant. — Actes du deuxième Symposium international de photo-interprétation, Paris.
- REY, P., 1974. Expérience ARNICA/ERST-1. Résultats et perspectives. —European Space Research Organisation, Proceeding of a Symposium, Italie.
- REY, P., C. ARLES, et R. DELORME, 1973. Équidensités colorées et télédétection des ressources naturelles. —DGRST, Comité Équilibre et lutte biologique, Groupe de travail méthodologique, Paris.
- STIGLIANO, M., 1978. Méthodologie d'une approche synthétique de l'organisation de l'espace : l'occupation du sol en zone sahélo-soudanienne. —Photo-interprétation, n° 78-4, fasc. 4.
- TRICART, J., 1976. Quelques aspects de l'utilisation des images multispectrales du satellite Landsat-1 dans l'étude écologique de pays tropicaux (Mali, Colombie, Vénézuéla). —Travaux et documents de géographie tropicale, n° 25, Télédétection et environnement, CNRST/CEGET, Bordeaux.

20

Téledétection et identification des cultures dans le périmètre irrigué «Sistema Rio Bocono» (les *llanos* occidentaux, Venezuela)

JÉSUS PÉREZ*, VINCENT VALLÉS** et M^{me} DUCROT-GAMBART***

**Institut de géographie, Université Toulouse Le Mirail, 5, allées Antonio-Machado, 31058 Toulouse cedex, France*

***Laboratoire de pédologie et aménagement, École nationale supérieure agronomique de Toulouse, 145, avenue de Muret, 31076 Toulouse cedex, France*

****Centre d'études spatiales des rayonnements, 9, avenue du Colonel-Roche, 31400 Toulouse, France*

Résumé

Le périmètre irrigué «Sistema Bocono» concerne environ 3 000 ha dans les *llanos* occidentaux du Venezuela au sud-ouest de la capitale (Caracas).

Il s'agit d'une région agricole par excellence qui est soumise à un climat tropical contrasté avec alternance d'une période sèche et d'une période de pluies.

À partir des données satellitaires du mois de mars 1987, en pleine saison sèche, on réalise une classification des principales cultures du cycle «Verano 1986-1987». Les approches visuelle et numérique à partir des données SPOT ont été complémentaires dans l'étude des milieux naturels sur environ 900 km². Ainsi, une interprétation thématique à l'échelle du 1:30 000 a été réalisée, et une classification numérique basée sur les réponses spectrales a permis une bonne identification des stades phénologiques du coton et du riz dans le périmètre irrigué à la mi-mars 1987.

Les données SPOT, utilisées sans traitement numérique compliqué et avec un matériel peu coûteux, s'avèrent être un outil d'appui à la lutte contre la sécheresse dans les *llanos* du Venezuela.

1 Introduction

La région des *llanos* au Venezuela est soumise à un climat tropical contrasté. Les précipitations y sont abondantes mais mal réparties. En effet, une période sèche se prolonge de novembre à avril, ce qui crée de sérieux problèmes pour l'agriculture et seule l'irrigation permet de s'affranchir en partie de ces problèmes durant la sécheresse.

Or, la gestion de l'eau dans les périmètres irrigués nécessite une appréciation précise de l'extension de chaque culture et du suivi de leur stage phénologique, notamment pour le coton dont la consommation en eau varie selon le stade de développement. En effet, dans cette contrée, les cultures pratiquées ont des besoins en eau très divers : le riz est un grand consommateur d'eau alors que les terres récemment labourées ne requièrent aucune irrigation.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à un périmètre irrigué, «el sistema de riego rio Bocono», d'une superficie d'environ 3 000 ha. Lors d'un travail précédent (Pérez, 1985), l'utilisation de données Landsat MSS obtenues sur cette zone a permis de cerner les frontières des zones agricoles, leur évolution, l'importance des feux saisonniers et des déboisements. En revanche, il a été impossible d'arriver à séparer les thèmes précis tels que les cultures, que ce soit par l'analyse numérique ou analogique. L'identification des cultures et donc la détermination du besoin en eau des différentes zones du périmètre n'a pu être envisagée.

Les données fournies par le satellite SPOT ont des caractéristiques différentes de celles de Landsat MSS. La résolution est plus fine; elle est de 20 m dans les canaux multispectraux et atteint 10 m en mode panchromatique, ce qui offre de nouvelles possibilités.

Dans ce travail, nous nous proposons de déterminer la répartition des cultures et leur stade phénologique à partir des données SPOT dans ce périmètre soumis à des sécheresses périodiques.

2 Matériel et méthode

2.1 Les données

Nous utilisons à la fois des données satellitaires et des données recueillies sur le terrain.

2.1.1 Les données de terrain

Les services du ministère vénézuélien de l'agriculture ont effectué un travail important de recensement des cultures tout au long de la campagne agricole 1986-1987. Ils ont établi un plan d'occupation au 1:30 000 où l'on peut situer avec précision toutes les parcelles cultivées, soit 2 817 ha. Ce document a été complété par la collecte d'informations concernant la nature et le développement des cultures durant la saison sèche, soit de novembre 1986 à avril 1987.

2.1.2 Les données satellitaires

Pour des considérations diverses (entre autres densité de nuages), nous avons retenu les données SPOT du 17 mars 1987 c'est-à-dire durant la période sèche. Le périmètre se trouve à cheval sur les images 653-332 et 653-333 (70° 00' O - 8° 47' N).

Nous avons utilisé les données suivantes :

- composition colorée sur papier (canal 3 en rouge, canal 2 en vert et canal 1 en bleu) du quart sud-ouest de l'image SPOT 653-332, niveau 1B, XS au 1:50 000;

- une sous-image numérique de 512 par 512 pixels pour les 3 canaux, couvrant une aire de 10 km par 10 km; elle est extraite de la même image et centrée sur le périmètre; ce support de travail contient environ 74 parcelles soit la moitié des données de terrain.

La prise de vue correspond donc, à quelques jours près, à la date de la collecte d'information sur le terrain, ce qui assure une bonne cohérence temporelle entre les deux jeux de données.

En plus des données satellitaires et des données de terrain, nous avons à notre disposition des photos aériennes au 1:25 000 de mai 1978, des diapositives couleur des paysages et une carte de la végétation au 1:100 000 de 1982.

2.2 Méthode

Le traitement des données SPOT a été réalisé suivant un schéma classique : approche visuelle, approche numérique.

2.2.1 Interprétation visuelle

Cette analyse visuelle s'est faite sur une partie de la composition colorée du quart de l'image SPOT au 1:50 000 (environ 50 km²) dans le but de produire une carte thématique des milieux naturels en utilisant des techniques de la photo-interprétation.

Le choix des classes a été facilité par la connaissance du terrain et par les divers documents d'appui tels que les photos aériennes et la cartographie thématique. Ainsi, nous avons élaboré une clef d'interprétation correspondant à la zone d'étude (tableau I).

2.2.2 Classification numérique

Les données ont été traitées par le logiciel de traitement d'images «DIDACTIM» sur micro-ordinateur compatible PC/AT équipé d'une carte «Number Nine».

Le but du traitement est d'obtenir une classification des milieux naturels de cette zone à partir de 17 classes représentatives du paysage sur environ 100 km² (tableau II).

Des parcelles d'entraînement ont été choisies d'après la réalité terrain (minimum de 5 échantillons par classe). Outre les canaux spectraux SPOT XS1, XS2 et XS3, certains canaux dérivés ont été ajoutés afin de mieux séparer les classes : canal IV (indice de végétation) = $(XS3 - XS2)/(XS3 + XS2)$; canal IB (indice de brillance) = $((XS3)^2 + (XS2)^2)^{1/2}$ et trois canaux texturaux obtenus à partir d'un laplacien calculé sur les canaux XS1, XS2 et XS3 mesurant un type d'homogénéité des classes. Ces canaux permettent l'apport des éléments supplémentaires afin de discriminer des classes confondues spectralement.

Les améliorations apportées par l'indice de végétation et l'indice de brillance ont été constatées par une augmentation de la décorrélation entre les canaux lorsque l'on observe les moyennes et les étendues des écarts types à l'aide des histogrammes bidimensionnels pour les classes définies au départ. Enfin, les trois canaux texturaux ont permis une meilleure observation des limites du parcellaire étudié.

Une première analyse des nuages de points bidimensionnels et des caractéristiques statistiques dans les canaux XS2 et XS3 a permis la vérification des échantillons : opération indispensable pour la correction d'éventuelles erreurs commises dans la recherche des échantillons qui doivent être représentatifs de chaque classe. Certains échantillons ont été

Tableau I. Clef d'interprétation de la composition colorée de la zone d'étude, thème : utilisation de l'espace

Unité	Sous-unité	Critères d'identification	Observation
Cultures irriguées	Pérennes ou à la fin du cycle végétatif	Dans le périmètre, taches rouges ou roses, de forme rectangulaire parfois carrée, sèche, structure quadrillée	Bananiers, fruitiers, ou variétés tardives des cultures de saison
	Récoltée	Dans le périmètre, taches grises allant du clair au foncé, forme rectangulaire, carrée, structure quadrillée	Cultures de la saison sèche ayant été récoltées
	Début ou milieu du cycle végétatif	Dans le périmètre, taches allant du gris très foncé au noir avec de petites taches rouges au milieu du noir dominant, forme rectangulaire et carrée, structure quadrillée	Il s'agit des différents stades du riz irrigué; les pixels humides donnent le noir et le riz émergent donne le rouge
Cultures non irriguées	Cultures de "secano"	Zone de couleurs hétérogènes, taches de forme polygonale juxtaposées, limites floues	Zone occupée par les cultures de pluies; les nombreuses taches jaunes témoignent d'une forte activité de labour pendant le mois de mars avant les premières pluies d'avril
	Vegas	Zone hétérogène, couleurs variées du rouge au gris foncé, située toujours au bord d'une rivière	Agriculture de subsistance (conuco) sur des surfaces petites parfois sous un bois; la proximité de la rivière permet des cultures en saison sèche
Pâturages	Traditionnel	Zone hétérogène, gris étendu avec de nombreuses taches noires, limites floues	Savanes herbeuses brûlées en saison sèche et qui sont utilisées comme pâturage traditionnel
	Modernisé	Zone hétérogène formée de polygones de grande taille, couleurs claires, limites nettes	Savanes herbeuses, défrichements utilisés comme pâturage dans l'élevage extensif de bovins
Défrichements		Zones claires, hétérogènes, situées à côté des zones boisées et des cultures	Défrichage visant à augmenter les surfaces des pâturages
Reboisements		Zone homogène, marron foncé, forme polygonale, limites nettes	Plantation de pins caraïbes
Forêts		Zone homogène, rouge et brun, limites nettes, structure moutonnée	Forêts tropophiles avec des espèces caducifoliées et sempervirentes
Milieu à intérêt agricole limité (Chaparral)		Zone hétérogène, brun et gris foncé présentant des taches roses et rouges allongées, limites floues	Associations végétales (fourré de ligneux) sur des collines et sols peu fertiles brûlées en saison sèche; les taches rouge-rose correspondent aux espèces sempervirentes installées dans les petites vallées

Tableau II. Liste des classes retenues

N° de classe	Nom de classe	Signification sur le terrain
1	Bois	Végétation sempervirente et décidue
2	Pat 1	Savane - pâturage non labouré
3	Pat 2	Savane - pâturage labouré
4	Ve-se	Fourré de ligneux - espèces pyrotolérante décidues
5	Feux	Végétation brûlée en saison sèche
6	Eau	Rivière en étiage
7	Plage - Sable	Banc de sable de la rivière
8	Autoroute	Chantier en construction
9	Village-bâti	Habitats et constructions dispersés
10	Ombre-Nuage	Ombres portées des nuages
11	Coton-soca	Coton après récolte
12	Coton-vert	Coton tardif
13	Coton-mota	Coton près à récolter
14	Riz-SE	Parcelles labourées humides et semées
15	Riz-E	Riz émergent par taches
16	Riz-Ta	Riz d'environ 50 cm
17	Labour	Parcelles labourées pour le cycle «secano»

éliminés et d'autres rajoutés à partir des classes d'échantillons supposés corrects. Cette vérification a été faite à l'aide des fonctions du logiciel permettant une visualisation à l'écran des nuages de points et des écarts types de chaque échantillon par classe. Un échantillon correspond à une classe donnée lorsque celui-ci a un écart type raisonnable par rapport aux caractéristiques générales de sa classe.

2.2.3 Les nuages de points et les histogrammes

Les nuages de points et des histogrammes bidimensionnels des classes dans les canaux XS1, XS2, XS3, IV et IB ont permis de déterminer le degré de confusion entre les classes et la corrélation entre les canaux. Les couples de canaux qui se sont avérés les plus intéressants pour la séparation des classes sont : XS1 et XS2, XS3 et IV, IV et IB (fig. 1).

De plus, l'observation des nuages bidimensionnels des canaux texturaux sur les classes a permis une approche du degré d'homogénéité de chaque classe. À l'issue de ce prétraitement, de l'analyse visuelle et de l'étude des statistiques, les 17 classes sont bien représentatives du paysage étudié. Cette représentativité vient principalement du fait que ces 17 classes furent choisies pertinemment en fonction d'une réalité terrain fiable; ce qui a permis de situer et de connaître la nature de chaque parcelle d'entraînement par classe sans commettre trop d'erreur dans le choix.

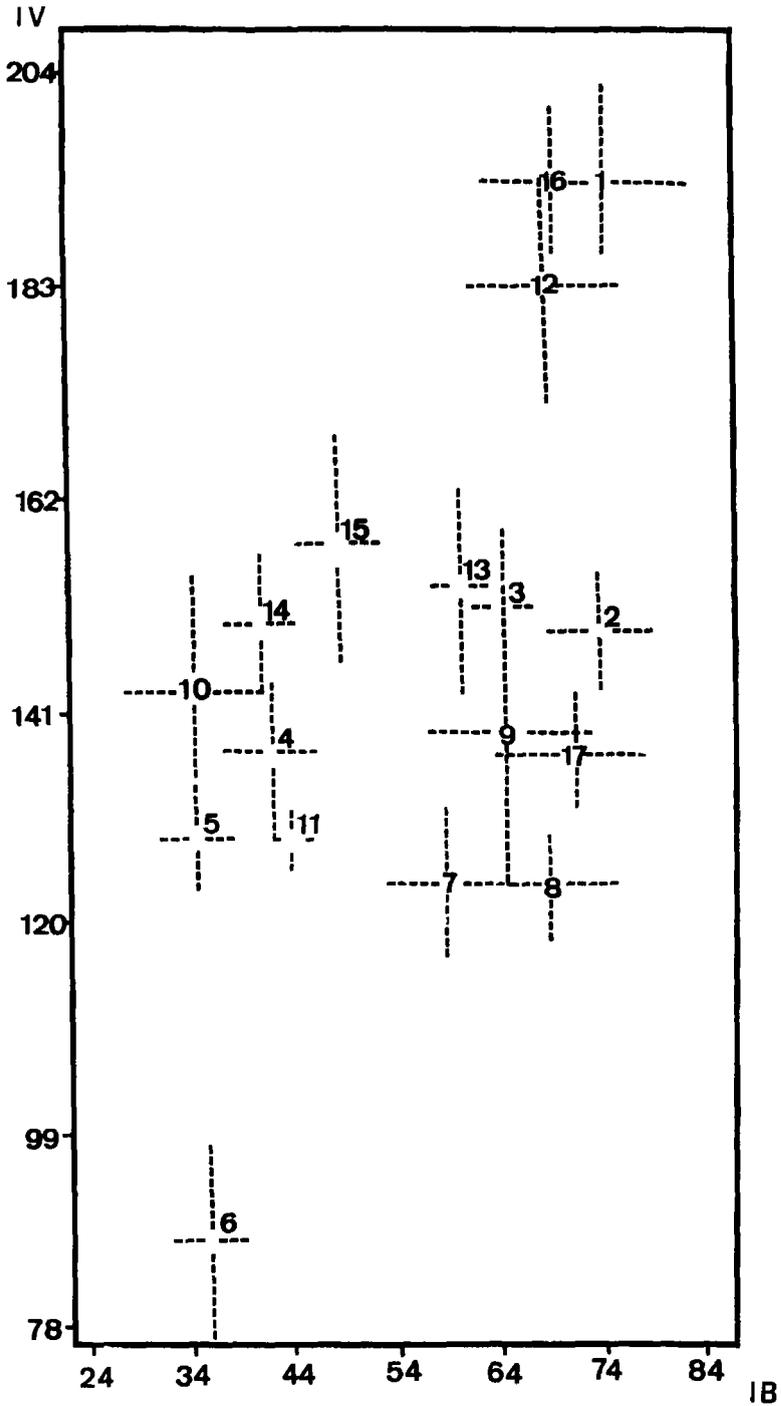


Figure 1. Moyennes et écarts types des classes sur l'histogramme bidimensionnel IV-IB

3 Résultats et discussion

Les matrices de confusion entre les classes, qui permettent de visualiser les méprises entre les classes, mettent en évidence les confusions majeures présentées au tableau III.

Tableau III. Confusions majeures rencontrées

Classes	Confusion
Végétation sèche (4)	Feux (5), coton-soca (11), riz-semaille (14), riz émergent (15)
Village-bâti (9)	Pâturage non-labouré (3), plage-sable (7), autoroute (8), labour (17)
Coton-vert (12)	Bois (1), coton-mota (13), riz-tallage (16)
Riz-tallage (16)	Bois (1), coton-vert (12)

On constate ainsi que les combinaisons XS1, XS2, XS3, IV et IB, et XS1, XS2 et XS3 offrent les meilleurs pourcentages de pixels bien classés. On estime qu'un pixel est bien classé lorsqu'il est affecté à sa classe d'appartenance. Dans les matrices de confusion entre les classes, cette information correspond à la diagonale formée par le croisement des pourcentages de pixels affectés à chaque classe. Un pixel est affecté à une classe quelconque en fonction de sa valeur radiométrique dans les combinaisons de canaux choisies pour calculer les matrices de confusion. Pour les classes pâturage labouré (2), pâturage non labouré (3), eau (6), plage-sable (7), coton-soca (11) et coton-mota (13), plus de 80% des pixels sont bien classés. De même, les classes bois (1), feux (5), autoroute (8), ombre-nuage (10), coton-vert (12), riz-semaille (14), riz-émergent (15) présentent un pourcentage de pixels bien classés compris entre 60% et 80%. Enfin, pour les classes végétation-sèche (4), villages-bâti (9), riz-tallage (16) et labour (17), le pourcentage est inférieur à 60%.

En ce qui concerne les classes d'intérêt pour le périmètre irrigué et les confusions majeures rencontrées pour ces classes (tableau IV), on peut dire :

- Le coton après récolte a le même comportement radiométrique que les éléments constitutifs de la classe «végétation-sèche» (4) à savoir : la végétation décidue. Les feuilles des cotonniers sans activité chlorophyllienne ont évidemment la même réponse spectrale que les feuilles sèches de la végétation décidue dominante de la classe 4.

- Les «pixels humides» des classes «riz-semaille» (14) et «riz-émergent» (15) se confondent avec les «pixels feux» de la classe 5 et les espèces végétales pyrotolérantes de la classe 4. La confusion entre les parcelles du périmètre réellement irriguées et la végétation brûlée par les feux saisonniers, qui sont fréquents à cette époque de l'année dans la région, montre la difficulté d'arriver à séparer les «pixels feux» et les «pixels humides» en utilisant seulement la réponse spectrale des objets. Cette confusion montre aussi que le degré d'hétérogénéité des classes «végétation sèche» et «feux» est très élevé. Les classes «riz-semaille» et «riz-émergent» ont servi à caractériser les parcelles irriguées du périmètre à la mi-mars.

- Le coton-tardif (12) et le riz de 50 cm de taille (16) présentent des réponses spectrales semblables à celles de la végétation de la classe «bois» (1). Certains «pixels chlorophylliens» du coton prêt à récolter (13) sont aussi mélangés dans la classe coton-vert (12) car à ce stade végétatif (coton-mota), s'il s'agit d'une première récolte, les cotonniers maintiennent des feuilles vertes. Cette confusion est tout à fait normale car il s'agit dans tous les cas des réponses spectrales caractéristiques des feuilles en activité chlorophyllienne.

- Les pourcentages de pixels bien classés pour le coton dans le périmètre irrigué montrent l'homogénéité des classes «coton-soca» et «coton-mota» qui correspondent bien à deux stades phénologiques différents des cotonniers. Ces pourcentages sont satisfaisants pour une classification spectrale. Les stades phénologiques du coton sont bien identifiés à l'exception du coton-tardif qui présente un pourcentage important de confusion avec les éléments végétaux des autres classes.

- Par contre, pour le riz, les résultats sont décevants car les pourcentages de pixels bien classés sont trop faibles, principalement pour la classe «riz-tallage» qui est confondue avec les classes «bois» et «coton-vert».

- On remarque que la classe villages-bâtis (9), qui représente l'habitat dispersé de la zone, se trouve mélangée dans la plupart des classes.

Des améliorations sont possibles en introduisant des indices de texture obtenus à partir des canaux texturaux car les classes présentent des degrés différents d'homogénéité.

Une classification de type barycentrique a été effectuée (fig. coul. 20-2) en utilisant les canaux XS1, XS2, XS3, IV et IB.

Tableau IV. Pourcentages de pixels bien classés pour le coton et le riz

Classes	Combinaisons	
	XS1, XS2 et XS3	XS1, XS2, XS3, IV et IB
Coton-soca	97%	98%
Coton-mota	89%	84%
Coton-vert	61%	60%
Riz-semaille	69%	67%
Riz-émergent	74%	70%
Riz-tallage	47%	34%

4 Conclusion

L'approche visuelle a permis une vision globale et synoptique des milieux naturels en question. Ainsi, on a pu mettre en relation les divers éléments techniques et naturels d'un paysage d'environ 900 km² (rivières, forêt, un barrage à l'amont, un périmètre irrigué à l'aval, les cultures et les zones d'élevage). Cependant, cette approche ne permet pas une identification des cultures. Cette analyse est complémentaire à une classification thématique numérique. Une interprétation thématique à l'échelle du 1:30 000 a été réalisée.

L'approche numérique à partir des réponses spectrales a permis une identification des stades phénologiques du coton. L'analyse des indices de texture en cours doit apporter des améliorations sensibles à la classification. La bonne connaissance des milieux étudiés a conduit à une information sur le terrain fiable et de qualité. Ceci a été le départ pour une bonne confrontation entre les données satellitaires et les méthodes d'interprétation. Il est important de noter que les résultats ont été obtenus à partir d'une station de traitement d'images composée d'un micro-ordinateur compatible PC-AT équipé d'une carte graphique «Number Nine», de données satellitaires (image de 512 par 512 pixels sur disquette) et d'une composition colorée sur papier photographique.

Les données SPOT utilisées sans traitement compliqué et coûteux peuvent permettre une identification convenable des stades phénologiques du coton dans la région à la mi-mars. La résolution des données SPOT permet une observation fine et détaillée des milieux naturels dans les *llanos*. Dans ce cas les données SPOT peuvent être considérées comme un outil d'appui à la lutte contre la sécheresse dans cette région.

5 Remerciements

Nous exprimons notre reconnaissance à la Fondation «Gran Mariscal de Ayacucho», au «Departamento de coordinacion y aprovechamiento del sistema de riego Rio-Bocono» (Area Guanare-Masparro, Sabaneta-Barinas), au Ministère de l'agriculture vénézuélien et spécialement à Ec Alirio Baloa, directeur général, à Ing. Pedro R. Gonzales, chef de département, à M. Lacombe, du Laboratoire d'informatique de l'École nationale supérieure agronomique de Toulouse et enfin à la Société AES-IMAGE pour son soutien matériel.

6 Bibliographie sommaire

- AES-IMAGE, 1989. Manuel d'utilisation de DIDACTIM, 200 p.
- BARIOU, R., D. LE CAMUS et F. LEHENAFF, 1985. Les indices de végétation. —Les dossiers de télédétection. n° 2, Presse universitaire de Rennes, 160 p.
- LAINE, G., J. KILLIAN, C. BELEM, M. BERGER et P. MORANT, 1988. L'analyse multitempore des données du satellite SPOT pour identifier les cultures dans deux terroirs de la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso. —ATP Télédétection. CIRAD-INERA, 1988-1989, 13 p.
- CERCLE DES ÉLÈVES DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE. 1987. Les techniques aérospatiales au service de l'agronomie. —Agro Paris-Grignon. Paris, 68 p.
- PÉREZ, J. A., 1982. Un exemple de programme de développement rural intégré. Le programme Guanare-Masparro dans les *llanos* vénézuéliens. —Mémoire de maîtrise. Université de Toulouse Le Mirail, 144 p.
- PÉREZ, J. A., 1985. Étude des milieux naturels des *llanos* occidentaux du Venezuela à l'aide des données Landsat 2. —Mémoire de DESS, Paris VI. CETEL 1984-1985, GDTA, Toulouse, 34 p.
- SAINT, G., 1987. Bilan des développements méthodologiques sur les inventaires agricoles utilisant SPOT et des enquêtes de terrain. —SPOT-1, utilisation des images, bilan, résultats. Paris, Cepadues, p. 245-250.

21

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

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

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

Résumé

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

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

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

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

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

1 Cadre géomorphologique et évolution de l'erg Akchar

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

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

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

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

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

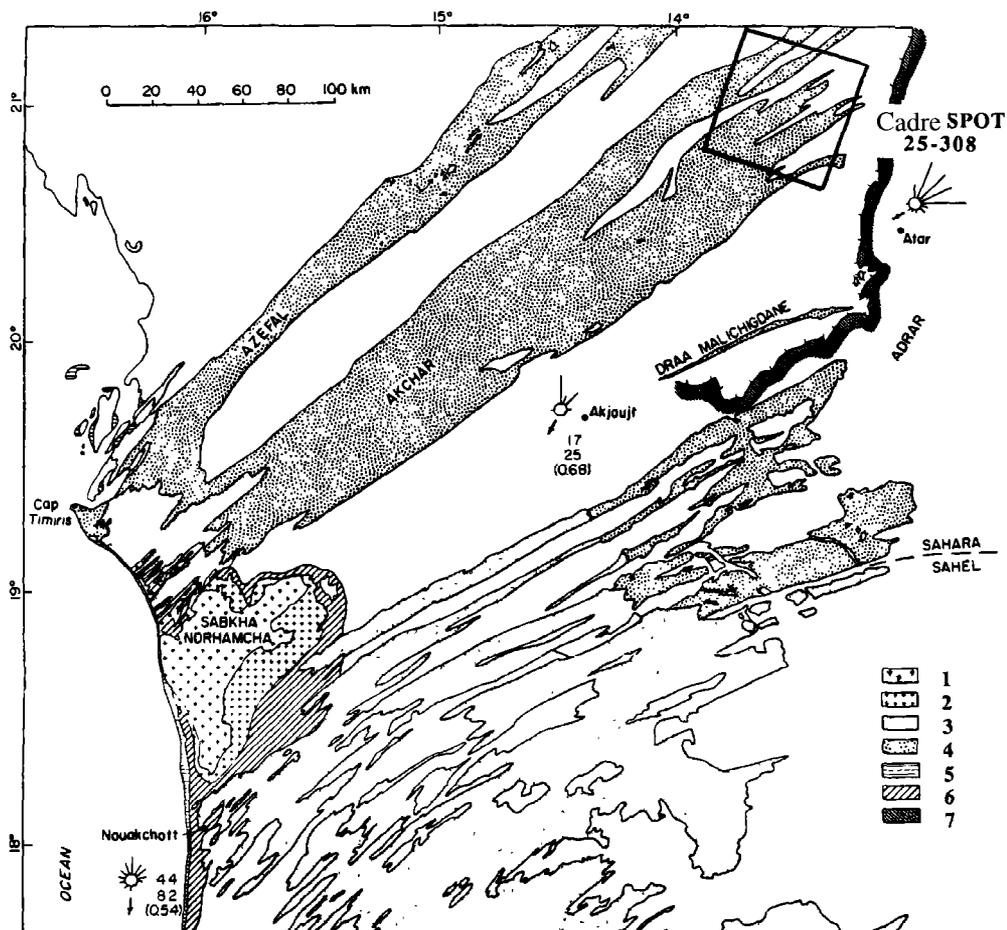


Figure 1. Carte de situation de l'erg Akchar (d'après Breed *et al.*, 1979); (1) sebkha active, (2) sebkha relictuelle, (3) dunes ogoliennes stabilisées, (4) dunes ogoliennes réactivées, (5) dunes côtières et littorales actives, (6) sédiments littoraux nouakchottiens, (7) escarpement

2 Analyse des images

2.1 Image du cadre SPOT 25-308

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

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

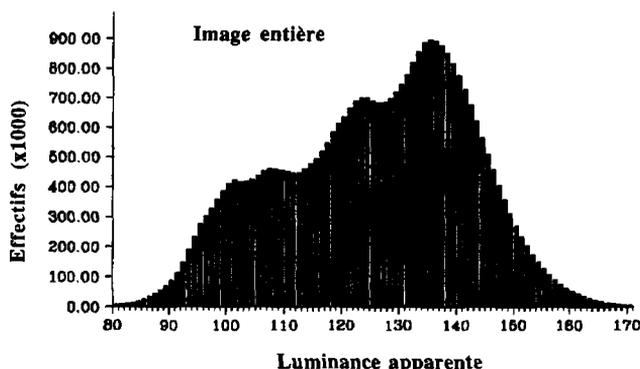


Figure 2. Histogramme des fréquences de l'image 25-308 du 11/01/88

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

2.2 Analyse de la zone 1

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

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

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

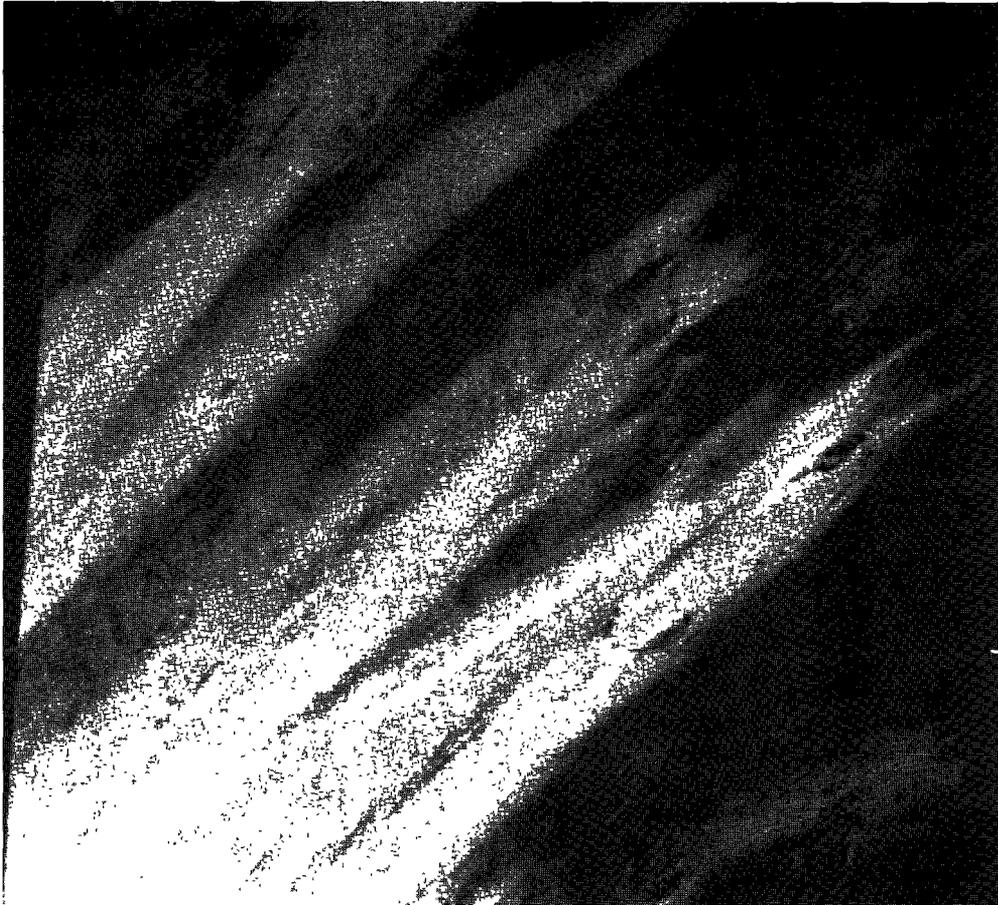


Figure 3. Terminaison nord-est de l'erg Akchar sur l'image 25-308 du 11/01/88

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

2.3 Analyse de la zone 2

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

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

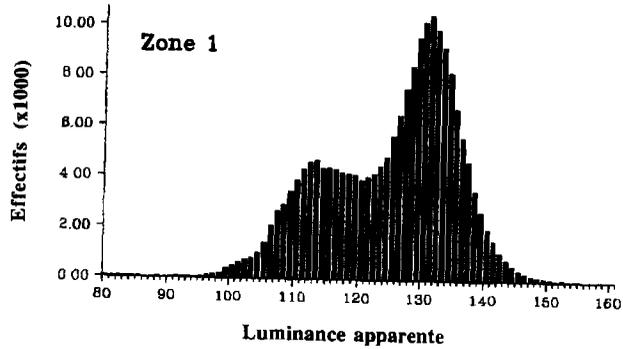


Figure 4. Histogramme des fréquences et image de la zone 1; (1) guelb en fer à cheval, (2) jupe de sable vif très allongée et zone d'ombre, (3) auréole alluviale peu marquée, (4) socle cristallin dans lequel des directions structurales sont visibles, (5) dalle calcaire lacustre discontinue, (6) regs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

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

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

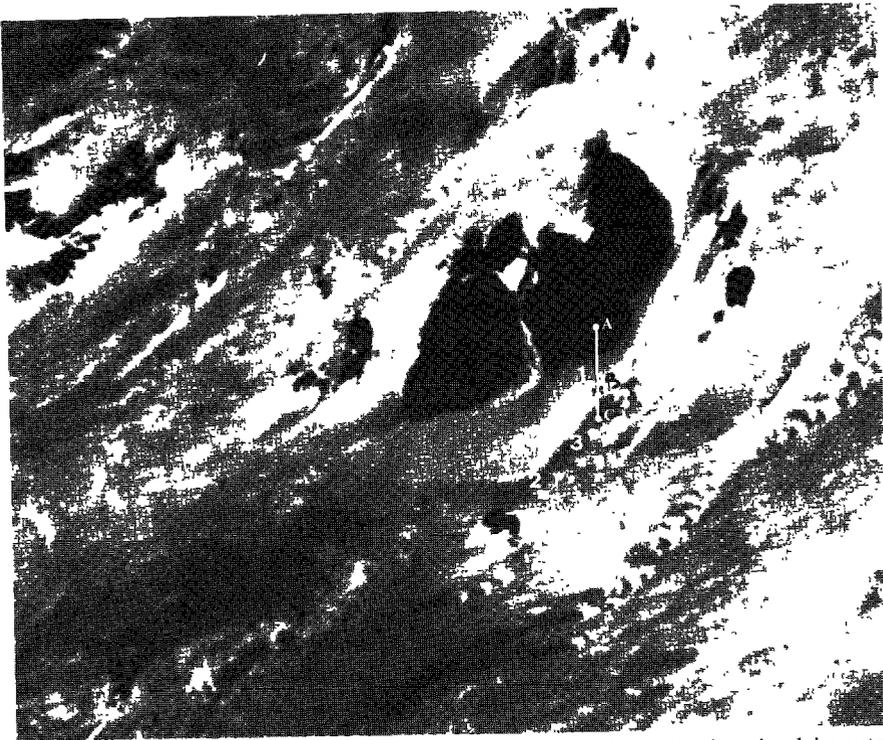
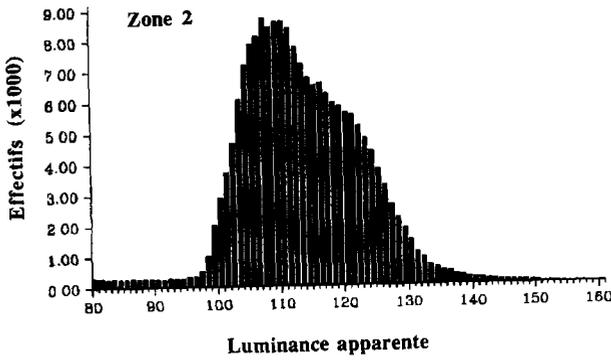


Figure 5. Histogramme des fréquences et image de la zone 2; (1) organisation circulaire autour du pied du guelb principal, (2) organisation auréolaire centrée sur un reg noir. (3) zone axiale sombre correspondant à une forte densité des grains à patine désertique, (4) éparpillement des grains et ensablement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

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

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

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

2.4 Analyse de la zone 3

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

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

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

3 Discussion des résultats

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

3.1 Caractérisation géométrique des unités thématiques

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

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

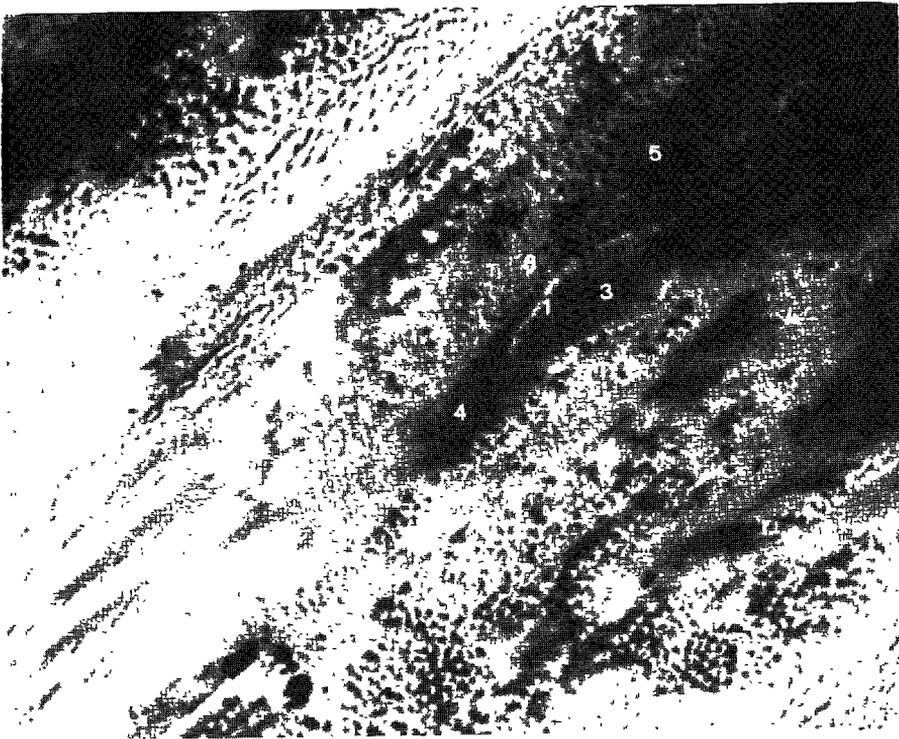
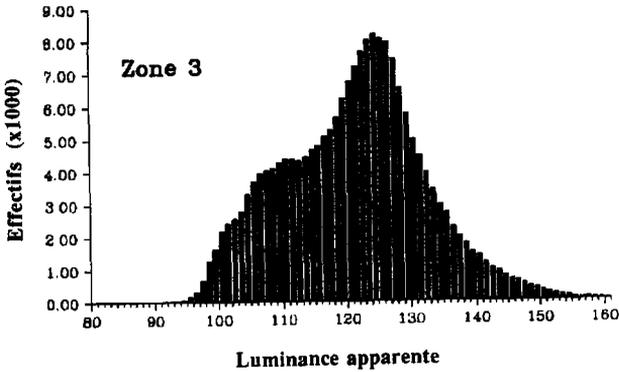


Figure 6. Histogramme des fréquences et image de la zone 3; (1) et (2) bordures calcaires, (3) sols argilo-sableux, (4) voiles sableux organisés en panaches, (5) début d'organisation en dunes transverses barkhanoides, (6) réticule complexe de barkhanes

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

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

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

3.2 Caractérisation spectrale des unités thématiques

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

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

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

3.2.1 Thèmes d'identification aisée

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

3.2.2 Thèmes d'identification délicate

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

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

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

3.2.3 Thèmes d'identification impossible

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

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

4 Conclusion

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

Les enseignements principaux sont les suivants.

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

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

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

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

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

5 Références

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

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

22

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

YVES PRÉVOST

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

Résumé

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

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

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

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

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

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

1 Introduction

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

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

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

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

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

2 L'estimation de la production végétale

2.1 Que peut-on mesurer?

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

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

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

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

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

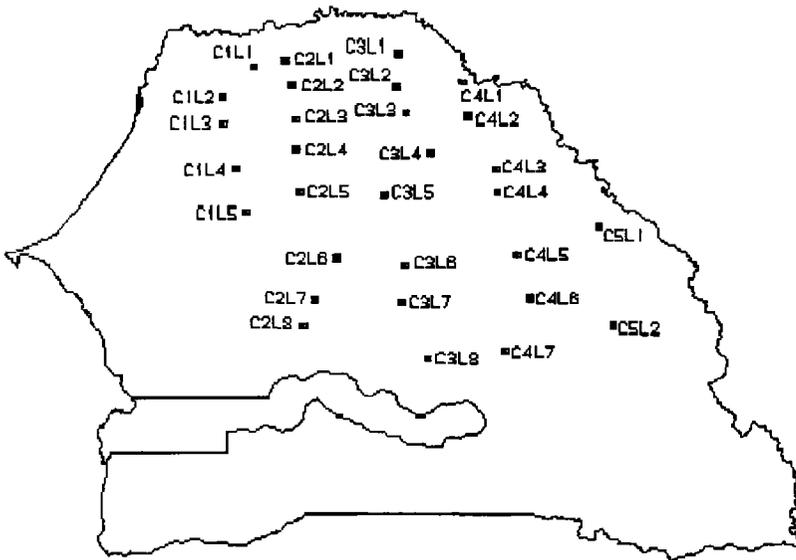


Figure 1. Carte du Sénégal avec l'emplacement des sites de contrôle au sol

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

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

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

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

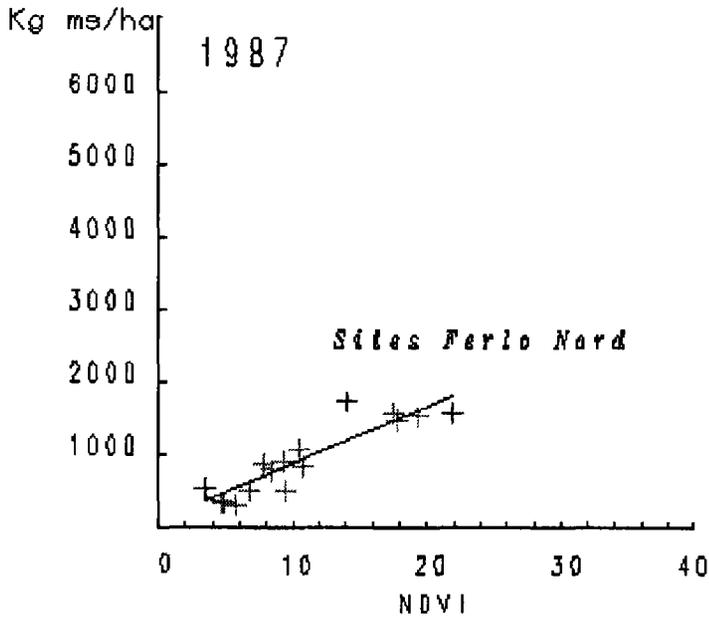


Figure 2a. Droites de régression entre l'indice de végétation cumulé sur 11 décades et la biomasse sur pied aux sites de contrôle au sol en 1987

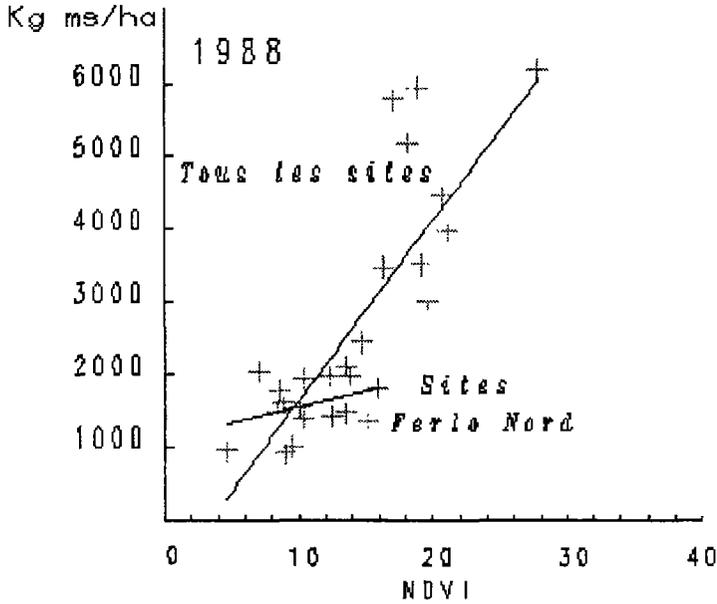


Figure 2b. Droites de régression entre l'indice de végétation cumulé sur 11 décades et la biomasse sur pied aux sites de contrôle au sol en 1988

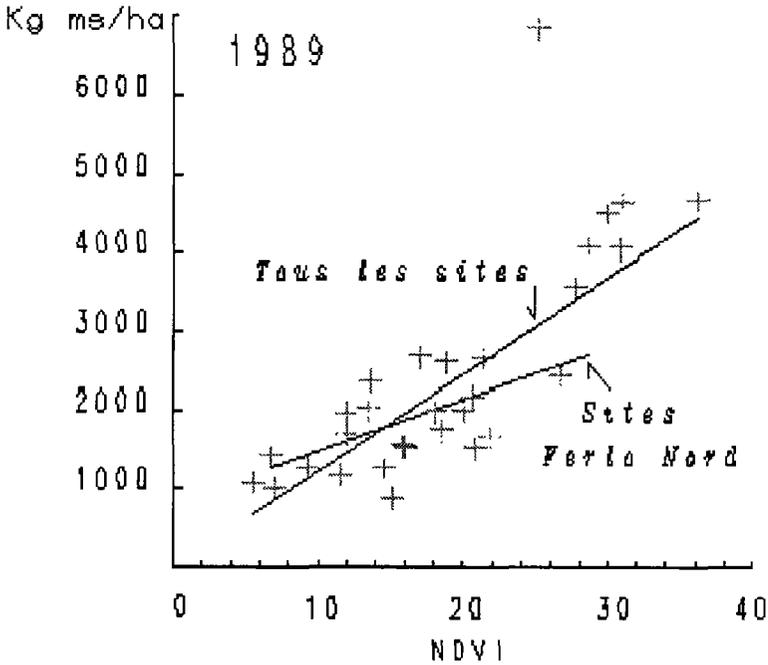


Figure 2c. Droites de régression entre l'indice de végétation cumulé sur 11 décades et la biomasse sur pied aux sites de contrôle au sol en 1989

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

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

3 L'estimation des effectifs du bétail

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

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

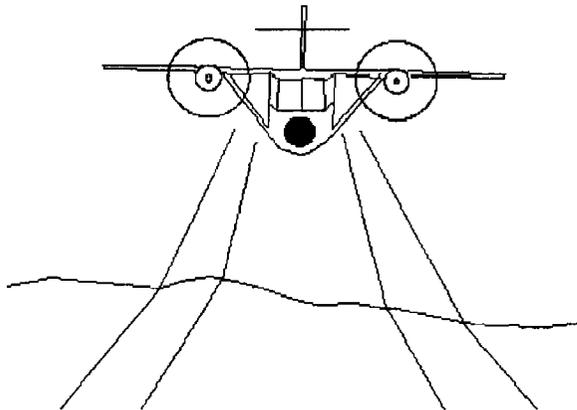


Figure 4. Principe des fenêtres d'observation de chaque côté de l'avion

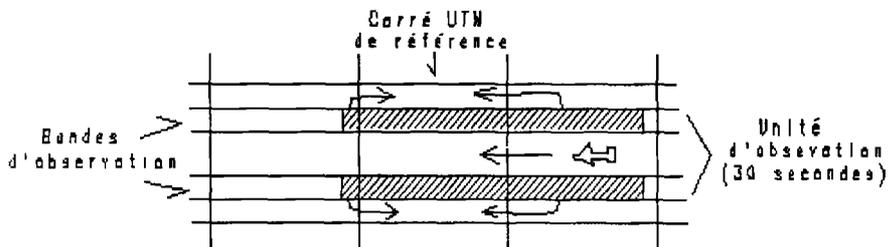


Figure 5. Principe des lignes de vol, des unités d'observation et de la localisation des unités d'observation par rapport à des carrés UTM de 1 km²

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

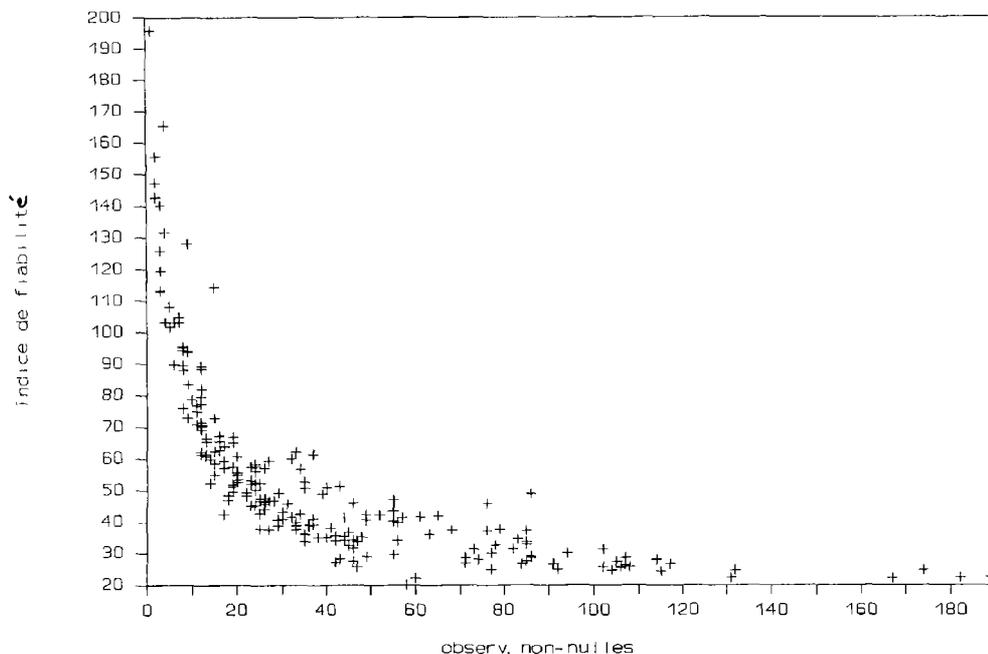


Figure 6. Indice de fiabilité (intervalle de confiance/valeur moyenne) en fonction du nombre d'observations non nulles pour le cheptel toutes espèces confondues (bovins, petits ruminants, chevaux et ânes)

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

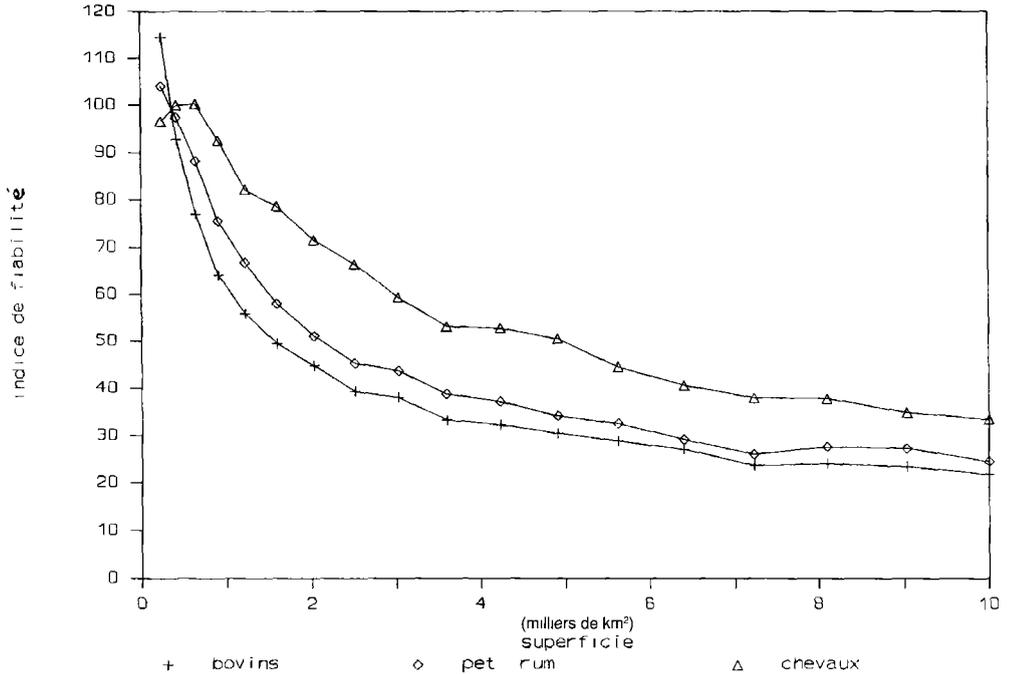


Figure 7. Relation entre l'indice de fiabilité et la superficie des unités du découpage pour les bovins, les petits ruminants et les chevaux (résultats de l'enquête aérienne de 1989)

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

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

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

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

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

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

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

4 L'estimation de la pression animale

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5 Conclusions

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

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

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

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

7 Références

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

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

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

23

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

MOHAMED CHÉDLY RABIA* et FOUED ZARGOUNI**

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

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

Résumé

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

1 Introduction et présentation de la région d'étude

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

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

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

1.1 Cadre géographique

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

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

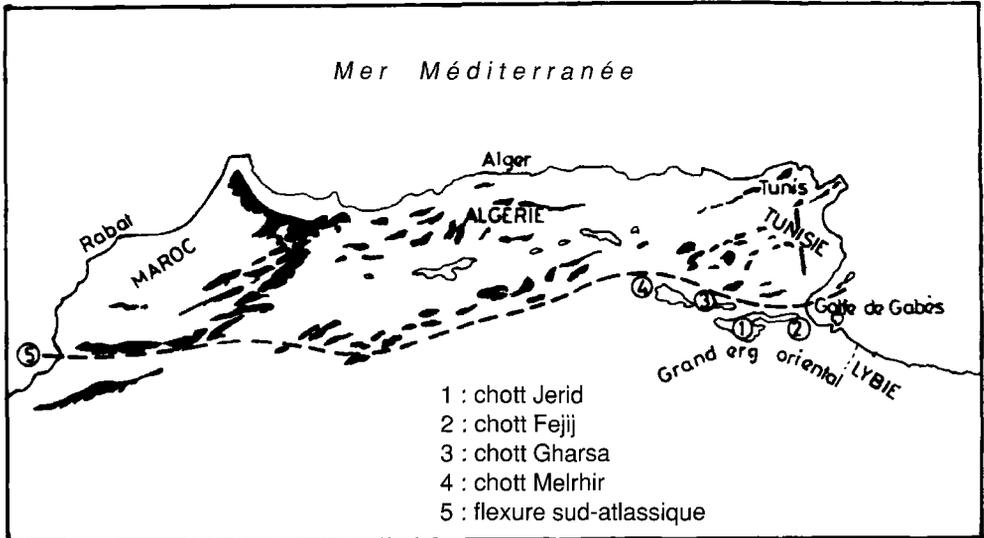


Figure 1. Carte de situation des chotts périatlassiques

1.2 Cadre géologique et géomorphologique

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

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

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

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

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

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

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

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

1.3 Cadre climatique

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

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

2 Cartographie de la région d'étude

2.1 Les moyens utilisés

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

2.2 Méthode

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

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

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

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

Tableau I. Données satellitaires utilisées lors de la présente étude

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

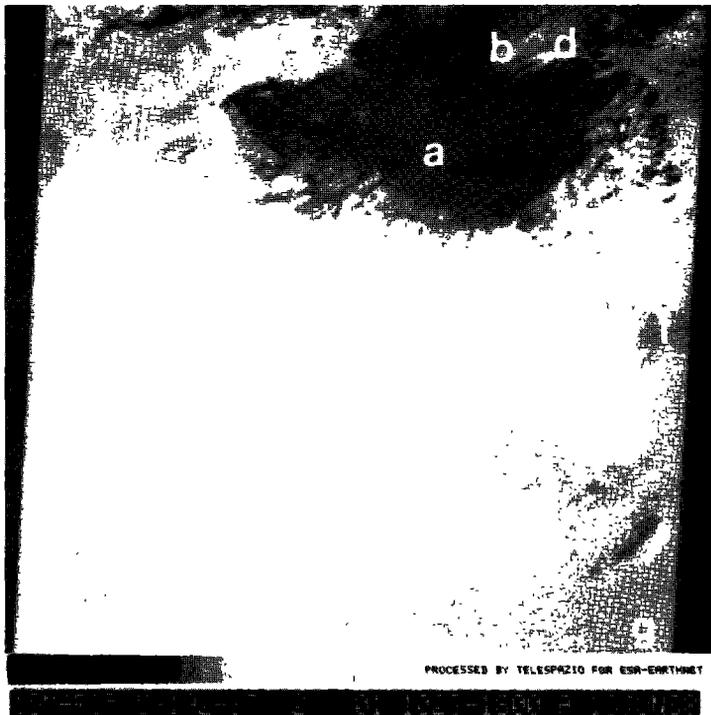


Figure 2. Image MSS5 192-37 (noir et blanc); a : chott Jerid, b : zone des aïouns, c : croûte gypseuse, d : incursions éoliennes, e : croûte calcaire, f : Hamada, g : traînées dunaires

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

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

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

2.3 Résultats

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

2.3.1 Carte télé-analytique

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

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

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

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

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

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

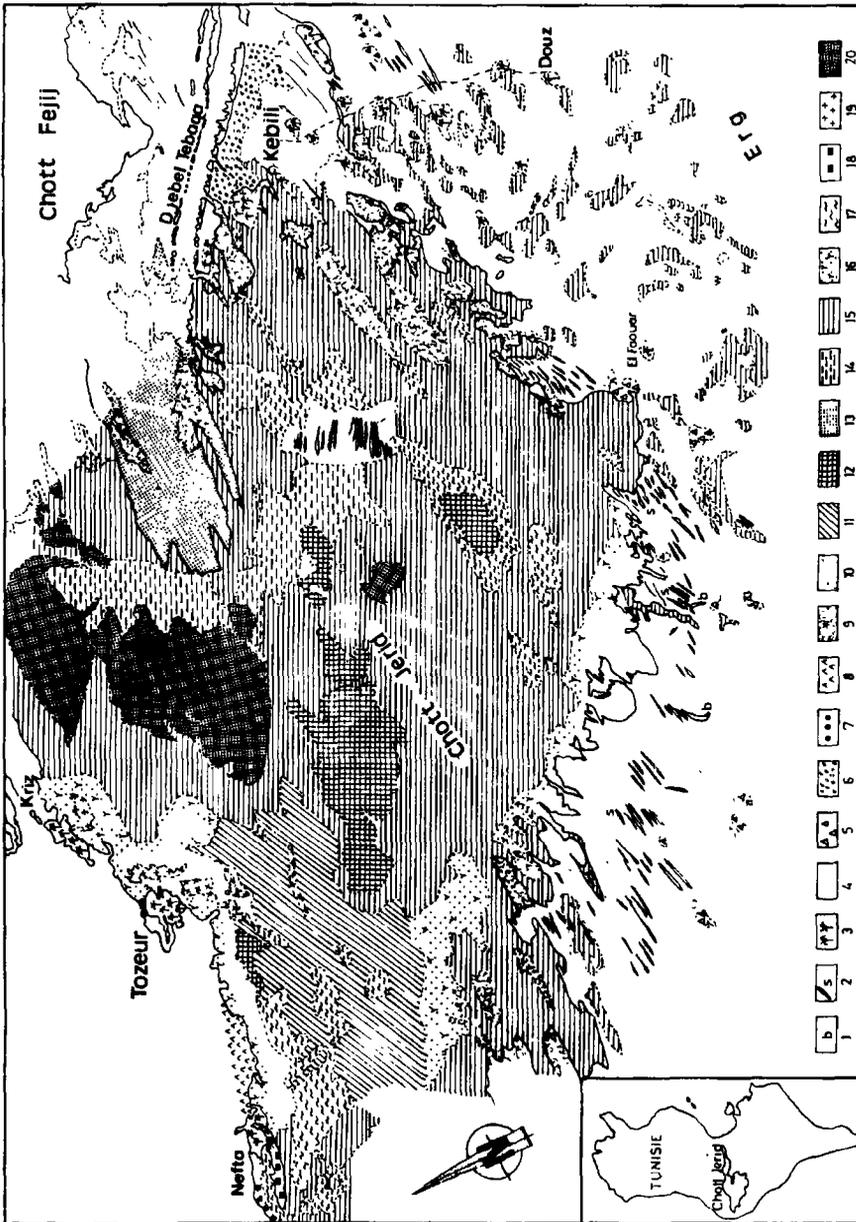


Figure 4. Carte télé-analytique des affleurements du chott Jerid, 1 : barkanes, 2 : sioufs, 3 : oasis, 4 : mer de sable, 5 : zone de déflation, 6 : terrasses alluvionnaires, 7 : étendue de galets, surfaces sableuses, 8 : dunes à encroûtements gypseux, 9 : dunes sableuses avec zone de transit et d'arrachement,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

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

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

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

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

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

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

2.3.2 Le comportement radiométrique des affleurements du chott Jerid

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

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

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

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

2.3.3 Interprétation des résultats

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

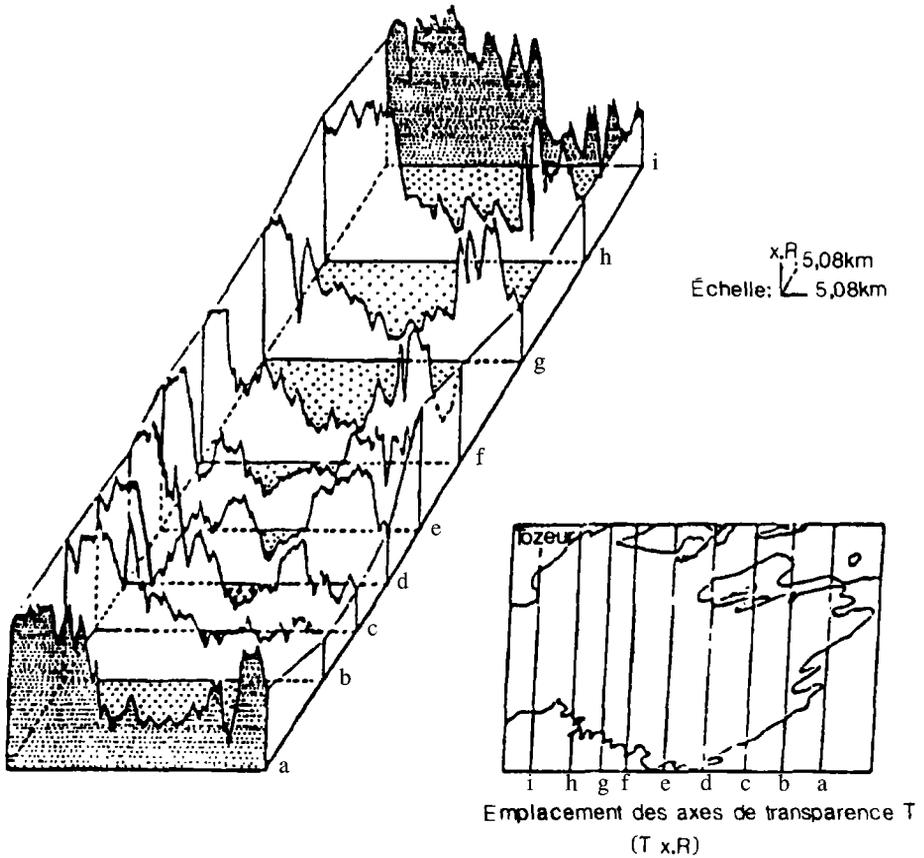


Figure 5. Traitement au Digicol : essai de cartographie sous forme de bloc diagramme de la transmission

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

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

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

Tableau II. Bilan des apports de sels amenés par ruissellement et par les eaux souterraines au chott Jerid (10⁴ tonnes/an) (Gueddari, 1980)

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

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

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

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

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

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

3 Conclusion

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4 Références

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

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

24

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

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

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

Résumé

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

1 Introduction

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

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

2 Modèle

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

Rappelons les trois propriétés fondamentales du processus de Poisson :

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

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

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

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

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

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

et la densité

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

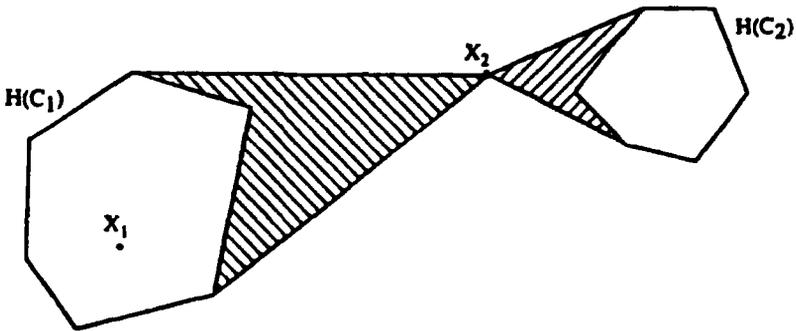


Figure 1. Illustration de la règle d'allocation (décision : X_1 est affecté à C_1 et X_2 à C_2)

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

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

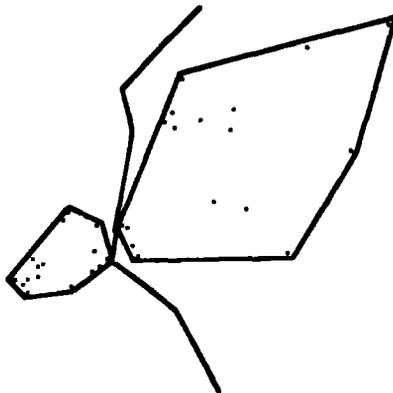


Figure 2. Frontière entre deux classes ajoutant la même mesure aux deux enveloppes convexas

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

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

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

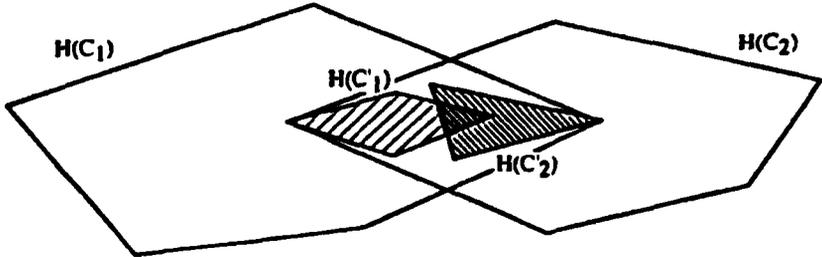


Figure 3. Construction des enveloppes convexes des points de chaque population à l'intérieur d'une intersection

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

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

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

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

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

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

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

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

est minimal.

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

3 Application

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

3.1 Exemple 1

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

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

Tableau I. Résultats obtenus dans l'exemple 1

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

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

3.2 Exemple 2

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

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

Tableau II. Résultats obtenus dans l'exemple 2

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

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

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

3.3 Exemple 3

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

Tableau III. Résultats obtenus dans l'exemple 3

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

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

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

4 Discussion et conclusion

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

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

5 Références

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

25

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

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

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

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

Résumé

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

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

1 Introduction

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

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

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

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

2 Contexte géographique

2.1 Secteur d'étude

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

2.2 Le phénomène de submersion du fleuve Niger

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

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

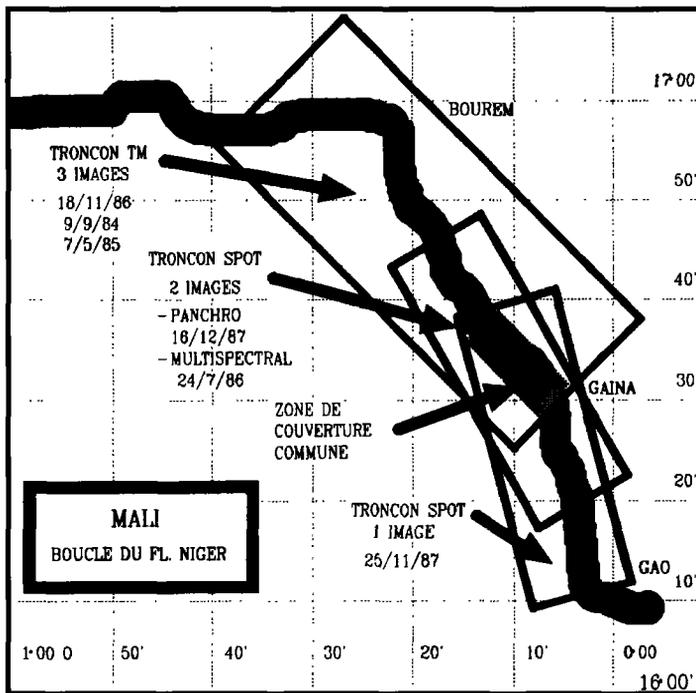


Figure 1. Zone à l'étude, images traitées et couverture fluviale

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

3 Méthode

3.1 Choix des images

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

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

3.2 Traitements effectués

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

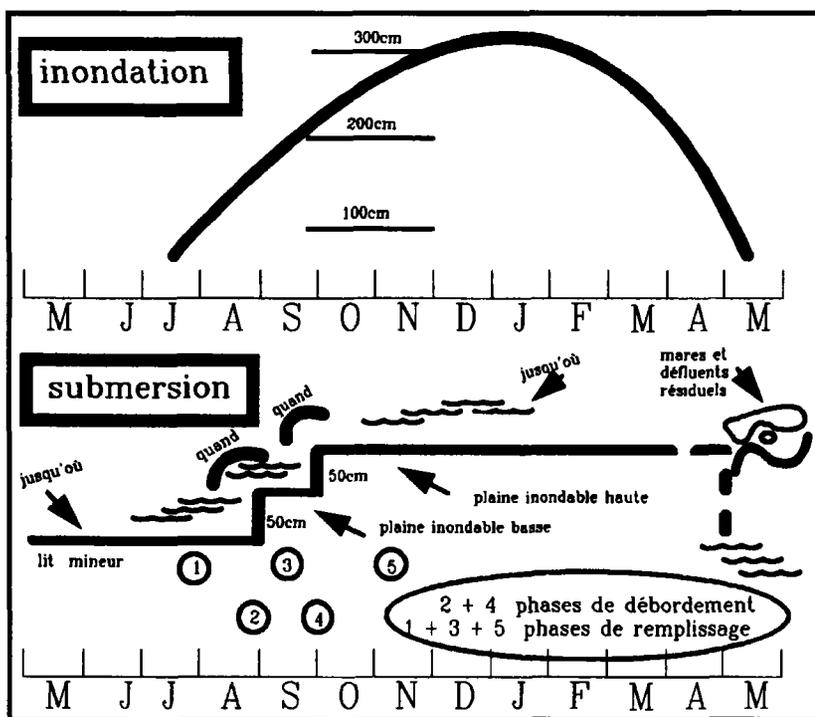


Figure 2. Schématisation des événements dans le temps; en haut : l'onde de crue, un phénomène continu; en bas : le régime de submersion, un phénomène discontinu (Bertrand et Bourgeon, 1984)

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

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

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

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

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

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

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

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

4 Résultats et analyse

4.1 Évaluation des images Landsat-TM

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

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

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

4.2 Évaluation des images SPOT

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

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

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

4.3 Comparaison entre les données Landsat et SPOT

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

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

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

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

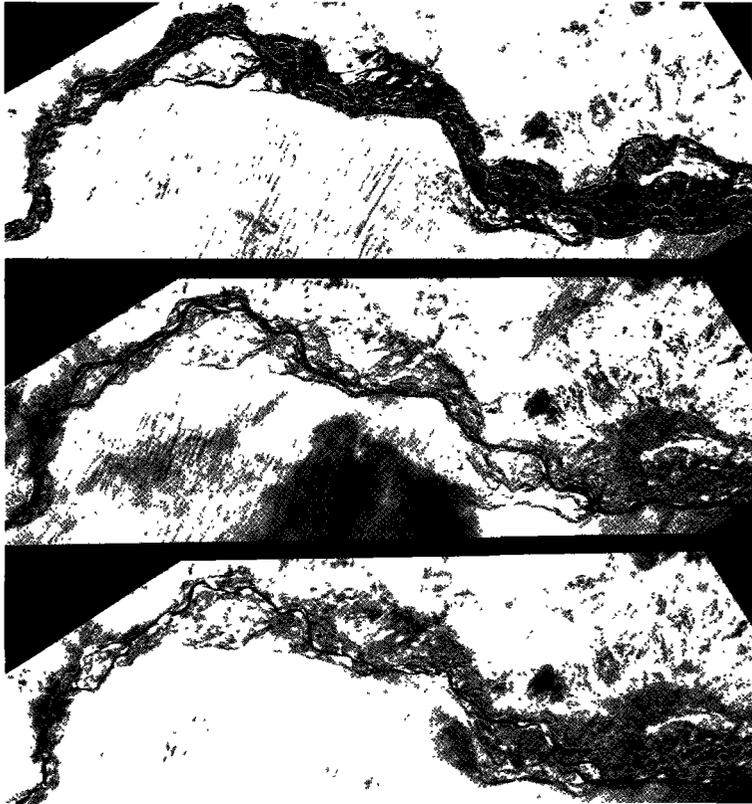


Figure 3. Trois états du fleuve vus par Landsat-TM (TM-7, TM-4, TM-2); en haut : crue, 18-11-86, hauteur d'eau à Tossaye : 443 cm; au centre : mi-cruve, 09-09-84, hauteur d'eau à Tossaye : 335 cm; en bas : étiage, 07-05-85, hauteur d'eau à Tossaye : 103 cm

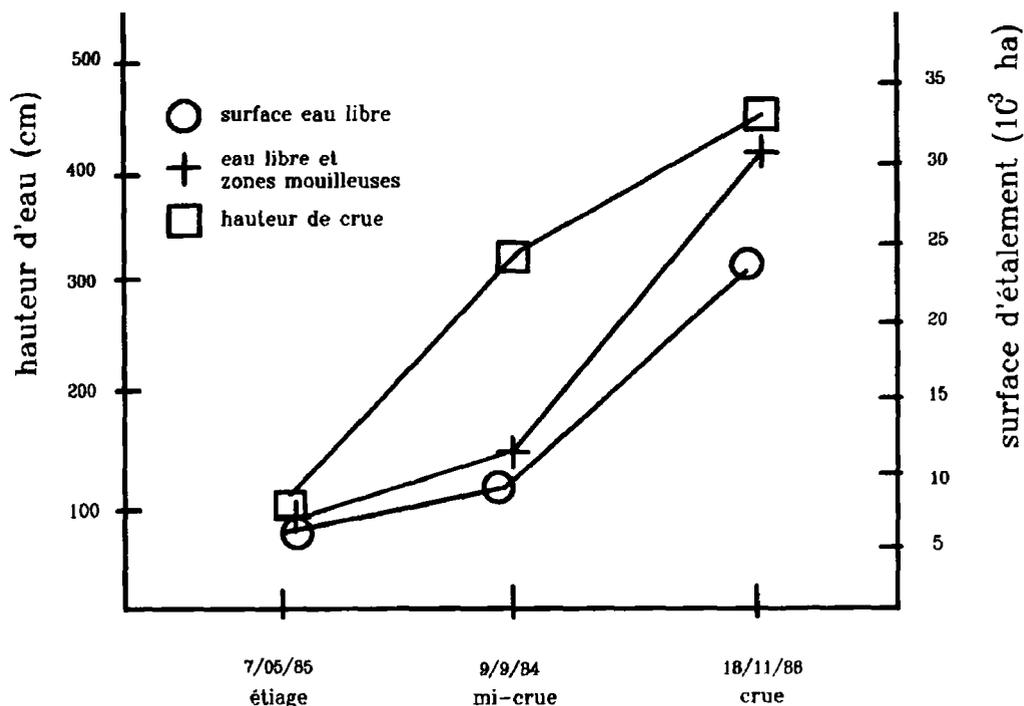


Figure 4. La crue et la submersion dans le temps; les superficies sont calculées à partir de TM-4

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

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

5 Conclusion

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

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

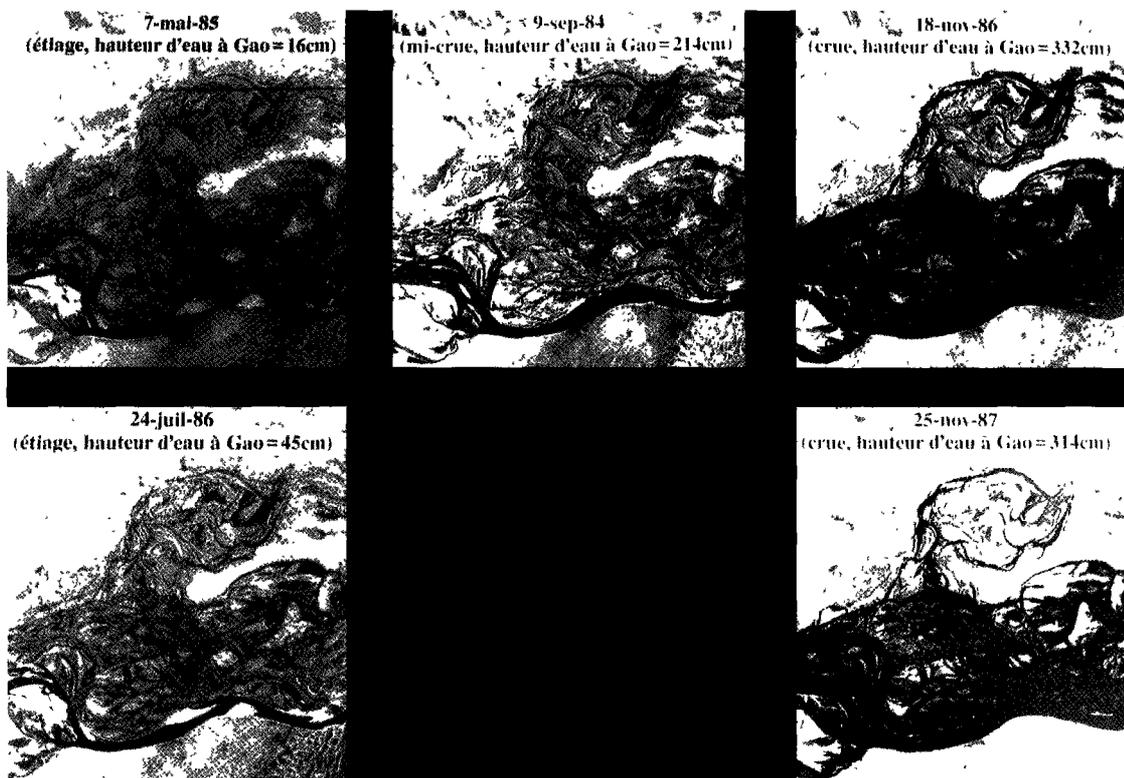


Figure 5. Comparaison TM/SPOT en terme de résolution spatiale; en haut : images TM (bandes 4-3-2) rééchantillonnées à 20 m; en bas : images SPOT (bandes 3-2-1)

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

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

6 Références

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

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

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

26

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

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

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

***Digim inc., 1 100, boulevard René-Lévesque Ouest, Montréal, Québec, Canada H3B 4P3, téléphone : 514-876-4521, télécopieur : 514-876-9273, télex : 055-61250*

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

Résumé

Un projet de formation et de démonstration sur l'utilisation de la télédétection pour les petits aménagements énergétiques et agricoles dans les pays du Sahel a débuté en 1988. Il vise à définir les moyens susceptibles de favoriser des conditions d'épanouissement du milieu rural sahélien pour une gestion rationnelle des ressources. Trois projets utilisant la télédétection et des systèmes d'information géographique ont été initiés dans trois pays sahéliens, soit :

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

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

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

1 Introduction

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

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

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

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

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

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

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

2 Objectifs du projet

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

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

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

3 Formation

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

3.1 Participants

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

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

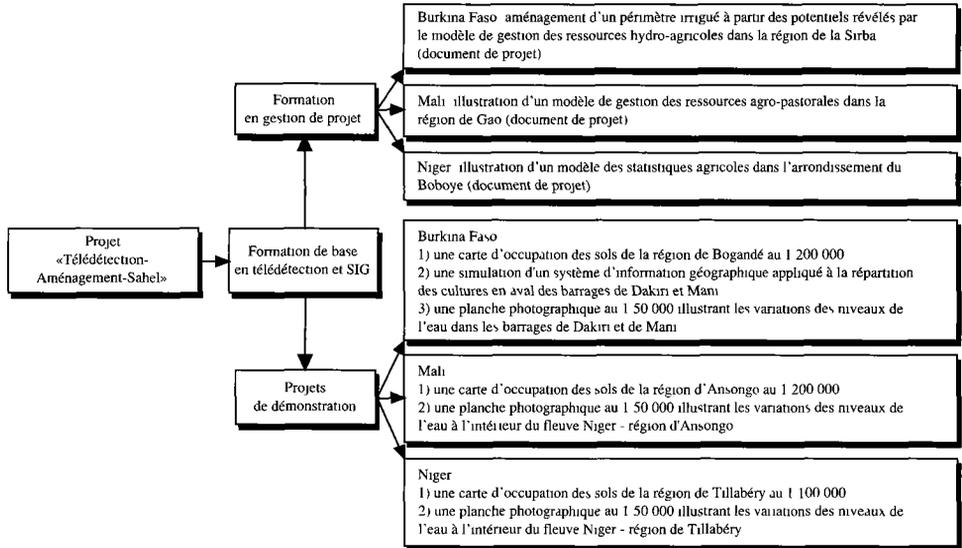


Figure 1. Le projet «Télétection-Aménagement-Sahel»

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

3.2 Formation en télédétection et systèmes d'information géographique

3.2.1 Objectifs

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

1) donner une formation de base en télédétection et systèmes d'information géographique pour assurer un niveau commun de connaissance relativement à l'acquisition et au traitement des informations;

2) faire un cheminement individuel avec chacun des stagiaires en prenant en compte la nature des projets soumis par les États burkinabè, malien et nigérien.

3.2.2 Contenu

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

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

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

3.3 Formation en gestion de projet

3.3.1 Objectifs

La formation en gestion de projet visait quatre objectifs principaux :

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

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

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

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

3.3.2 Contenu

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

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

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

3.4 Évaluation du volet formation

3.4.1 Télédétection et système d'information géographique

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

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

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

3.4.2 Gestion de projet

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

4 Projets de démonstration

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

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

4.1 Burkina Faso

4.1.1 Introduction

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

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

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

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

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

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

4.1.2 Volet télédétection et système d'information géographique

a) Données disponibles

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

b) Méthode

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

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

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

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

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

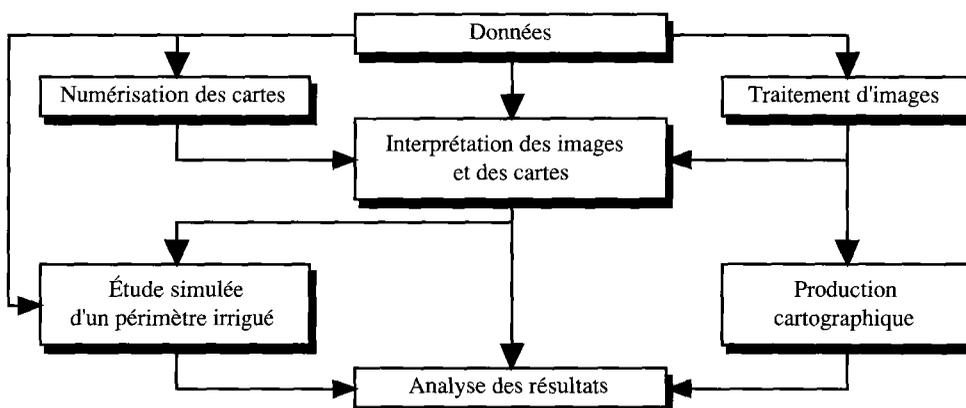


Figure 2. Méthode générale employée (Burkina Faso)

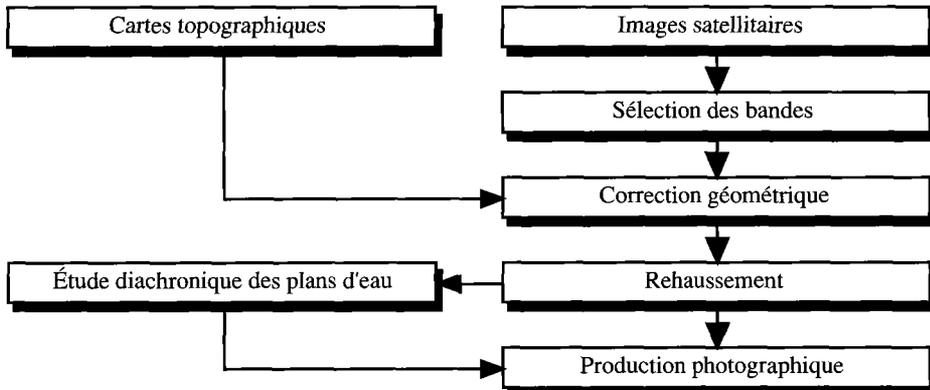


Figure 3. Étapes importantes de la phase de traitement d'images

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

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

c) Résultats

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

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

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

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

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

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

4.1.3 Volet gestion de projet

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

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

4.2 Mali

4.2.1 Introduction

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

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

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

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

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

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

4.2.2 Volet télédétection

a) Données disponibles

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

b) Méthode

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

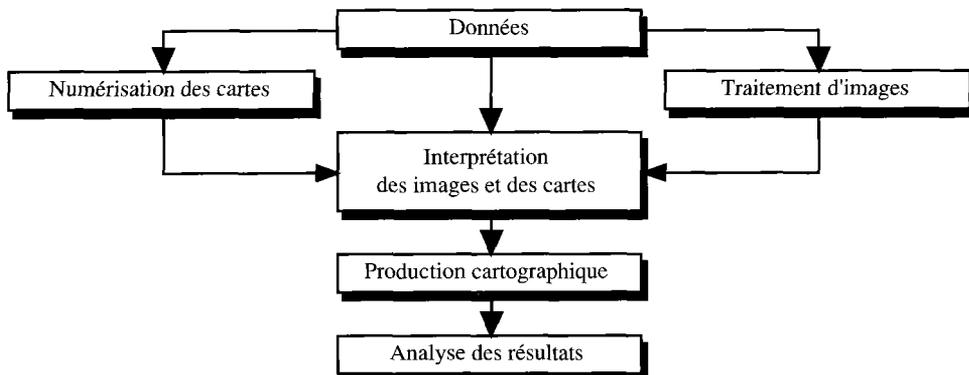


Figure 8. Méthode générale employée (Mali)

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

c) Résultats

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

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

4.2.3 Volet gestion de projet

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

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

5 Conclusion et recommandations

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

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

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

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

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

6 Références

- ACDI, 1989. Le Sahel. Vers un nouvel équilibre. —Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, 34 p.
- BÉNIÉ, G. B., 1982. Étude de quelques applications de la télédétection à la gestion des eaux au Québec. —Thèse de M. Sc., Université Laval, Québec, 126 p.
- COUREL, M. F., 1985. Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. —Thèse de doctorat d'État, Université Paris I, 407 p.
- DUBOIS, J.-M. et P. LAFRANCE (réd.), 1989. *Télédétection en francophonie : bilans régionaux et thématiques*. —Actes des Premières journées scientifiques du réseau thématique de télédétection de l'UREF (Sherbrooke), Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, 123 p.
- EDEN, M. J. et J. T. PARRY (éd.), 1986. Remote sensing and tropical land management. —Commonwealth Geographical Bureau, Wiley, London, 365 p.
- IRO, A., M. YERGEAU et G. B. BÉNIÉ, 1990. Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole au Sahel. —in P. Lafrance et J.-M. Dubois (réd.). *Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse*. Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 121-127.
- JOANNES, H., J. PARNOT, F. RANTRUA et N. A. SOW, 1986. Possibilité d'utilisation de la télédétection dans le domaine de l'eau en Afrique. —Série Hydrologie, Comité interafricain d'études hydrauliques, Ouagadougou, 141 p.
- LAMBIN, E., 1988. Apport de la télédétection satellitaire pour l'étude des systèmes agraires et la gestion des terroirs en Afrique occidentale, Exemples au Burkina Faso. —Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 239 p.
- LE COMTE, D. M., F. N. KOGAN, C. A. STEINBORN et L. LAMBERT, 1988. Assessment of crop conditions in Africa. —NOAA Technical Memorandum, NESDIS AISC 13, Washington, 66 p.
- PONS, R., 1988. La télédétection satellitaire et le Sahel. —SAHEL D(88)313, Club du Sahel, Paris, 149 p.
- PRÉVOST, C. et G. ROCHON, 1984. Application de la télédétection par satellite à l'inventaire des ressources en eau au Sahel. —4^e Congrès de l'Association québécoise de télédétection et 8^e Symposium canadien de télédétection, Montréal, p. 309-319.
- PRÉVOST, C., M. YERGEAU et R. TOÉ, 1981. Suivi diachronique des plans d'eau par imagerie satellite, région de Pissila, Haute Volta. —Centre régional de télédétection de Ouagadougou, Ouagadougou, 35 p.
- PRÉVOST, C., M. YERGEAU, H. VICKERS, D. BERTHELOT, A. GOSSELIN et J. L. MARTEL, 1987. Applied Data Integration for Water Resources Management in the Sahel. —Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 13, n° 2, p. 75-84
- TURNER, A. M. et D. R. STAFFORD, 1987. Operational revision of national topographic maps in Canada using Landsat images. —ITC Journal, 1987-2, p. 123-128
- YERGEAU, M. (éd.), 1989. La télédétection au service de la gestion des ressources naturelles et de la planification des micro-réalisations. —Compte rendu d'un séminaire régional, Agence de coopération culturelle et technique et CARTEL, Niamey, 117 p.
- YERGEAU, M. et P. BIGRAS, 1989. La télédétection, une source d'information pour la gestion de l'eau au Sahel. —CARTEL, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 16 p.

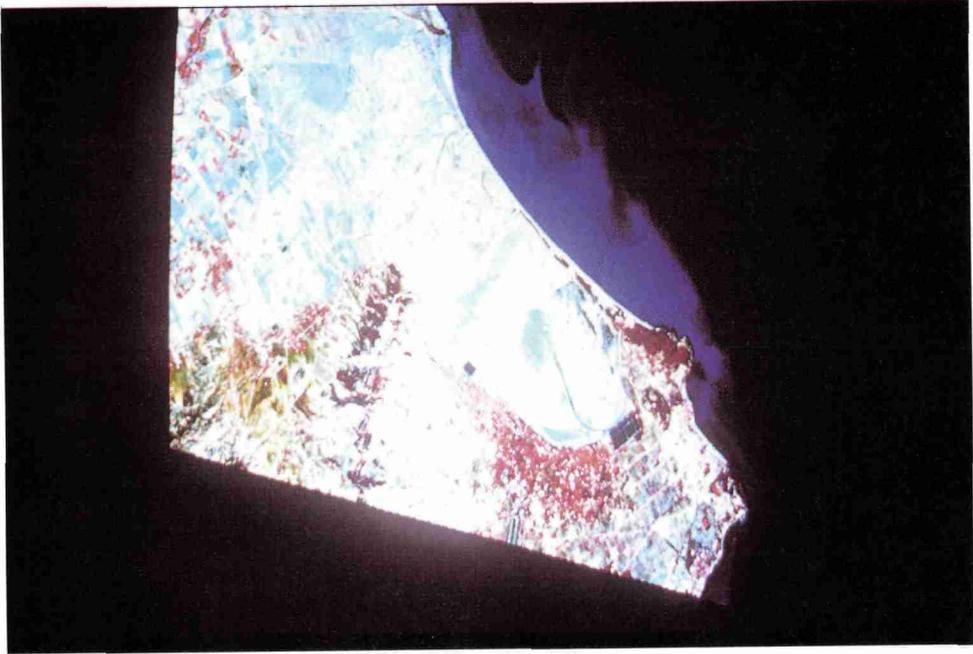


Figure 3-2. Image SPOT-XS 65-276 du 9 septembre 1987 (région de Tunis)

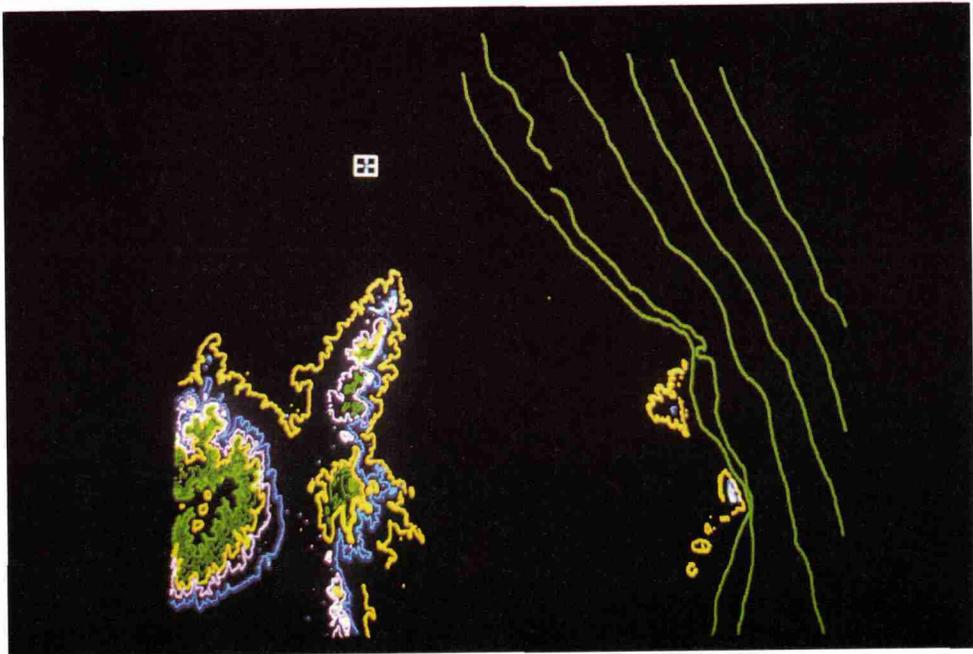


Figure 3-3. Topographie numérisée de la région de Tunis

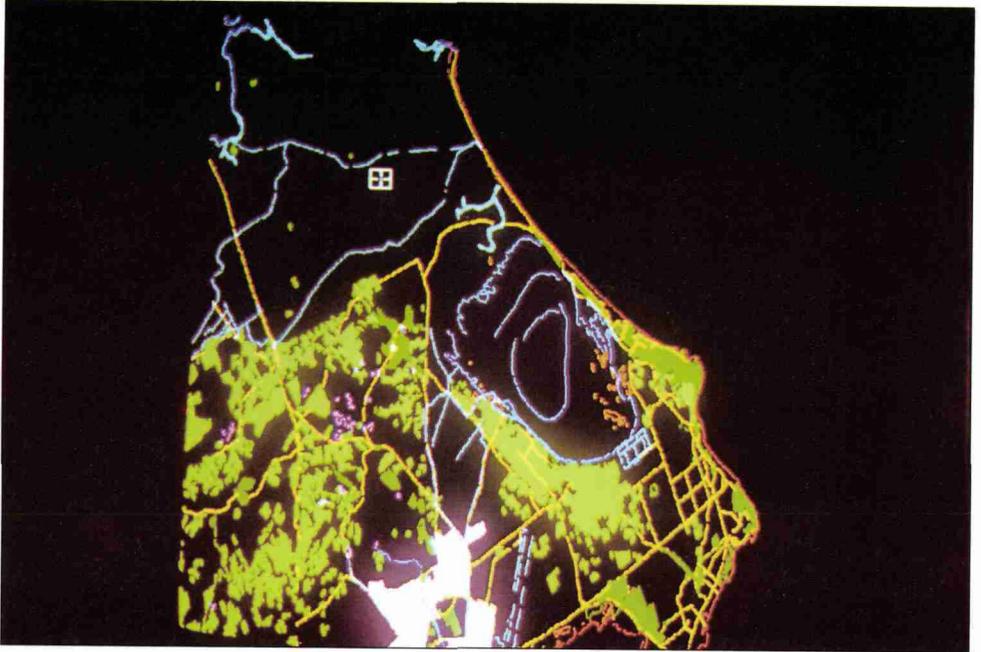


Figure 3-4. Occupation du sol de la région de Tunis numérisée



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

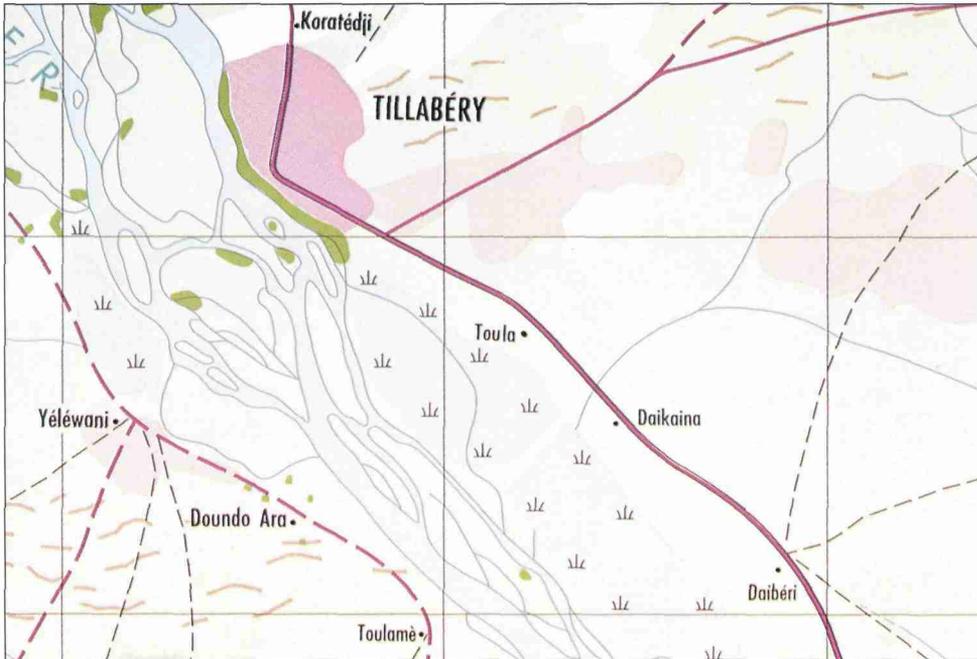


Figure 12-3. Carte d'occupation des sols au 1:100 000, région de Tillabéry, Niger (les rizières aménagées en bordure du fleuve Niger)

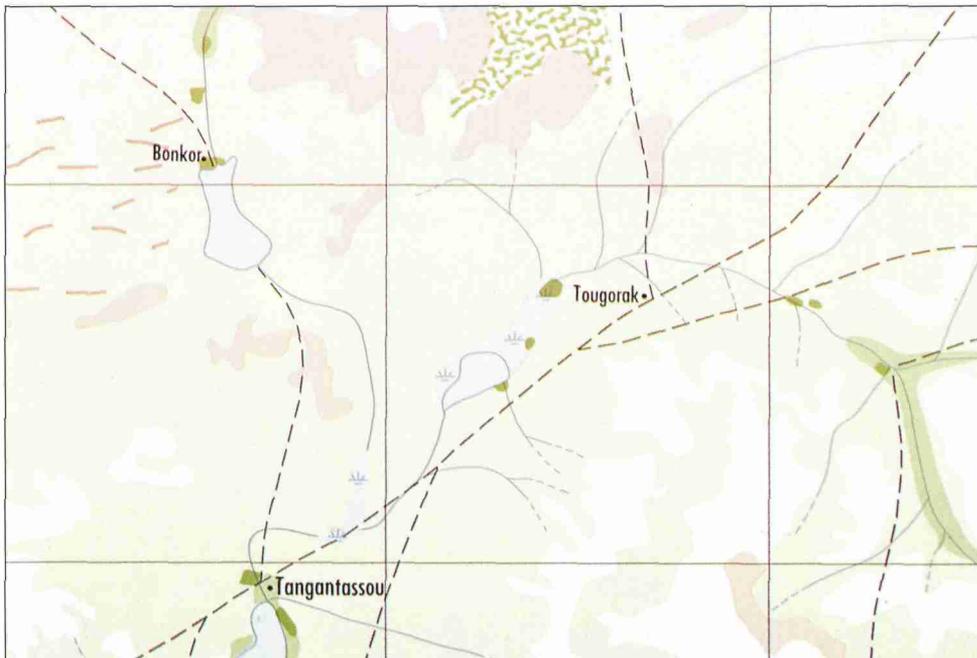


Figure 12-4. Carte d'occupation des sols au 1:100 000, région de Tillabéry, Niger (les sites de cultures de contre-saison qui occupent les bas-fonds durant la saison sèche)

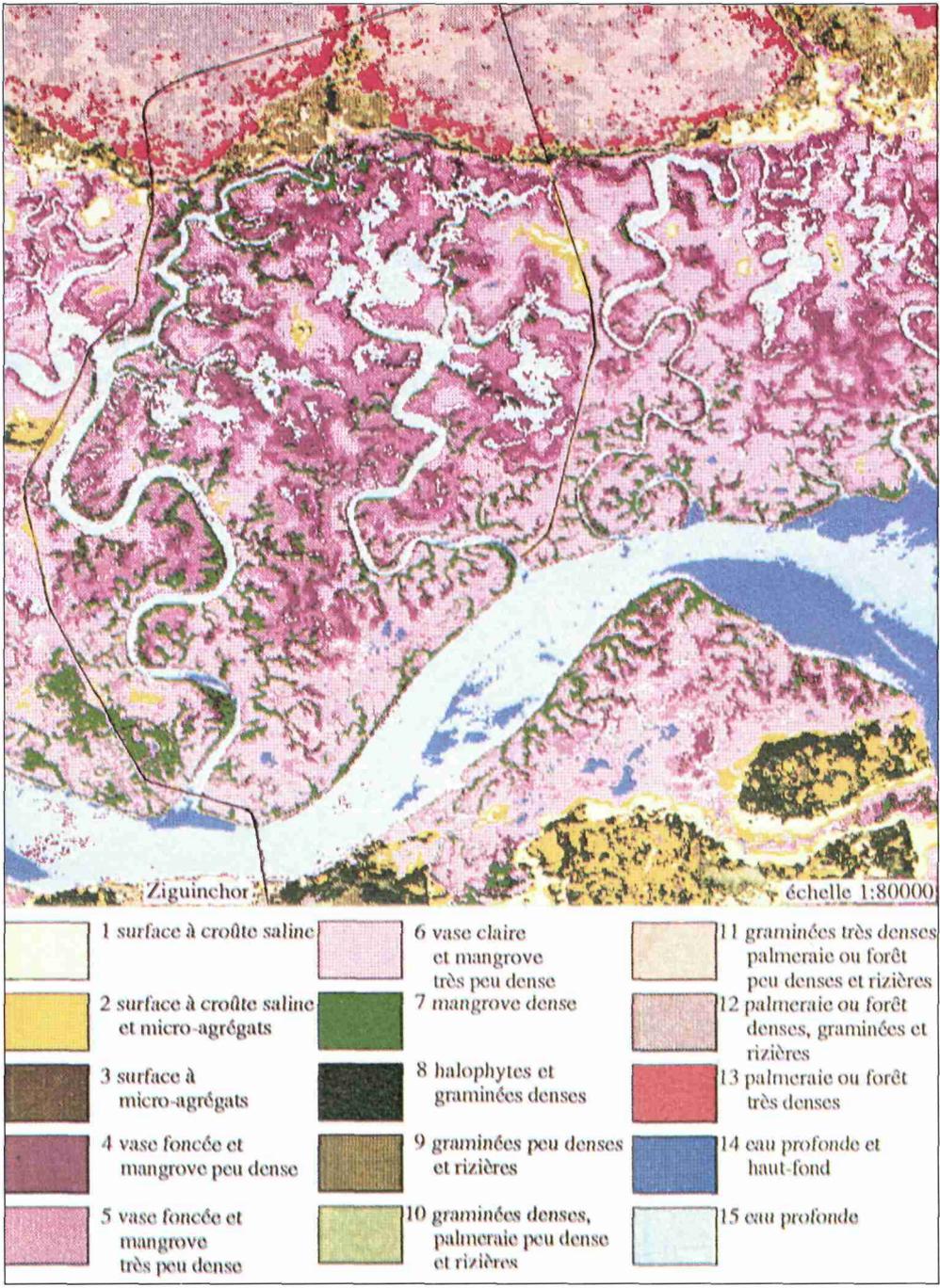


Figure 16-3. Carte des états de surface (exemple de Ziguinchor, Sénégal)

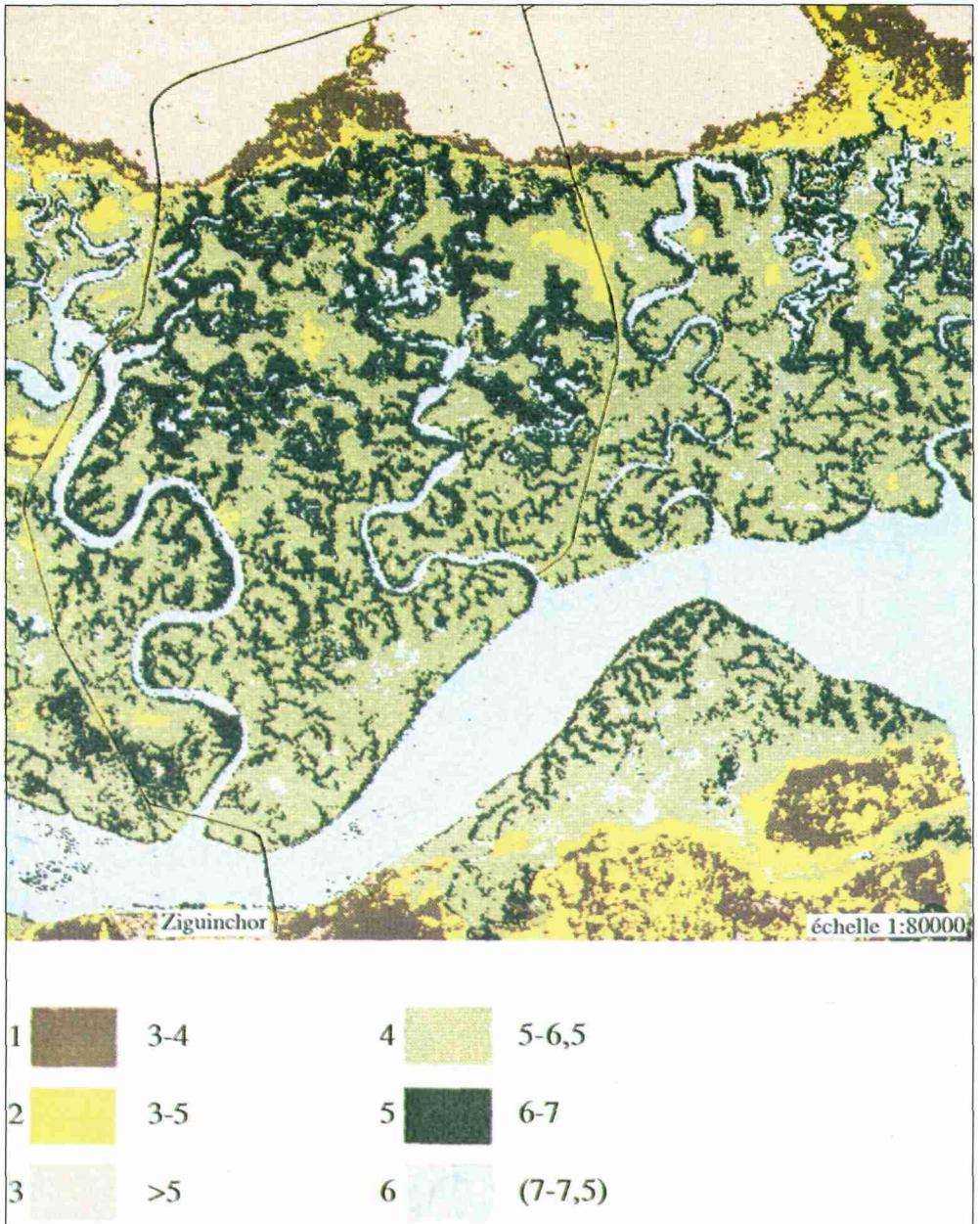


Figure 16-4. Carte du pH de l'horizon de surface (exemple au nord de Ziguinchor, Sénégal)

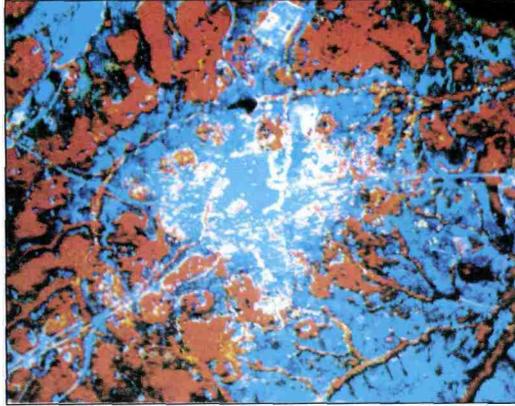


Figure 17-2. Composition colorée de la fenêtre de Toumodi (Côte d'Ivoire)

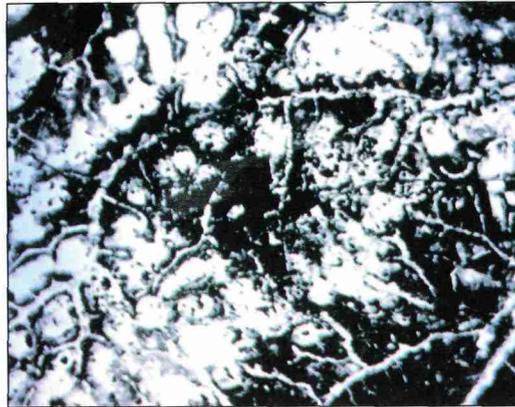


Figure 17-3. Indice de végétation de la fenêtre de Toumodi (Côte d'Ivoire)

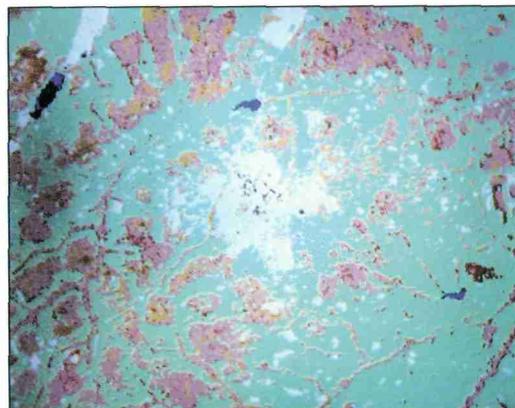


Figure 17-4. Classification de la fenêtre de Toumodi (Côte d'Ivoire)



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



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

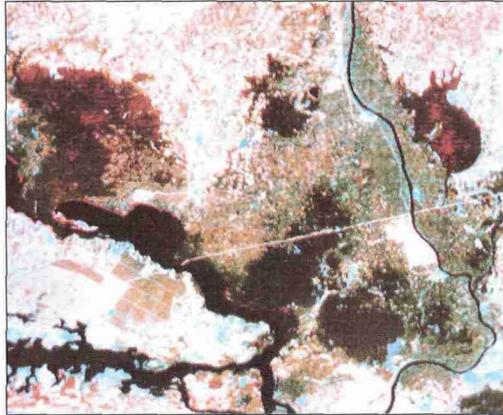


Figure 18-2. Vue d'ensemble du milieu d'étude (composition colorée TM 4-7-3) (région de Bingerville, Bassam et Ono, Côte d'Ivoire)



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



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

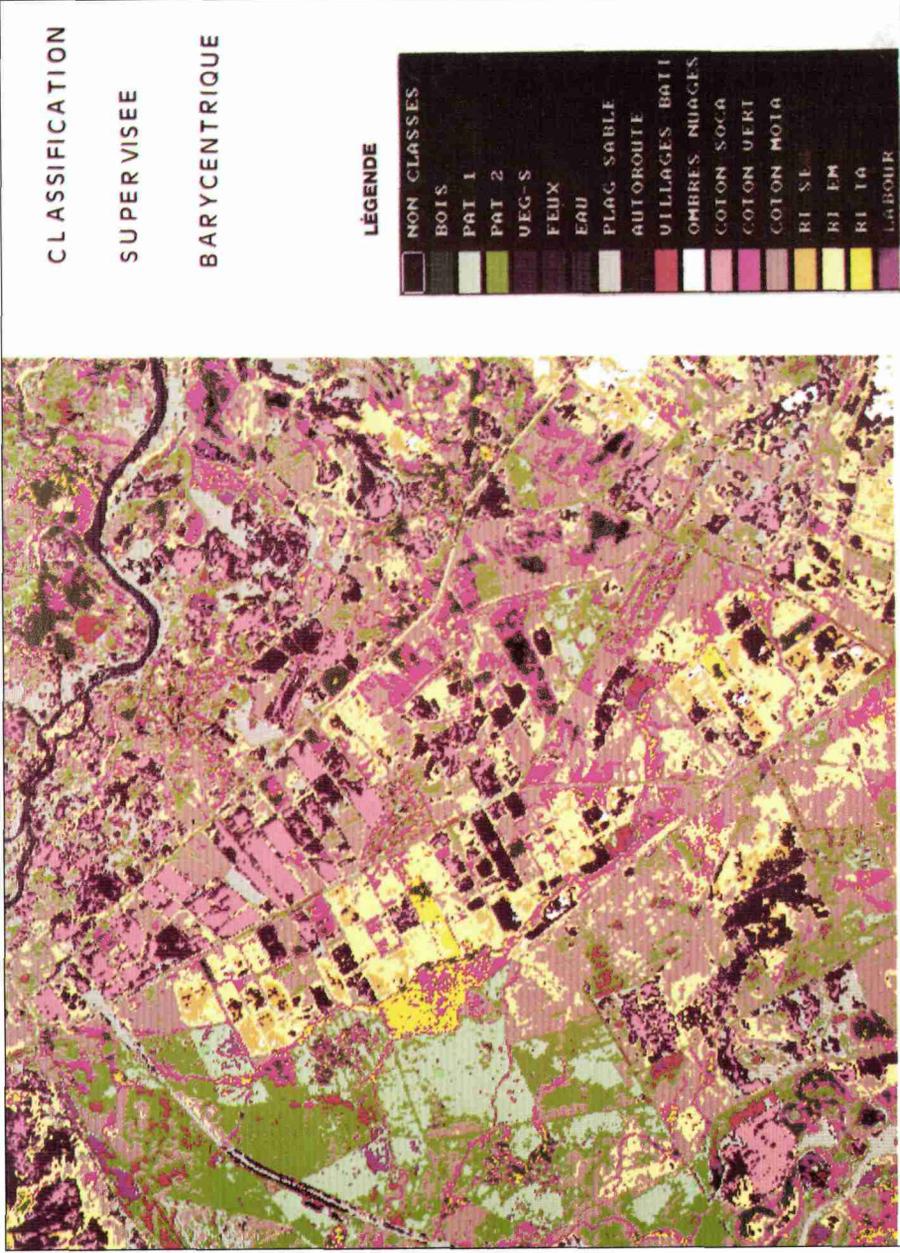


Figure 20-2. Périmètre irrigué «Sistema Rio Bocono», Venezuela (classification barycentrique effectuée en utilisant les canaux XS1, XS2, XS3, IV et IB)

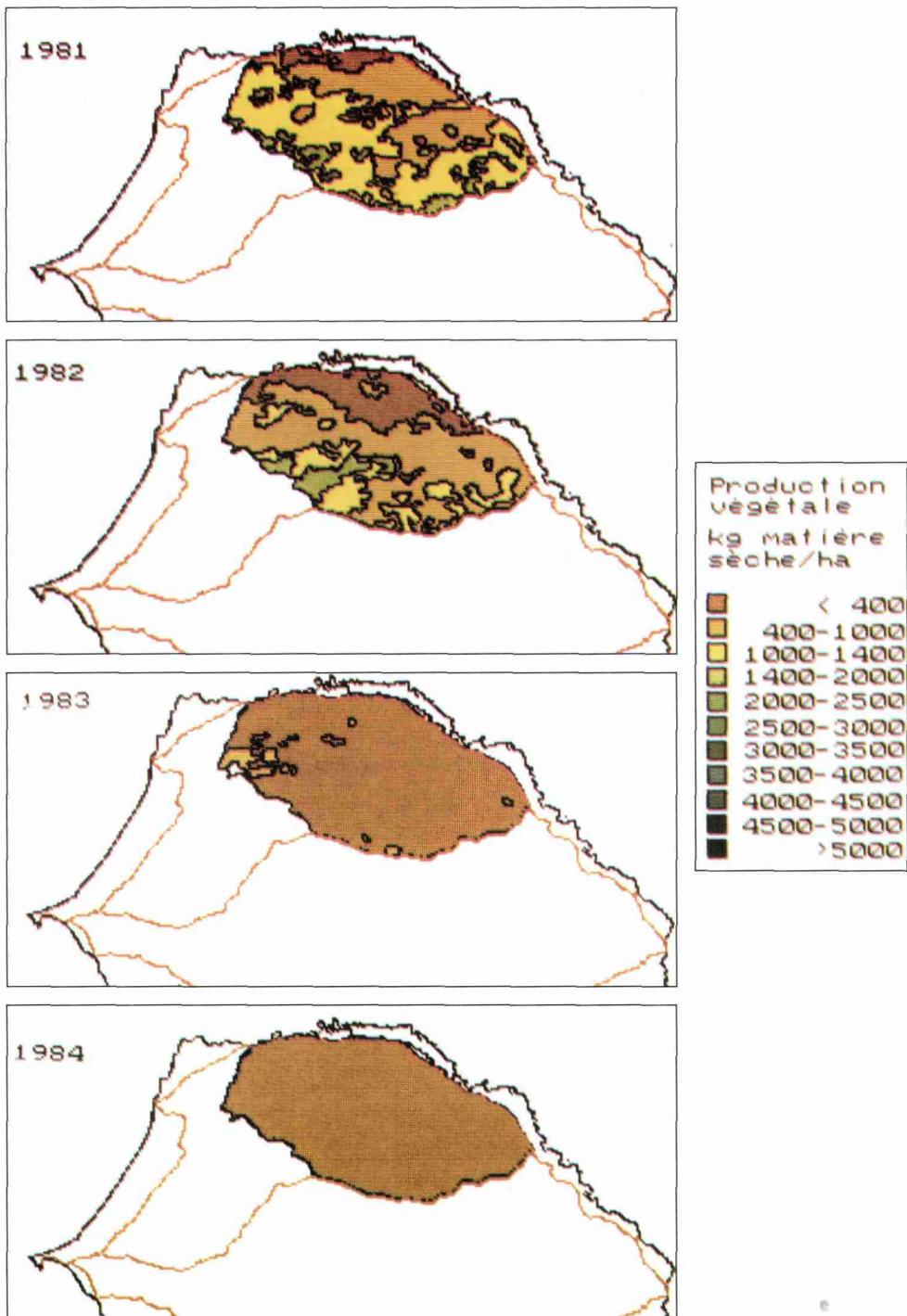


Figure 22-3 (partie 1). Évolution de la production végétale estimée entre 1981 et 1989 au Sénégal

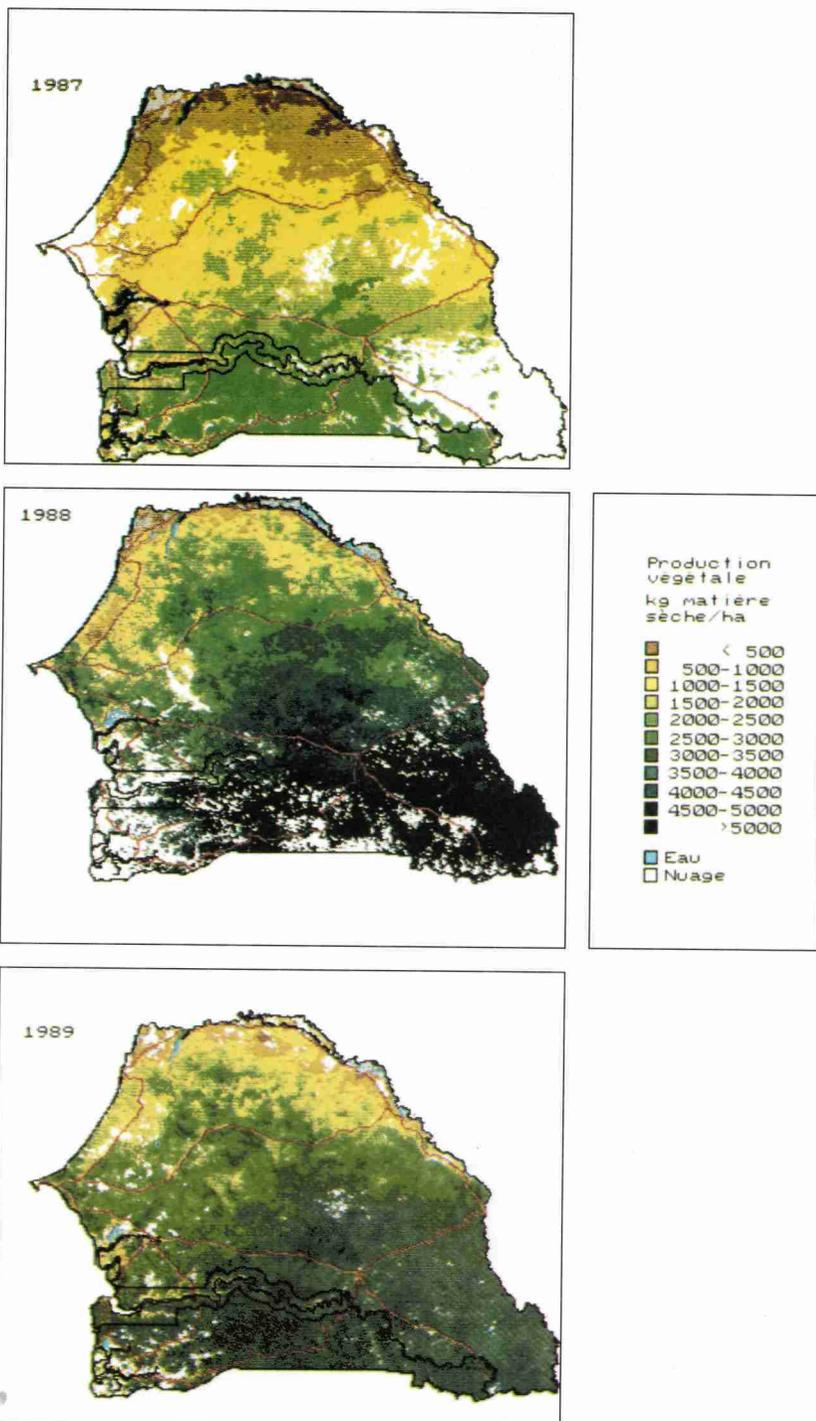


Figure 22-3 (partie 2). Évolution de la production végétale estimée entre 1981 et 1989 au Sénégal

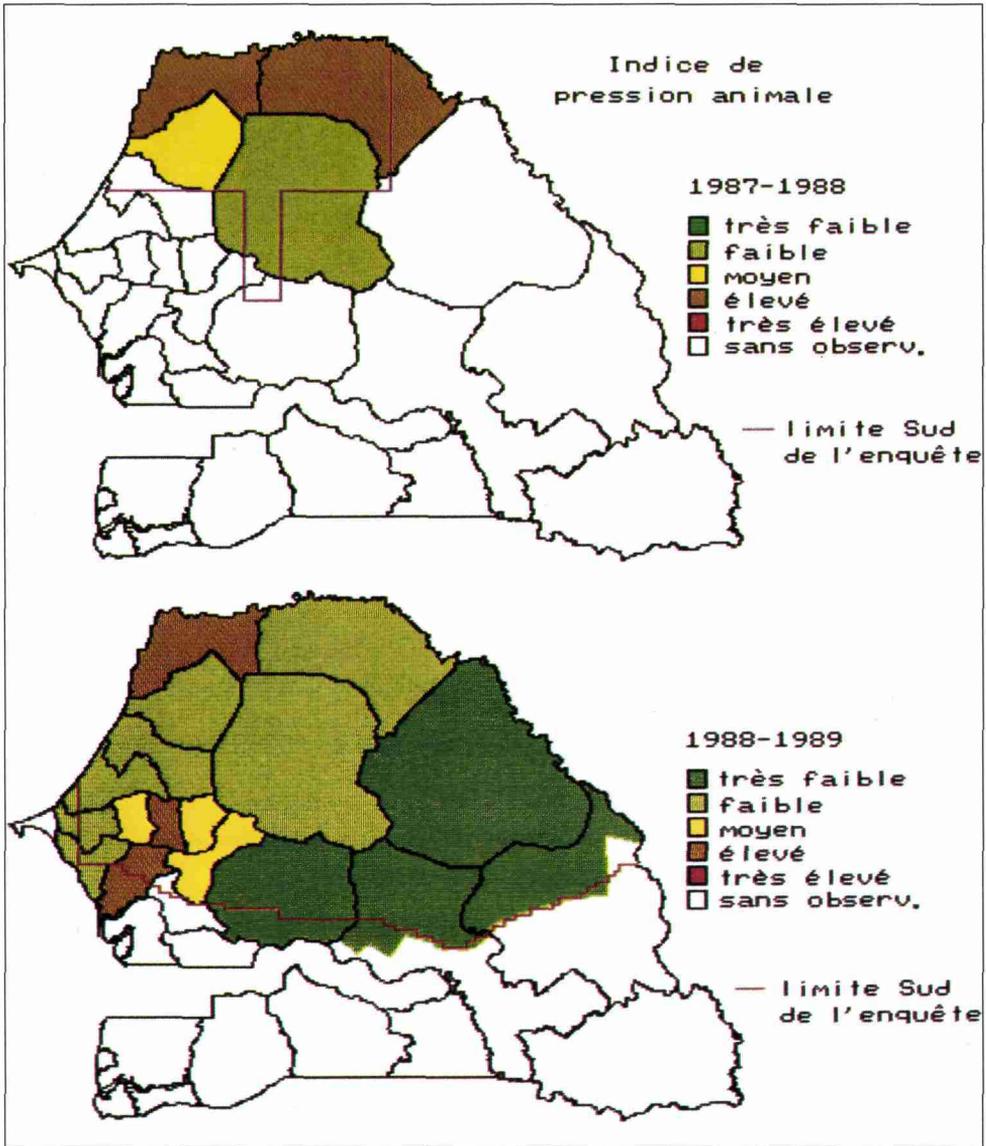


Figure 22-8. Indice de pression animale en 1987-1988 et 1988-1989 dans le nord du Sénégal (utilisation sur 365 jours, 30% de la végétation accessible)

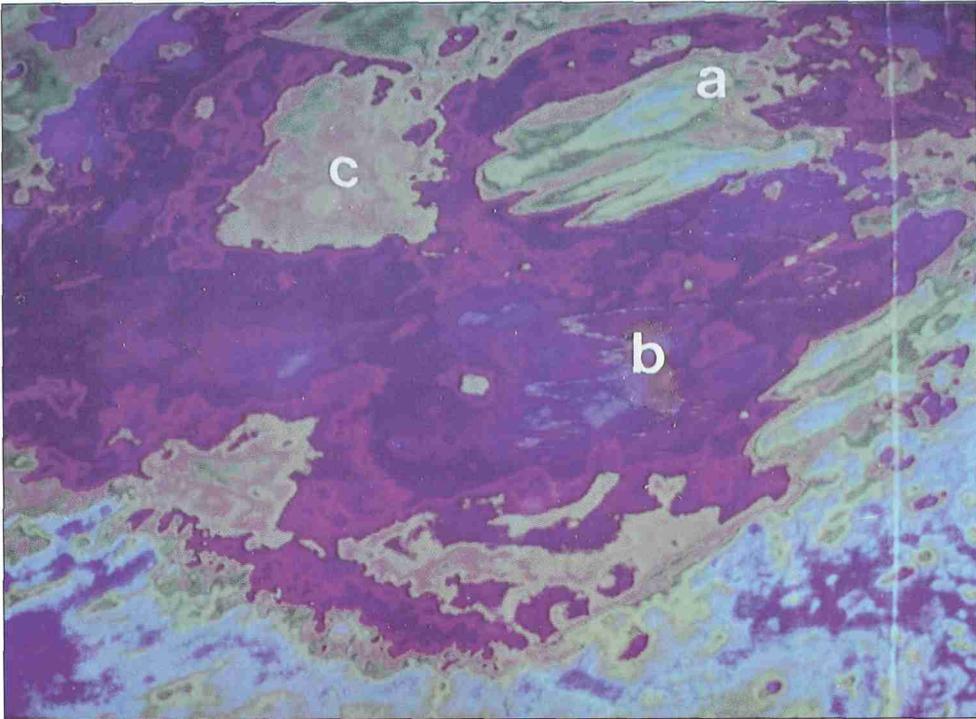


Figure 23-3. Image MSS du chott Jerid (Tunisie) traitée au Digicol; a : détail des incursions éoliennes au chott, b : diagramme de transmission selon un axe N-S mettant en évidence la différence de réflectance des sédiments, c : détail de la zone à croûte de sel fragmentée

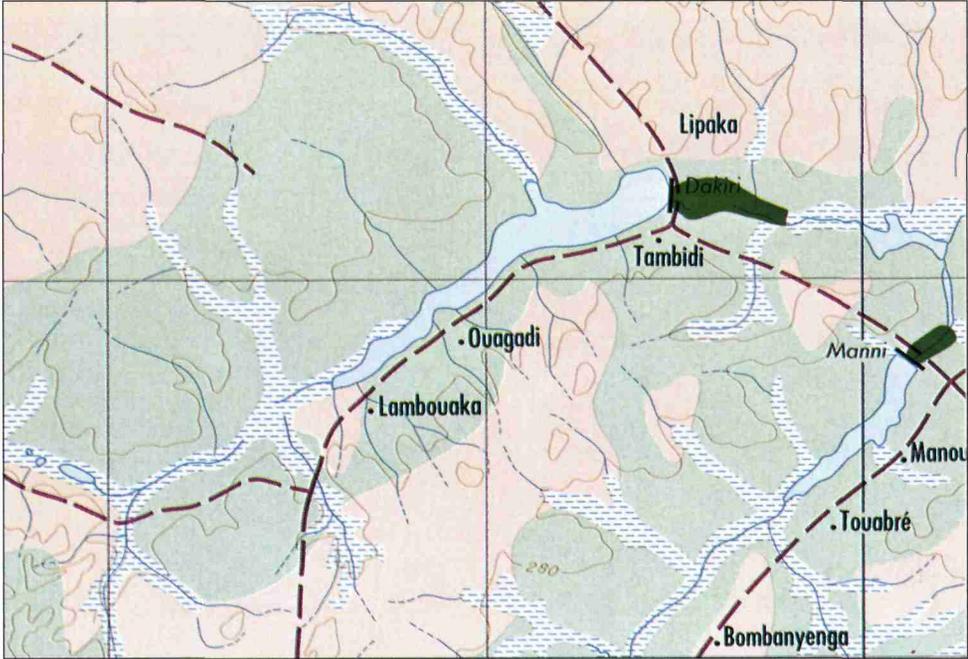


Figure 26-4. Carte d'occupation des sols au 1:200 000, région de Bogandé, Burkina Faso

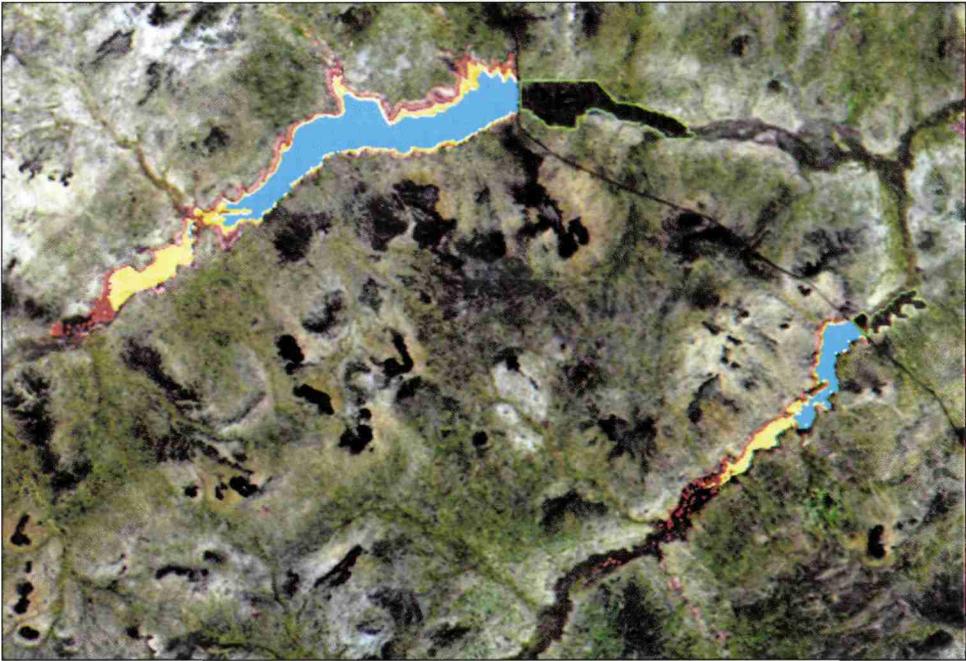


Figure 26-5. Étude diachronique des barrages de Dakiri et de Mani (Burkina Faso); les périmètres irrigués sont mis en évidence



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

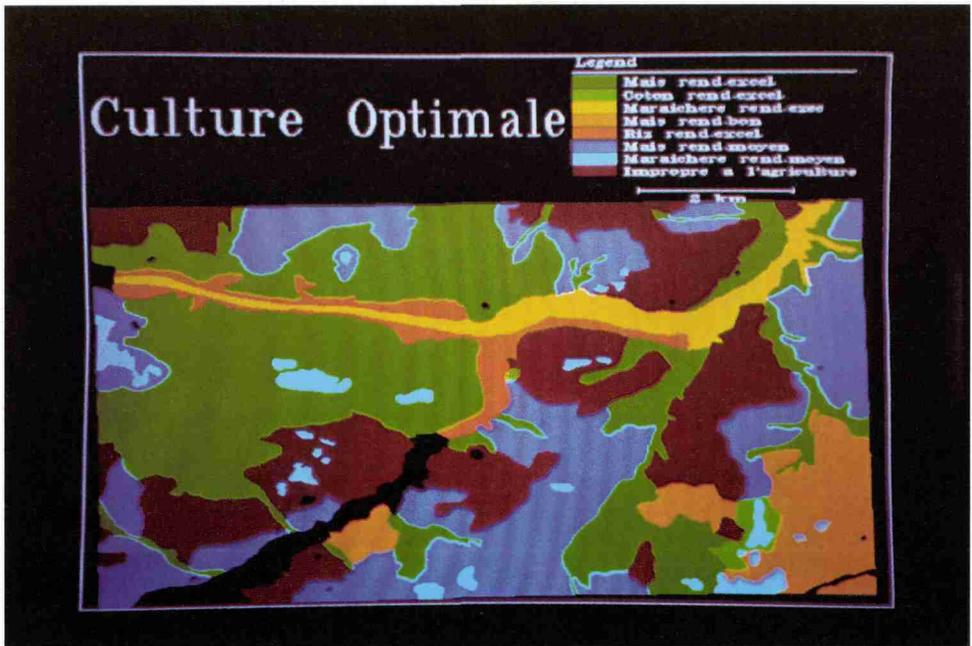


Figure 26-7. Un des résultats du SIG : carte des cultures optimales de la région de Mani-Dakiri (Burkina Faso)

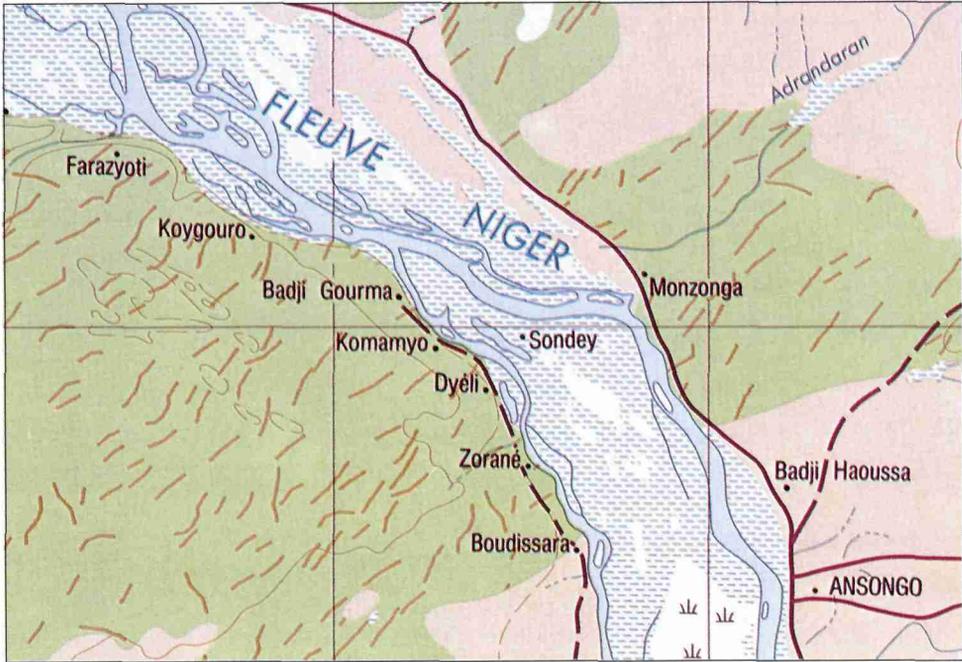


Figure 26-9. Carte d'occupation des sols au 1:200 000, région d'Ansong, Mali

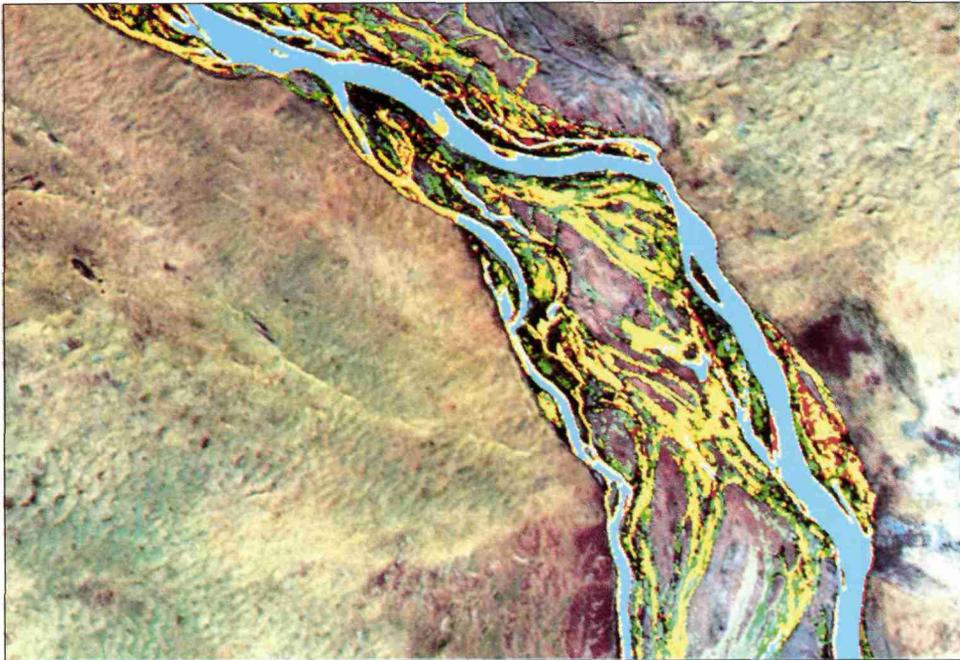


Figure 26-10. Étude diachronique illustrant les variations du fleuve Niger (région d'Ansong), Mali

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

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

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

160,00 FF

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

REF 59.4271.9



U R E F



9 780861 962617

AUFELF



John Libbey
EUROTEXT
PARIS · LONDRES