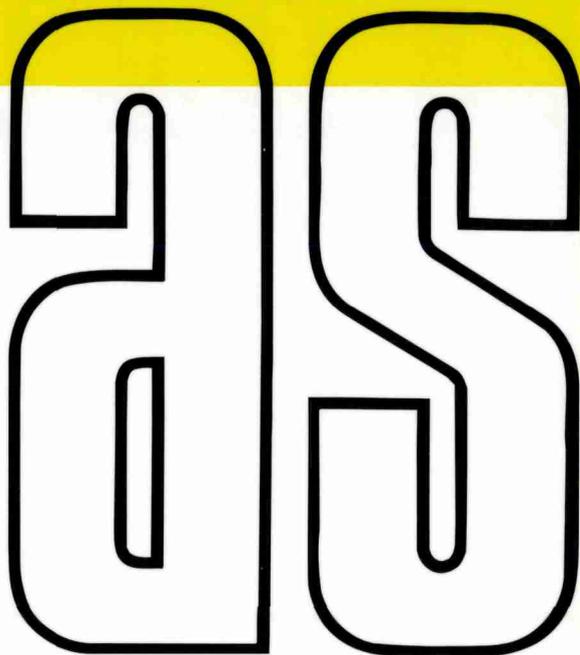


Sous la direction de

Jean-Marie M. Dubois

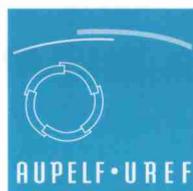
François Cavayas

Pierre Lafrance



actualité scientifique

TÉLÉDÉTECTION
APPLIQUÉE
À LA CARTOGRAPHIE
THÉMATIQUE
ET TOPOGRAPHIQUE



Actes des Journées scientifiques
de Montréal
1991

AUPELF



Presses de l'Université du Québec



TÉLÉDÉTECTION APPLIQUÉE
À LA CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE
ET TOPOGRAPHIQUE

Dans la même collection :

BONN, F. et ROCHON, G. 1992. Précis de télédétection, Volume 1, Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec, Québec, 486 p.

DUBOIS, J.-M. M. et BLASCO, F. (réd.) 1993. Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Série Actualité scientifique, Presses de l'Université du Québec, Québec, 534 p.

LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. M. (réd.) 1990. Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Série Actualité scientifique, John Libbey Eurotext, Paris, 320 p.

DUBOIS, J.-M. M. et LAFRANCE, P. (réd.) 1989. Télédétection en francophonie : bilans régionaux et thématiques. Série Actualité scientifique, John Libbey Eurotext, Paris, 130 p.

Diffusion de la collection selon les pays :

France :

Ellipses

32, rue Bargue

75015 Paris, France

Téléphone : (1) 45 67 74 19

Télécopie : (1) 47 34 67 94

Maghreb :

Ellipses et Hachette Diffusion Internationale (H. D. I.)

Canada :

Presses de l'Université du Québec

2875, boul. Laurier

Sainte-Foy, Québec, Canada, G1V 2M3

Téléphone : (1 418) 657 4390

Télécopie : (1 418) 657 2096

D. P. L. U.

5165, rue Sherbrooke Ouest, bureau 112

Montréal, Québec, Canada, H4A 1T6

Téléphone : (1 514) 484 3940

Télécopie : (1 514) 484 9325

Autres pays :

Hachette Diffusion Internationale (H. D. I.)

58, rue Jean-Bleuzen

92178 Vanves cedex, France

Téléphone : (1) 46 62 10 10

Télécopie : (1) 40 95 10 39 ou (1) 40 95 19 75

TÉLÉDÉTECTION APPLIQUÉE À LA CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE ET TOPOGRAPHIQUE

Quatrièmes journées scientifiques
du « Réseau Télédétection » de l'UREF,
Montréal, 21-23 octobre 1991

COMITÉ SCIENTIFIQUE ET DE LECTURE :

- Jean-Marie Dubois (coresponsable de l'édition)
- François Cavayas (coresponsable de l'édition)
- Pierre Lafrance (coresponsable de l'édition)
- Abdelkader Abdellaoui
- Régis Caloz
- Lise Charbonneau
- Robert Desjardins
- Marc G. Tanguay
- Diadié Traoré
- Fernand Verger

1993

Presses de l'Université du Québec
2875, boulevard Laurier
Sainte-Foy (Québec) Canada
G1V 2M3

AUPELF • UREF
B.P. 400, succ. Côte-des-Neiges
Montréal (Québec) Canada
H3S 2S7

Données de catalogage avant publication (Canada)

UREF, Réseau de télédétection. Journées scientifiques
(4^{es} : 1991 : Montréal, Québec)

Télédétection appliquée à la cartographie thématique
et topographique: actes des Journées scientifiques de
Montréal, 1991

(Universités francophones. Actualité scientifique)

Public. en collab. avec : AUPELF.

Comprend des réf. bibliogr.

4^{es} Journées scientifiques du Réseau de télédétection
de l'UREF.

ISBN 2-7605-0752-1

1. Télédétection – Congrès. 2. Cartographie – Télé-
détection – Congrès. 3. Cartes topographiques – Congrès.
I. Dubois, J. M. M. (Jean Marie Maurice), 1944- .
II. Cavayas, François, 1954- . III. Lafrance, Pierre.
IV. Titre. V. Collection.

G70.39.J67 1991

621.36'78

C94-940005-X

ISBN 2-7605-0752-1

*Tous droits de reproduction, de traduction
et d'adaptation réservés* © 1993
Presses de l'Université du Québec

Dépôt légal – 4^e trimestre 1993
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
Imprimé au Canada

Sommaire

Liste des participants et auteurs	XI
Introduction . Jean-Marie Dubois et François Cavayas	XIX

Partie I. Cartographie topographique, nivale et des milieux à fort relief

1

- 1. Traitement numérique des données multibandes HRV de SPOT appliqué à la cartographie des zones de végétation humide dans les régions à fort relief.** Laurence Caillon et Jacques Borzeix 3
- 2. Création d'une ortho-image à l'aide d'un modèle numérique d'altitude - Influences des modes de rééchantillonnage radiométrique.** Régis Caloz, Thomas J. Blaser et Guillemette Willemin 17
- 3. Le suivi par la télédétection des congères résiduelles de neige dans l'arctique canadien : le lien avec les accumulations annuelles.** Yves Crevier, James T. Gray, Claude Duguay, Bernard Lauriol et Henri Amyotte 31
- 4. La carte morphostructurale de l'Ituri oriental (nord-est du Zaïre) : étude à partir de données satellitaires TM de Landsat.** Mokili Mbuluyo, André Ozer et Johan Lavreau 41
- 5. Comparaison de différentes méthodes de rapports de bandes pour l'application de la télédétection satellitaire à la reconnaissance géomorphologique d'un milieu montagneux subarctique semi-aride.** Janine Somma et François Cavayas 55
- 6. Correction radiométrique sur les données satellitaires en zone de relief : modélisation et application.** Chongjun Yang, Urya Weesakul et Christian Puech 65

Partie II. Cartographie des ressources en eau

81

- 7. Cartographie des fractures d'un réservoir hydrogéologique en milieu volcanique à partir de données HRV de SPOT contrôlées sur le terrain (basaltes miocènes de Djibouti).** François Arthaud et Mohamed Jalludin 83

8. Les facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso : l'exemple de Pobé-Mengao. Samuel Nakolendousse, Alain Nindaoua Savadogo et A. Rouleau	95
9. Télédétection et aptitude au ruissellement des bassins versants en Afrique soudano-sahélienne. Christian Puech et Olivier Delahaye	109
10. Contribution de l'imagerie satellitaire à l'optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal. Luc Séguis, Hervé Chevillotte, Chantal Gascuel, Pascal Boivin et Érik Braudeau	129
Partie III. Cartographie des milieux dégradés	139
11. Cartographie et calcul de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et d'un SIG, cas du bassin versant d'oued Aricha (Settat, Maroc). Hassan Anys, Ferdinand Bonn et Abdelaziz Merzouk	141
12. Suivi par télédétection de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger). Salifou Karimoune, Jean Alexandre et André Ozer	151
13. Télédétection appliquée à la zone côtière et suivi de l'environnement côtier au Congo : cas de l'érosion dans les gorges de Diosso. Jean Tchicaya et Léonard Sitou	161
14. Télédétection par satellite et catastrophe écologique dans la région de Sudètes (Europe Centrale). Tomasz Zawila-Niedzwiecki	177
Partie IV. Cartographie de la végétation	185
15. Le graphique «binormalisé» : un outil d'étalonnage des indices de végétation - application aux cultures sahéliennes. Étienne Bartholomé	187
16. Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour une meilleure évaluation des formations végétales actives. Philippe Chamard, Marie-Françoise Courel, Michèle Ducouso, Marie-Claire Guénégo, Jeannine Le Rhun, Jacques-Édouard Levasseur, Catherine Loisel et Mémé Togola	203
17. Méthode de cartographie des systèmes de culture en région de petites exploitations du nord-est de l'Argentine. Isabelle Duvernoy, Christophe Albaladejo et Clorinda Perucca	211
18. Inventaire cartographique des ressources renouvelables du Burkina Faso par télédétection. Jacques Fontès et Sita Guinko	227
19. Utilisation du capteur aéroporté MEIS II pour l'évaluation des dommages causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Nouveau-Brunswick. Mario Hinse, Olga Dupont et Gilbert Fafard	239
20. Cartes écologiques de la végétation et télédétection satellitaire. Ève Janodet et François Blasco	247

21. Suivi par télédétection spatiale d'une forêt dense tropicale humide soumise à des pressions agricoles. Kouakou Édouard N'Guessan	263
22. Cartographie d'une forêt spécifique à partir de données satellitaires TM de Landsat et HRV de SPOT : la forêt alluviale de la Robertsau. Christiane Weber, Jacky Hirsch et Aziz Serradj	273
 Partie V. Méthodologies d'extraction des données cartographiques	 283
23. Traitement contextuel en post-classification pour l'élaboration d'une spatio-carte destinée à la gestion et à l'aménagement du territoire. Marc Binard et Bénédicte Collette	285
24. Cartographie thématique et structurale des substrats récifaux et lagunaires peu profonds par la télédétection satellitaire à haute résolution. Olivier Y. De Vel et William Bour	297
25. Un modèle bayésien de segmentation d'images. Vincent Granville, Jean Paul Rasson et Françoise Urban-Ferauge	305
26. Méthode d'établissement d'une nomenclature par la texture des zones d'une image. Abdelhamid Khodja	311
27. Le problème de l'échelle et de l'agrégation spatiale en télédétection. Danielle J. Marceau, Philip J. Howarth et Denis J. Gratton	321
28. Connexion directionnelle de contours. Jean-François Parrot et Hind Taud	335
29. Reconnaissance de formes appliquée aux systèmes dunaires. Hind Taud et Jean-François Parrot	345
30. Apport de l'imagerie satellitaire et d'un modèle numérique de terrain à l'étude géomorphologique de la dépression d'Aubel, Pays de Herve, Belgique. Luc Willems, Jean-Paul Donnay, Marc Binard, Philippe Trefois et André Ozer	355
 Compte rendu de la table ronde portant sur le thème « Télédétection et cartographie »	 361
31. Télédétection et cartographie. Goze Bertin Bénéié	363

Les collections « Universités francophones » de l'UREF : Un instrument vital pour l'évolution de l'espace scientifique francophone

L'Université des réseaux d'expression française (UREF) créée au sein de l'Association des universités partiellement ou entièrement de langue française (AUPELF) lors du Sommet des Chefs d'État et de Gouvernement des pays ayant en commun l'usage du français, à Québec, en 1987, a développé des collections de manuels et ouvrages scientifiques de haut niveau. Regroupées sous le nom « Universités francophones », ces collections sont les nouveaux outils de renforcement de l'espace scientifique en français, enjeu primordial pour l'avenir de la francophonie.

Dans le même temps, l'UREF a mis en place des réseaux thématiques de recherche, rassemblant de façon multilatérale plusieurs milliers d'enseignants et de chercheurs de toute la francophonie. À ce jour, 15 réseaux de recherche favorisent la production et l'échange d'information scientifique et technique dans les domaines, notamment, de la médecine, du droit et des sciences de la gestion, de l'environnement, de l'agronomie, de la télédétection, des sciences humaines.

La série « Actualité scientifique » dans laquelle s'inscrit le présent ouvrage, au sein d'« Universités francophones », est constituée des actes des colloques et journées scientifiques des réseaux de l'UREF. Elle accueille ainsi, en français, le bilan des travaux de recherche dans les domaines d'activités scientifiques de ces réseaux.

Une série de manuels universitaires ainsi qu'une série « Sciences en marche » constituée de monographies de recherche, complètent le dispositif éditorial de l'UREF qui comprend, par ailleurs, des revues scientifiques (les *Cahiers d'études et de recherches francophones* - deux titres : *Santé, Agriculture; Science et changements planétaires, Sécheresse*).

Nous comptons bien que ces instruments, qui sont mis à la disposition de nos partenaires des pays du Sud à un prix préférentiel, contribueront à la consolidation d'une francophonie scientifique soucieuse d'excellence et de rayonnement international.

Professeur Michel Guillou
Recteur de l'UREF

Liste des participants et auteurs

Abdellaoui, Abdelkader, M 229, cité Baïnem, 16060 Hammamat, Alger, Algérie

Albaladejo, Christophe, Unité de recherches sur les systèmes agraires et sur le développement, Centre de recherches de Toulouse, Institut national de la recherche agronomique, B.P. 27, 31326 Castanet Tolosan cedex, France

Alexandre, Jean, Géographie physique, Université de Liège, place du 20-Août, 7, B-4000 Liège, Belgique

Amyotte, Henri, Département de géographie, Université d'Ottawa, 165, rue Waller, Ottawa, Ontario, K1N 6N5, Canada

Anys, Hassan, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada

Arthaud, François, Laboratoire de géologie structurale appliquée (case 058), Département des sciences de la terre, Université des sciences et techniques du Languedoc (Montpellier II), Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 05, France

Audet, Hervé, Octographe inc., 1924, de la Station, Beauport, Québec, G1E 4M1, Canada

Azagoh-Kouadio, Marie-Christine, Département de géologie appliquée et télédétection, Institut d'écologie tropicale de Côte-d'Ivoire, 08 B.P. 109, Abidjan 08, Côte-d'Ivoire

Bannari, Abderrazak, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada

Bartholomé, Étienne, Institut des applications de la télédétection, Bâtiment 44, Centre commun de recherche, T.P. 440, I-21020 Ispra (Varese), Italie

Beaubien, Jean, Centre de foresterie des Laurentides, Forêts Canada, 1055, du P.E.P.S., Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7, Canada

Bélanger, Lyna, Hauts-Monts Recherche, 1924, de la Station, Beauport, Québec, G1E 4M1, Canada

- Bénié, Goze Bertin**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Benmouffok, Djilali**, Centre de recherches pour le développement international, 250, rue Albert, C.P. 8500, Ottawa, Ontario, K1G 3H9, Canada
- Benzineh, Saïd**, Centre national des techniques spatiales, 1, avenue de la Palestine, B.P. 13, Arzew 31200, Oran, Algérie
- Binard, Marc**, SURFACES, Séminaire de géographie, Université de Liège, place du 20-Août, 7, bâtiment A1, 4000 Liège, Belgique
- Blasco, François**, Institut de la carte internationale de la végétation, Université Paul-Sabatier (Toulouse III), 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France
- Blaser, Thomas J.**, Institut d'aménagement des terres et des eaux, École polytechnique fédérale de Lausanne, GR-Ecublens, CH-1015 Lausanne, Suisse
- Boivin, François**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Boivin, Pascal**, ORSTOM-Centre de Dakar, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar, Sénégal
- Bonn, Ferdinand**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Bordage, Daniel**, Service canadien de la faune, Environnement Canada, 1141, route de l'Église, C.P. 10100, Sainte-Foy, Québec, G1V 4H5, Canada
- Borzeix, Jacques**, Laboratoire d'acquisition et de traitement des données et d'images, Université française du Pacifique, B.P. 4635, Papeete, Polynésie française, France
- Bour, William**, Laboratoire de traitement d'images calédonien, ORSTOM, B.P. A5, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, France
- Bourcier, Alban**, Laboratoire de modélisation et traitements graphiques, Unité de recherche associée au C.N.R.S. 1351-Section 39, Université de Rouen Haute-Normandie, B.P. 108, 76134 Mont Saint Aignan cedex, France
- Boussema, Mohamed Rached**, Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Braudeau, Érik**, ORSTOM-Centre de Dakar, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar, Sénégal
- Bretteville, Jacques**, Direction générale, AUPELF-UREF, B.P. 400, succursale "Côte-des-Neiges", Montréal, Québec, H3S 2S7, Canada
- Caillon, Laurence**, Laboratoire d'acquisition et de traitement des données et d'images, Centre universitaire de Polynésie française, Université française du Pacifique, B.P. 6570, Faaa Aéroport, Tahiti, Polynésie française, France
- Caloz, Régis**, Institut d'aménagement des terres et des eaux, École polytechnique fédérale de Lausanne, GR-Ecublens, CH-1015 Lausanne, Suisse

- Cavayas, François**, Département de géographie, Université de Montréal, B.P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada
- Chakroun, Hédia**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Chalifoux, Stéphane**, Département de géographie, Université de Montréal, B.P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada
- Chamard, Philippe Claude**, Centre d'études géographiques sur l'Afrique noire, Université de Paris X-Nanterre, 200, avenue de la République, 92001 Nanterre cedex, France
- Charbonneau, Lise**, Service à la recherche, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Chesnais, Michel**, GEOSYCOM, Université de Caen, esplanade de la Paix, 14032 Caen cedex, France
- Chevillotte, Hervé**, ORSTOM-Centre de Dakar, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar, Sénégal
- Collette, Bénédicte**, Service universitaire de recherches fondamentales et appliquées en cartographie et en études spatiales, Séminaire de géographie, Faculté des sciences, Université de Liège, place du 20-Août, 7, bâtiment A1, 4000 Liège, Belgique
- Côté, Marie-Josée**, Département de géographie, Université de Montréal, B.P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada
- Courel, Marie-Françoise**, Imagéo (Laboratoire de recherche sur les images géographiques), L. P. 30, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France
- Crevier, Yves**, Département de géographie, Université d'Ottawa, 165, rue Waller, Ottawa, Ontario, K1N 6N5, Canada
- D'Iorio, Marc A.**, Centre canadien de télédétection, Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources du Canada, 2464, Chemin Sheffield, Ottawa, Ontario, K1A 0Y7, Canada
- de Vel, Olivier Yves**, Department of Computer Science, James Cook University, Townsville Q4811, Australie
- Dedieu, Jean-Pierre**, Laboratoire de la montagne alpine, Institut de géographie alpine, Université Joseph Fourier (Grenoble I), 15, rue Maurice Gignoux, 38031 Grenoble cedex, France
- Delahaye, Olivier**, Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 648, rue Jean-François Breton, B.P. 5093, 34033 Montpellier cedex 01, France
- Diakité, Cheick Hamallah**, Laboratoire de télé-analyse espace et société, Centre d'analyse et de mathématiques sociales, École des hautes études en sciences sociales, 54, boul. Raspail, 75006 Paris, France
- Dion, Linda**, Service de la comptabilité forestière, Ministère des Forêts du Québec, 5700, 4e avenue ouest, 3e étage, Bureau E-304, Charlesbourg, Québec, G1H 6R1, Canada
- Dombrowski, Alain**, Photosur Géomat (1991) inc., 5160, boulevard Décarie, bureau 300, Montréal, Québec, H3X 2H9, Canada

- Donnay, Jean-Paul**, SURFACES, Séminaire de géographie, Université de Liège, place du 20-Août, 7, 4000 Liège, Belgique
- Dubois, Jean-Marie**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Ducouso, Michèle**, Imagéo (Laboratoire de recherche sur les images géographiques), UPR-CNRS 30, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France
- Duguay, Claude**, Département de géographie, Université d'Ottawa, 165, rue Waller, Ottawa, Ontario, K1N 6N5, Canada
- Dupont, Olga**, Groupe de technologie forestière appliquée d'Edmunston, Centre universitaire Saint-Louis-Maillet, 160, boul. Hébert, Edmunston, Nouveau-Brunswick, E3V 2S8, Canada
- Duvernoy, Isabelle**, Unité de recherches sur les systèmes agraires et sur le développement, Centre de recherches de Toulouse, Institut national de la recherche agronomique, B.P. 27, 31326 Castanet-Tolosan cedex, France
- El Hadani, Driss**, Centre royal de télédétection spatiale, 16 bis, Avenue de France, Agdal, Rabat, Maroc
- Fafard, Gilbert**, Groupe de technologie forestière appliquée d'Edmunston, Centre universitaire Saint-Louis-Maillet, Université de Moncton, 165, boul. Hébert, Edmunston, Nouveau-Brunswick, E3V 2S8, Canada
- Fiset, Robert**, Département de géographie, Université de Montréal, B.P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada
- Fontès, Jacques**, Université Paul-Sabatier (Toulouse III), 39, Allées Jules Guesde, 31062 Toulouse cedex, France
- Fortier, Jean-Jacques**, LFD Informatique inc., 1800, rue Berlier, bureau 410, Laval, Québec, H7L 4S4, Canada
- Gagnon, Paul**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Gascuel, Chantal**, ORSTOM-Centre de Dakar, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar, Sénégal
- Gauthier, Éric**, Gendron Leburne Consultants, 1, place Laval, bureau 200, Laval, Québec, H7N 1A1, Canada
- Goossens, Els**, Laboratoire de télédétection, Faculté d'agriculture, Université de Gand, 9000 Gent, Belgique
- Granville, Vincent**, Département de mathématique, Facultés universitaires Notre-Dame-de-la-Paix, rue de Bruxelles, 61, B-5000 Namur, Belgique
- Gratton, Denis J.**, Département de géographie, Université du Québec à Trois-Rivières, B.P. 500, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada
- Gray, James T.**, Département de géographie, Université de Montréal, B.P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada

- Grenier, Marcelle**, Service canadien de la faune, Environnement Canada, 1141, route de l'Église, C.P. 10100, Sainte-Foy, Québec, G1V 4H5, Canada
- Guénégo, Marie-Claire**, Laboratoire de botanique, Université de Rennes I, Bât. 14, campus Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France
- Guinko, Sita**, Institut du développement rural, Université de Ouagadougou, B.P. 7021, Ouagadougou, Burkina Faso
- Hinse, Mario**, Centre de télédétection du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, 1995, boul. Charest Ouest, Québec, Québec, G1N 4H9, Canada
- Hirsch, Jacky**, Laboratoire dynamique des espaces géographiques : processus, cartographie, images, URA 902, Institut de géographie, Université Louis Pasteur (Strasbourg I), 12, rue Goethe, 67000 Strasbourg, France
- Howarth, Philip J.**, Department of geography, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, N2L 3G1, Canada
- Jalludin, Mohamed**, Institut supérieur d'études et de recherches scientifiques et techniques, B.P. : 486 - Djibouti, Djibouti, République de Djibouti
- Janodet, Ève**, Institut de la carte internationale de la végétation, Université Paul-Sabatier (Toulouse III), 39, Allées Jules Guesde, 31062 Toulouse cedex, France
- Kane, Racine**, Centre de suivi écologique, Ministère du Développement rural et de l'Hydraulique, Projet SEN/84/X09, CSE, B.P. 154, PNUD, Dakar, Sénégal
- Karimoune, Salifou**, Géographie physique, Université de Liège, place du 20-Août, 7, 4000 Liège, Belgique
- Khodja, Abdelhamid**, Laboratoire de télé-analyse espace et société, Centre d'analyse et de mathématiques sociales, École des hautes études en sciences sociales, 54, boul. Raspail, 75006 Paris, France
- Lafrance, Pierre**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Larouche, Pierre**, Institut Maurice-Lamontagne, Ministère des Pêches et des Océans, B.P. 1000, Mont-Joli, Québec, G5H 3Z4, Canada
- Lataille, Stephan**, Département de géographie, Université de Montréal, B.P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada
- Lauriol, Bernard**, Département de géographie, Faculté des arts, Université d'Ottawa, C.P. 450, succursale "A", Ottawa, Ontario, K1N 6N5, Canada
- Lavallée, Daniel**, Earth space research group, University of California, 5276, Hollister Ave., #260, Santa Barbara, CA 93111, États-Unis
- Lavreau, Johan**, Laboratoire de télédétection, Musée royal de l'Afrique centrale, Chaussée de Louvain, B-3080 Tervuren, Belgique
- Le Rhun, Jeannine**, Imagéo (Laboratoire de recherche sur les images géographiques), L. P. 30, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France
- Levasseur, Jacques-Édouard**, Laboratoire de botanique, Université de Rennes I, Bâtiment 14, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France

- Loisel, Catherine**, École nationale d'ingénieurs des techniques des industries agricoles alimentaires, Chemin de la Géraudière, F44000 Nantes, France
- Mabi, Djoda**, CPCME de Nkolbisson, Office national de développement des forêts, Ministère de l'Environnement et des Forêts du Cameroun, B.P. 1341, Yaoundé, Cameroun
- Marceau, Danielle J.**, Département de géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada
- Masson, Pascale**, 31, rue Gazah, 75014 Paris, France
- Mbaye, E. Moustaph**, École polytechnique de Thiès, B.P. 10, Thiès, Sénégal
- Mbuluyo, Mokili**, Laboratoire de géomorphologie tropicale, Université de Liège, place du 20-Août, 7, 4000 Liège, Belgique
- Merzouk, Abdelaziz**, Département des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, Rabat-Institut, Maroc
- Méthot, Jocelyne**, Bureau Amérique du Nord, AUPELF-UREF, B.P. 400, succursale "Côte-des-Neiges", Montréal, Québec, H3S 2S7, Canada
- Mokadem, Abdel-Ilah**, Laboratoire de télédétection et d'agrohydrologie, Unité de recherche TelsatII/01, Unité d'hydraulique agricole et de télédétection, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, 2, passage des Déportés, 5030 Gembloux, Belgique
- Morin, Suzanne**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- N'Guessan, Kouakou Édouard**, Département de botanique, Faculté des sciences et techniques, Université nationale de Côte-d'Ivoire, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte-d'Ivoire
- Nakolendousse, Samuel**, Institut des sciences de la nature, Université de Ouagadougou, 03 B.P. 7021, Ouagadougou, Burkina Faso
- Noël, Jacques**, ORSTOM-Direction générale, 213, rue La Fayette, 75480 Paris cedex 10, France
- Orban-Ferauge, Françoise**, Département de géographie, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rue de Bruxelles, 61, 5000 Namur, Belgique
- Ozer, André**, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Université de Liège, place du 20-Août, 7, B-4000 Liège, Belgique
- Pagé, Pierre P.**, Bureau Amérique du Nord, AUPELF-UREF, B.P. 400, succursale "Côte-des-Neiges", Montréal, Québec, H3S 2S7, Canada
- Parrot, Jean-François**, Laboratoire de géologie géomorphologie structurale et télédétection, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Tour 26, 1er étage, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France
- Perakis, Konstantinos**, Laboratory of Remote Sensing/Applications in Agriculture, Aristotelian University of Thessaloniki, G.R. 54006, Thessaloniki, Grèce
- Pérez, Jesús**, 63, rue de la Faourette, app. 890, 31100 Toulouse, France
- Perucca, Clorinda**, Centro regional de Misiones, Instituto nacional de tecnología agropecuaria, Belgrano 540 3000 Posadas, Provincia de Misiones, Argentine

- Poirier, Sylvain**, Société de recherche SNC inc., 5160, boulevard Décarie, bureau 300, Montréal, Québec, H3X 2H9, Canada
- Pouliot, Gilbert**, Géosat-télétection inc., 6700, avenue du Parc, bureau 110, Montréal, Québec, H2V 4H9, Canada
- Provencher, Léo**, Département de géographie et télétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Puech, Christian**, Laboratoire commun de télétection CEMAGREF-ENGREF, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 361, rue Jean-François Breton, B.P. 5095, 34033 Montpellier cedex 01, France
- Puyou-Lascassies, Philippe**, École supérieure d'agriculture de Purpan, 75, voie du TOEC, 31076 Toulouse cedex, France
- Rasolomanana, Eddy Harilala**, Observatoire d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, B.P. 3843, Antananarivo 101, Madagascar
- Rasson, Jean-Paul**, Département de mathématiques, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, 8, Rempart de la Vierge, 5000 Namur, Belgique
- Rochon, Guy**, Photosur Géomat (1991) inc., 5160, boulevard Décarie, bureau 300, Montréal, Québec, H3X 2H9, Canada
- Rouleau, A.**, Centre d'études sur les substances minérales, Université du Québec à Chicoutimi, 555, boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, G7H 2B1, Canada
- Savado, Alain Nindaoua**, Institut des sciences de la nature, Université de Ouagadougou, 03 B.P. 7021, Ouagadougou 03, Burkina Faso
- Séguis, Luc**, ORSTOM-Centre de Dakar, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar, Sénégal
- Serradj, Aziz**, Laboratoire dynamique des espaces géographiques : processus, cartographie, images, URA 902, Institut de géographie, Université Louis Pasteur (Strasbourg I), 12, rue Goethe, 67000 Strasbourg, France
- Sitou, Léonard**, Laboratoire de géographie physique, Département de géographie, Université Marien Ngouabi, B.P. 2642, Brazzaville, Congo
- Somma, Janine**, Département de géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada
- Steffensen, Roberto**, Geostudio Consultants Limited, 525, St-Laurent #24, Ottawa, Ontario, K1K 2Z9, Canada
- Tamru, Bezounesh**, Centre d'analyse et de mathématiques sociales, École des hautes études en sciences sociales, 54, boul. Raspail, 75006 Paris, France
- Tanguay, Marc G.**, Département de génie minéral, École polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3A7, Canada
- Taud, Hind**, Laboratoire de géologie, géomorphologie structurale et télétection, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Tour 26, 1^{er} étage, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

- Tchicaya, Jean**, Laboratoire de photogrammétrie et de télédétection, Centre de recherche géographique et de production cartographique, B.P. 125, Brazzaville, Congo
- Thibault, Benoît**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Togola, Mémé**, Institut d'économie rurale, B.P. 258, Bamako, Mali
- Traore, Diadié**, Ministère des Travaux publics, de l'Urbanisme et de la Construction du Mali, B.P. 78, Bamako, Mali
- Trefois, Philippe**, Département de géologie, Musée royal de l'Afrique centrale, Chaussée de Louvain, 13, B 3080 Tervuren, Belgique
- Verger, Fernand**, École normale supérieure, 45, rue d'Ulm, F-75005 Paris, France
- Veron, Bertrand**, Département de géographie, Université de Caen, Esplanade de la Paix, 14032 Caen cedex, France
- Vigneau, Claire**, Institut Maurice-Lamontagne, Ministère des Pêches et des Océans, 850, route de la Mer, Mont-Joli, Québec, G5H 3Z4, Canada
- Vincent, Pierre**, Viasat géo-technologie inc., 419, boul. Rosemont, bureau 301, Montréal, Québec, H2S 1Z2, Canada
- Weber, Christiane**, Laboratoire dynamique des espaces géographiques : processus, cartographie, images, URA 902, Institut de géographie, Université Louis Pasteur (Strasbourg I), 12, rue Goethe, 67000 Strasbourg, France
- Weesakul, Uruya**, Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 648, rue Jean-François Breton, B.P. 5093, 34033 Montpellier cedex 01, France
- Willemin Mallet, Guillemette**, Institut d'aménagement des terres et des eaux, Département de génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, GR - Ecublens, CH - 1015 Lausanne, Suisse
- Willems, Luc**, Université de Niamey, B.P. 10963, Niamey, Niger
- Yang, Chong Jun**, SIMA géographes conseils ltée, 405, Saint-Dizier, Montréal, Québec, Canada
- Yergeau, Michel**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boul. Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Zawila-Niedzwiecki, Tomasz**, Centre polonais de télédétection, Instytut geodezji i kartografii, ul. Jasna 2/4, 00-950 Warszawa, Pologne

Introduction

Le « Réseau Télédétection » de l'UREF a maintenant trois ans d'existence et il en est déjà à ses quatrièmes journées scientifiques. Toutes ces journées ont été un succès, que ce soit celles sur les bilans régionaux et thématiques en Francophonie (Sherbrooke, 1988), les apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse (Thiès, 1989), ou les outils micro-informatiques et la télédétection de l'évolution des milieux (Toulouse, 1990) et maintenant celles de Montréal (1991). On peut vraiment affirmer, avec cette activité en plus de celles de la recherche partagée, de la formation et de l'information scientifique et technique, que le Réseau Télédétection se constitue rapidement au sein de l'UREF.

Les journées scientifiques de Montréal ont attiré une centaine de personnes de 18 pays différents, et on y a présenté 23 communications orales, 24 communications par affiche et une table ronde. Les textes de 31 de ces communications se retrouvent dans les actes.

Le thème des journées scientifiques de Montréal, « Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique », a été choisi parce qu'il constituait une suite logique à celui des journées de Toulouse sur les outils micro-informatiques. En effet, les images de télédétection constituent un des moyens les plus puissants pour acquérir une foule de données sur les ressources terrestres et l'environnement dans un court laps de temps et d'une façon économique. L'apport de ces données est considérable dans des domaines où la carte constitue le moyen par excellence pour présenter une ou plusieurs facettes du monde qui nous entoure.

Les applications des images de télédétection dans le domaine de la cartographie ne se limitent pas à l'élaboration des cartes de base et thématiques traditionnelles avec une plus grande précision, mais provoquent une véritable révolution dans la façon de concevoir les cartes et permettent d'élargir considérablement la thématique même de ces cartes. La représentation de cette thématique peut se faire à des échelles allant de l'échelle planétaire à l'échelle d'une parcelle agricole.

Deux sujets complémentaires ont été choisis pour les journées scientifiques. Le premier, plus « scientifique », traite de l'analyse du potentiel des images pour l'élaboration des cartes et pour la conception de nouveaux types de cartes. Il s'agit là de motivations scientifiques majeures qui intéressent de nombreux laboratoires et tous ceux qui utilisent la carte pour la prise de décisions et la gestion concernant les ressources terrestres et l'environnement. Le deuxième, plus « technique », traite des procédés d'extraction de l'information cartographique des images et d'intégration de cette information dans des systèmes de cartographie numérique ou des systèmes d'information géographique. Ce deuxième sujet préoccupe, pour sa part, ceux qui désirent créer des environnements informatiques leur permettant, d'une façon efficace et économique, de mettre en commun les acquis de la télédétection et de la cartographie numérique dans le but de mieux connaître les milieux terrestres et de mieux suivre leur évolution.

Les journées scientifiques de Montréal ont ainsi permis aux chercheurs de présenter des méthodes originales d'extraction de l'information cartographique des images de télédétection, de présenter des études de cas de milieux différents et de faire le point sur le développement de procédés et de produits cartographiques utiles, ce dont rendent compte les actes.

Les actes des journées scientifiques de Montréal sont divisés en six sections : 1) six articles portent sur la cartographie topographique, nivale et des milieux à fort relief, 2) quatre articles sur la cartographie des ressources en eau, 3) quatre articles sur la cartographie des milieux dégradés, 4) huit articles sur la cartographie de la végétation, 5) huit articles sur les méthodologies d'extraction des données cartographiques et 6) un compte rendu de la table ronde sur le thème de « Télédétection et cartographie ».

La série des journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'UREF se poursuivra, après une année de pause, en 1993 avec celles de Tunis, qui porteront sur la télédétection et les ressources en eau.

JEAN-MARIE M. DUBOIS

Université de Sherbrooke

Coordonnateur du Réseau Télédétection de l'UREF

FRANÇOIS CAVAYAS

Université de Montréal

Responsable des journées scientifiques de Montréal

PIERRE LAFRANCE

Université de Sherbrooke

Responsable de l'édition des actes

PARTIE I

Cartographie topographique, nivale et des milieux à fort relief

1

Traitement numérique des données multibandes HRV de SPOT appliqué à la cartographie des zones de végétation humide dans les régions à fort relief

LAURENCE CAILLON et JACQUES BORZEIX

Laboratoire d'acquisition et de traitement des données et d'images, Université française du Pacifique, B.P. 6570, Faaa-aéroport, Tahiti, Polynésie française; téléphone : (689) 803-813; télécopieur : (689) 803-804

Résumé

Cette étude a été menée sur des îles volcaniques de l'archipel des Gambier en Polynésie française. Le traitement numérique mis au point comporte trois étapes principales : 1) les variations de la luminance sont étudiées d'après les valeurs numériques brutes enregistrées dans les trois canaux XS1, XS2 et XS3 de HRV de SPOT sur une série de zones-tests; 2) trois fonctions linéaires de rehaussement sont appliquées aux données brutes et donnent XS1', XS2' et XS3'; elles sont calculées de façon à obtenir des valeurs de (XS1'-XS2') et (XS1'-XS3') peu influencées par les conditions géométriques d'éclairage et d'enregistrement, indépendantes de la nature du couvert végétal (arbres ou graminées) et caractéristiques de l'état de la végétation (humide, chlorosé, dense ou normal); 3) la classe «végétation humide» est extraite grâce à une analyse par minimum des valeurs numériques entre pixels correspondants sur les images (XS1'-XS2') et (XS1'-XS3') étalées linéairement de 0 à 255. Cette classification, qui peut être rapidement développée à partir des principaux logiciels de traitement d'images existant sur le marché, trouve deux types d'application dans la détermination des zones les plus favorables à l'implantation des captages d'eau et la localisation des gîtes potentiels de moustiques à traiter dans la lutte contre les épidémies de dengue.

1. Introduction

Sur les îles hautes de Polynésie française au relief très accentué, les cartographies d'après les données multibandes HRV du satellite SPOT sont fortement perturbées par les contrastes de luminance associés aux conditions géométriques d'enregistrement et d'éclairement. Nous avons recherché un traitement numérique permettant d'une part, d'atténuer ces contrastes et d'autre part, de localiser les zones humides d'après certains aspects de la couverture végétale.

2. Zone d'étude et acquisition des données

La zone d'étude correspond à l'île d'Akamaru, dans l'archipel des Gambier situé à l'extrémité SE de la Polynésie française (fig. 1). Les seuls documents disponibles sur cet archipel sont les cartes marines du Service hydrographique et océanographique de la marine (S.H.O.M., 1974).

L'île d'Akamaru a une superficie de 2 km², pour une altitude maximale de 246 m (fig. 2). De hautes graminées recouvrent les pentes, qui peuvent atteindre 45°, alors que des cocoteraies mêlées d'arbres fruitiers occupent les terrains moins accidentés en bordure des baies. Les parois rocheuses, principalement constituées de tholéïites (BROUSSE, 1974), sont rares et leur hauteur n'excède pas une dizaine de mètres.

L'image multibande sur les Gambier a été acquise au début de la saison sèche par le capteur HRV de SPOT 1 le 14 mai 1989 à 19 h 08 min 47 s TU (10 h 19 min 47 s heure locale), en mode XSP (fig. 1-3, voir cahier couleur). L'azimut et la hauteur solaires étaient respectivement de 34,5° et 41°. Nous avons travaillé sur des données ayant subi le prétraitement de niveau 1B : égalisation radiométrique des détecteurs, correction géométrique de la rotation de la terre et du système de balayage. Les documents issus du traitement sont présentés avec un masque sur le lagon, obtenu par seuillage bas sur le canal XS3.

3. Traitement numérique

3.1. Sélection des zones-tests

Plusieurs aspects du sol et de la végétation, sous des conditions d'éclairement différentes, ont été étudiés sur onze zones, aisément repérables sur le terrain et sur les documents HRV par rapport aux éléments marquants du relief et du littoral. Ces zones correspondent à une surface d'au moins 10 000 m² où la végétation présente un aspect homogène. La moyenne arithmétique des comptes numériques est calculée dans les trois canaux sur les pixels de chaque zone; la valeur obtenue est considérée comme représentative de la zone si la variance est inférieure à 2.

Quatre parcelles recouvrent les deux grands types de végétation (graminées et arbres), éclairées sous un angle d'incidence solaire i égal à 10° (versants orientés au NNE) et à 80° (versants orientés au SSO). Les deux valeurs de i ont été choisies de façon à obtenir les plus fortes variations de luminance liées aux effets de relief (HUGLI and FREI, 1983). Les pentes très fortes qui ne sont pas directement éclairées par le soleil, ainsi que la zone couverte par leur ombre portée, n'ont pas été traitées en raison de leur surface extrêmement réduite. Les différents aspects de la végétation (humide, chlorosé, dense ou normal) ont été étudiés sur sept autres parcelles reconnues en terrain pratiquement horizontal (KOCH *et al.*, 1990; DEMETRIADES-SHAH and STEVEN, 1988).

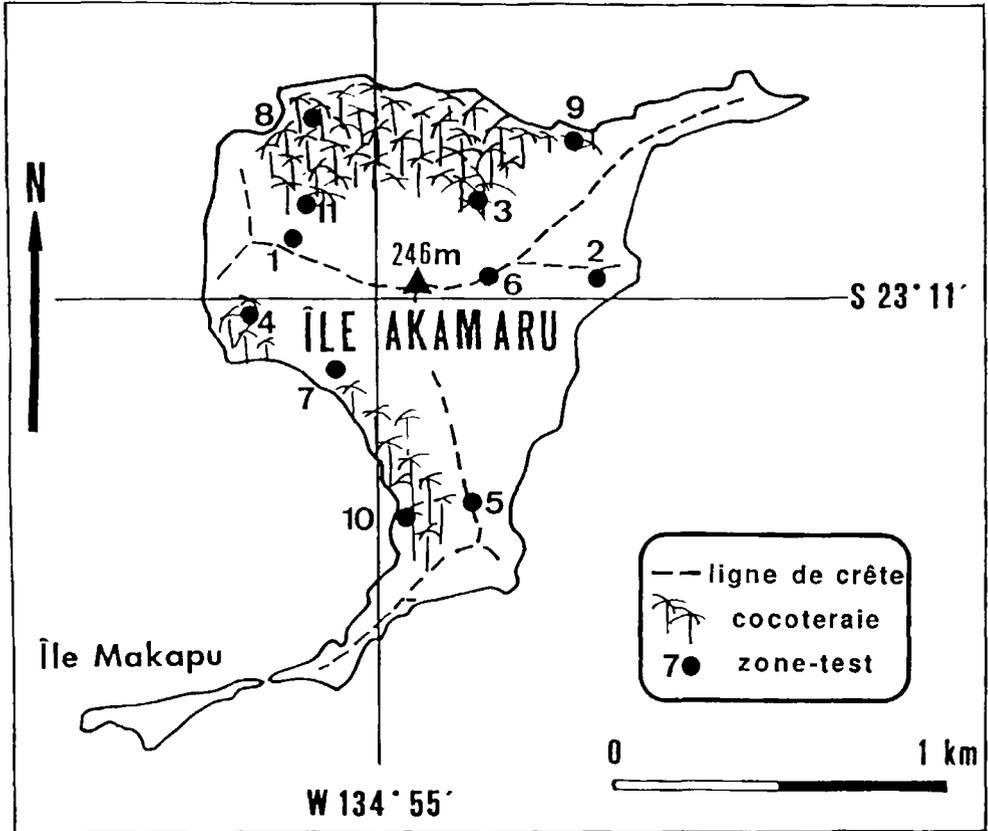


Figure 2. Carte détaillée de la zone d'étude et localisation des zones-tests (d'après la carte 6462 du S.H.O.M.)

3.2. Recherche sur les données brutes

L'étude débute par une analyse des valeurs numériques de la luminance XS1, XS2 et XS3 enregistrées dans les trois canaux sur chaque parcelle (tab. I). Les figures 4, 5 et 6 représentent les valeurs obtenues pour les onze zones-tests dans les canaux pris deux à deux. Elles permettent ainsi de mettre en évidence les différences XS1-XS2, XS3-XS2 et XS3-XS1 qui sont classiquement à la base des recherches de traitement numérique destiné aux études sur la végétation (THOMSON and JONES, 1990).

Les variations de la luminance en fonction des conditions géométriques d'éclairément et d'enregistrement et suivant le type de végétation sont sensiblement équivalentes sur XS1 et XS2. La différence XS1-XS2 est donc peu influencée par l'orientation des pentes et la distinction arbres-graminées (fig. 4a). Elle présente ses valeurs numériques les plus élevées dans le cas d'une végétation humide où l'abondance des pigments chlorophylliens provoque une augmentation des réflexions dans XS1 et des absorptions dans XS2 (fig. 4b).

Le canal XS3 étant caractérisé par de fortes variations de luminance en fonction de l'exposition des versants et de la densité du couvert végétal, les différences XS3-XS2 et XS3-XS1 sont plus difficiles à utiliser (fig. 5a et 6a). Elles ont toutefois l'avantage d'établir une

Tableau I. Valeurs numériques de la luminance enregistrée dans XS1, XS2 et XS3 sur les zones-tests

Zone fig. 2	Symbole fig. 4 à 11	Description de la végétation	Exposition du terrain	XS1	XS2	XS3
1	gra*	graminées	versant NNE	55	45	64
2	gra°	graminées	versant SSW	36	24	28
3	arb*	arbres	versant NNE	39	24	89
4	arb°	arbres	versant SSW	29	19	61
5	gra	graminées	terrain plat	44	33	44
6	gra C	graminées chlorosées	terrain plat	22	18	26
7	gra H	graminées humides	terrain plat	47	25	28
8	arb	arbres	terrain plat	34	21	75
9	arb C	arbres chlorosés	terrain plat	22	23	81
10	arb H	arbres humides	terrain plat	50	25	67
11	coc D	cocoteraie dense	terrain plat	32	15	78

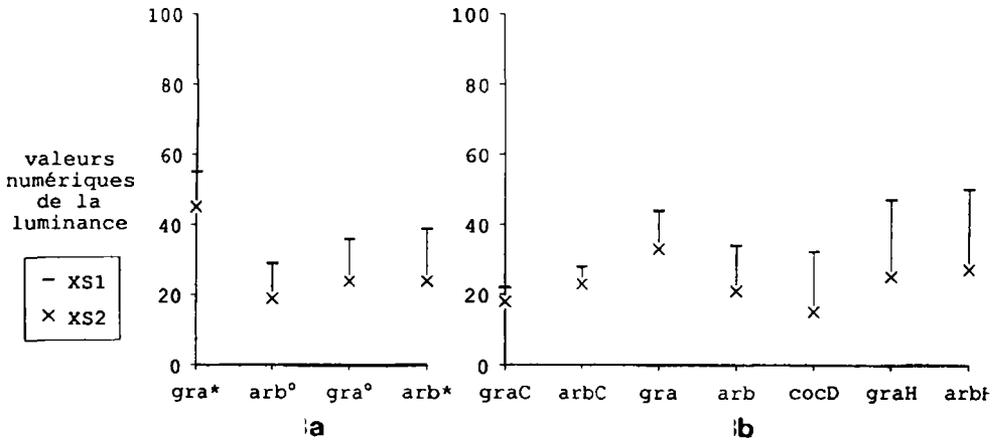


Figure 4. Valeurs numériques de la luminance enregistrées dans les canaux XS1 et XS2; a) étude de l'influence de l'orientation des versants et de la distinction arbres-graminées; b) étude de l'influence de l'état de la végétation en terrain horizontal (les valeurs numériques en ordonnée et la signification des symboles en abscisse se trouvent sur le tableau I; les bâtonnets font apparaître les différences XS1-XS2 classées par ordre de valeurs numériques croissantes)

distinction marquée entre végétation humide et végétation de même type mais d'aspect chlorosé, normal ou dense (fig. 5b et 6b). Cette distinction est particulièrement nette quand des absorptions intenses sur les molécules d'eau dans XS3 se combinent à de fortes réflexions sur les pigments chlorophylliens dans XS1 pour donner des valeurs de XS3-XS1 très faibles (TUCKER, 1980).

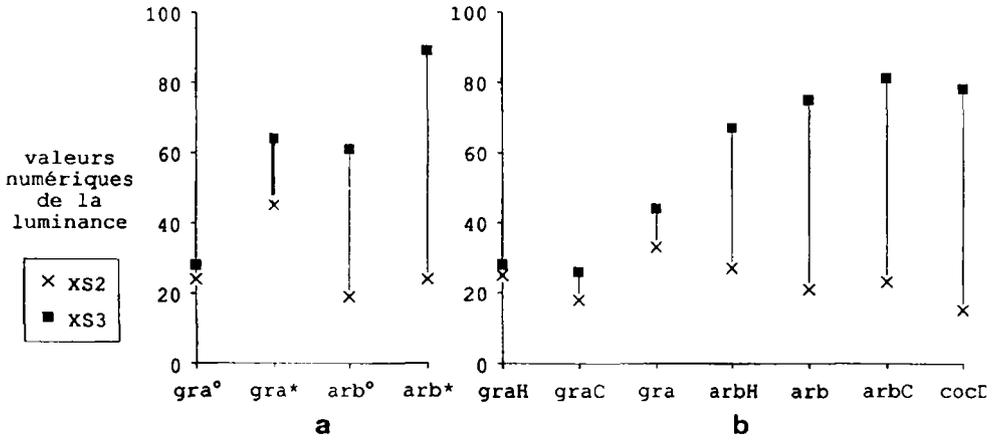


Figure 5. Valeurs numériques de la luminance enregistrées dans les canaux XS2 et XS3; a) étude de l'influence de l'orientation des versants et de la distinction arbres-graminées; b) étude de l'influence de l'état de la végétation en terrain horizontal (les valeurs numériques en ordonnée et la signification des symboles en abscisse se trouvent sur le tableau I; les bâtonnets font apparaître les différences XS3-XS2 classées par ordre de valeurs numériques croissantes)

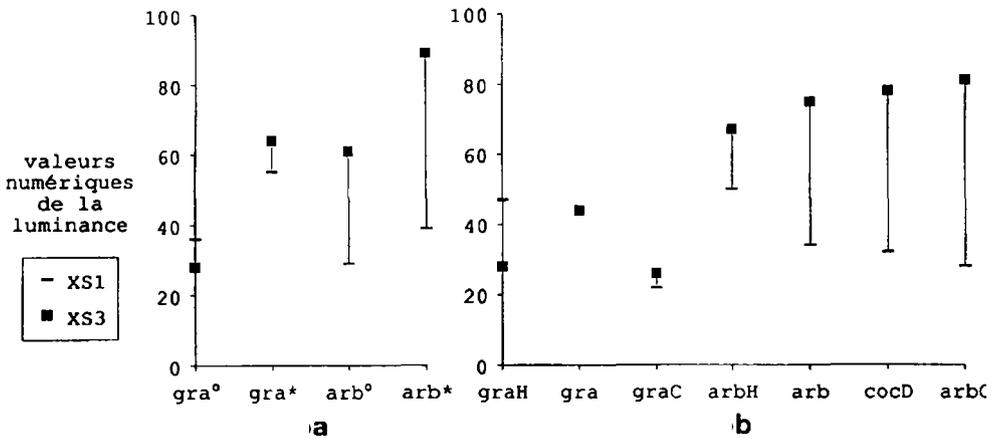


Figure 6. Valeurs numériques de la luminance enregistrées dans les canaux XS1 et XS3; a) étude de l'influence de l'orientation des versants et de la distinction arbres-graminées; b) étude de l'influence de l'état de la végétation en terrain horizontal (les valeurs numériques en ordonnée et la signification des symboles en abscisse se trouvent sur le tableau I; les bâtonnets font apparaître les différences XS3-XS1 classées par ordre de valeurs numériques croissantes)

Nous utiliserons donc pour la suite du traitement XS1-XS2, peu sensible à l'orientation des versants et à la nature du couvert végétal, et XS3-XS1, qui présente les plus forts contrastes entre végétation humide et non humide.

3.3. Rehaussement sur les données brutes

Des fonctions de transfert sont appliquées sur les données brutes des trois canaux :

$$XS1' = a XS1 + l \quad (1)$$

$$XS2' = b XS2 + m \quad (2)$$

$$XS3' = c XS3 + n \quad (3)$$

Les coefficients des trois fonctions sont calculés de façon à obtenir sur les différences XS1'-XS2' et XS3'-XS1' une correction sur les effets de relief, une atténuation du contraste arbres-graminées et une bonne individualisation de la végétation humide.

Nous avons vu que l'opération XS1-XS2 calculée sur les données brutes fournissait une approche satisfaisante des deux corrections recherchées. Les fonctions de transfert appliquées aux canaux XS1 et XS2 doivent simplement accentuer les contrastes de valeurs numériques déjà existants entre végétation humide et non humide; elles auront donc des pentes égales et maximales. Pour cela, les valeurs numériques du canal XS1 comprises entre 18 et 66 sont étalées linéairement de 0 à 255. Ce rehaussement correspond à la fonction (1) suivante (fig. 7) :

$$XS1' = 5,3 XS1 - 95 \quad (4)$$

Sur le canal XS2, les valeurs numériques sont comprises entre 10 et 48. La pente de la fonction de transfert est la même que celle de la fonction (4) : $a = b = 5,3$. La valeur du

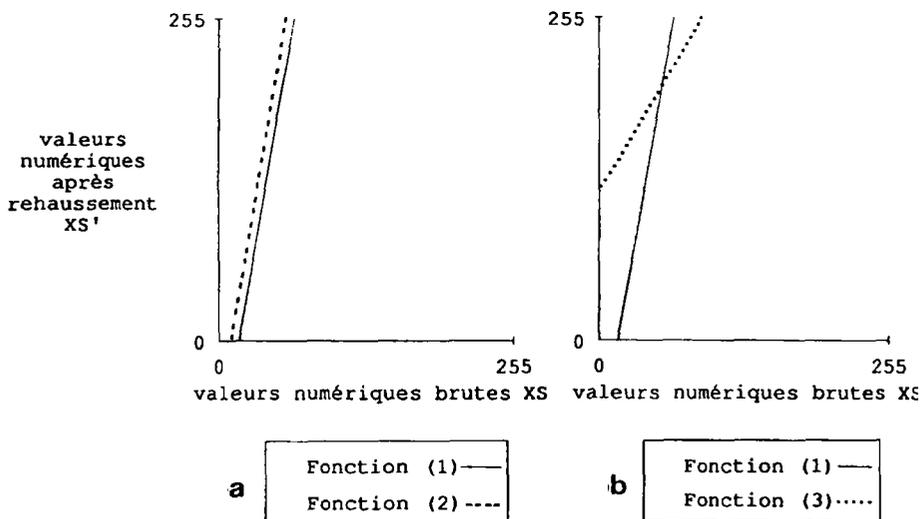


Figure 7. Fonctions de transfert appliquées aux valeurs numériques brutes de la luminance; a) fonctions appliquées aux canaux XS1 et XS2 : fonction (1) : $XS1' = 5,3 XS1 - 95$, fonction (2) : $XS2' = 5,3 XS2 - 53$; b) fonctions appliquées aux canaux XS1 et XS3 : fonction (1) : $XS1' = 5,3 XS1 - 95$, fonction (3) : $XS3' = 1,5 XS3 + 120$

coefficient m est calculée d'après le minimum des données brutes en prenant $XS2' = 0$ pour $XS2 = 10$. La fonction (2) peut s'écrire :

$$XS2' = 5,3 XS2 - 53. \quad (5)$$

Les coefficients de la fonction (3) peuvent être obtenus grâce aux relations suivantes (la signification des symboles utilisés se trouve sur le tableau I) :

- recherche de la correction sur les effets de relief :

$$(XS3' - XS1')_{gra*} = (XS3' - XS1')_{gra^\circ} \quad (6)$$

$$(XS3' - XS1')_{arb*} = (XS3' - XS1')_{arb^\circ} \quad (7)$$

- recherche de la correction sur le contraste arbres-graminées :

$$(XS3' - XS1')_{arb} = (XS3' - XS1')_{gra} \quad (8)$$

$$(XS3' - XS1')_{arbH} = (XS3' - XS1')_{graH} \quad (9)$$

- individualisation de la végétation humide :

$$(XS3' - XS1')_{arbH, graH} \neq (XS3' - XS1')_{arb, gra} \quad (10)$$

Pour chaque type de végétation, on peut écrire :

$$XS3' - XS1' = c XS3 - a XS1 + (n-l) \quad (11)$$

La pente c de la fonction (3) est alors extraite des relations ci-dessus en prenant pour $XS3$ et $XS1$, les données du tableau I et pour a , la valeur précédemment déterminée. Les relations (6) et (7) donnent c voisin de 2,5 et les relations (8) et (9), de 0,5. On retiendra le chiffre intermédiaire de 1,5. Les valeurs numériques brutes du canal $XS3$ s'étalent de 5 à 90; le coefficient n est calculé en prenant $XS3' = 255$ pour $XS3 = 90$. La fonction (3) devient alors :

$$XS3' = 1,5 XS3 + 120 \quad (12)$$

La relation (10) permet de vérifier la validité des valeurs retenues pour c et n dans le cadre d'une recherche des zones de végétation humide.

3.4. Soustraction sur les valeurs rehaussées

Des facteurs de normalisation P et D sont introduits dans l'opération afin d'éviter les débordements de valeurs :

$$(XS1' - XS2') = \frac{XS1' - XS2'}{P} + D \quad \text{avec } P = 2 \text{ et } D = 128$$

$$(XS3' - XS1') = \frac{XS3' - XS1'}{P} + D \quad \text{avec } P = 2 \text{ et } D = 128$$

Les figures 8 et 9 permettent de comparer les valeurs de $(XS1' - XS2')$ et $(XS3' - XS1')$, calculées après rehaussement, et celles de $(XS1 - XS2)$ et $(XS3 - XS1)$, issues des données brutes. L'influence des conditions d'éclairement et de la nature du couvert végétal est étudiée sur la première série de zones-tests (fig. 8a et 9a), celle de la distinction entre végétation humide et végétation chlorosée, normale ou dense, sur la deuxième série de zones-tests toutes situées en terrain horizontal (fig. 8b et 9b).

Sur $(XS1' - XS2')$, on constate une bonne atténuation des contrastes liés aux différences d'éclairement sur les reliefs (fig. 8a). La classification de la végétation se fait en fonction de

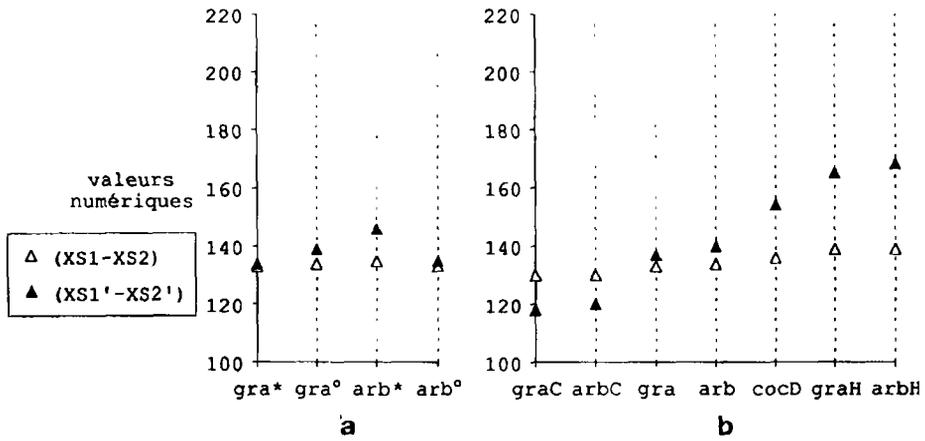


Figure 8. Comparaison entre les différences (XS1-XS2) calculées sur les valeurs numériques brutes et les différences (XS1'-XS2') calculées sur les valeurs numériques rehaussées; a) étude de l'influence de l'orientation des versants et de la distinction arbres-graminées; b) étude de l'influence de l'état de la végétation en terrain horizontal (les fonctions de rehaussement sont les suivantes : XS1' = 5,3 XS1 - 95 et XS2' = 5,3 XS2 - 53)

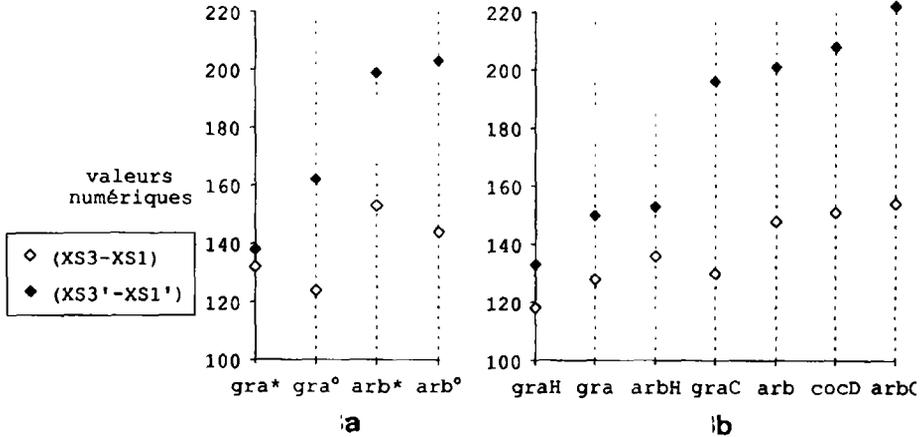


Figure 9. Comparaison entre les différences (XS3-XS1) calculées sur les valeurs numériques brutes et les différences (XS3'-XS1') calculées sur les valeurs numériques rehaussées; a) étude de l'influence de l'orientation des versants et de la distinction arbres-graminées; b) étude de l'influence de l'état de la végétation en terrain horizontal (les fonctions de rehaussement sont les suivantes : XS1' = 5,3 XS1 - 95 et XS3' = 1,5 XS3 + 120)

son état et indépendamment de sa nature; les graminées et les arbres humides correspondent aux plus fortes valeurs numériques (fig. 8b).

Sur (XS3'-XS1'), la correction des effets de relief est moins bonne (fig. 9a). Mais la végétation humide est maintenant regroupée dans les faibles valeurs numériques (fig. 9b).

3.5. Étalement linéaire

(XS1'-XS2') et (XS1'-XS3') sont linéairement rehaussés de 0 à 255 sur l'intervalle compris entre leurs valeurs extrêmes. La figure 10a montre les nouvelles valeurs notées (XS1'-XS2') et (XS3'-XS1').

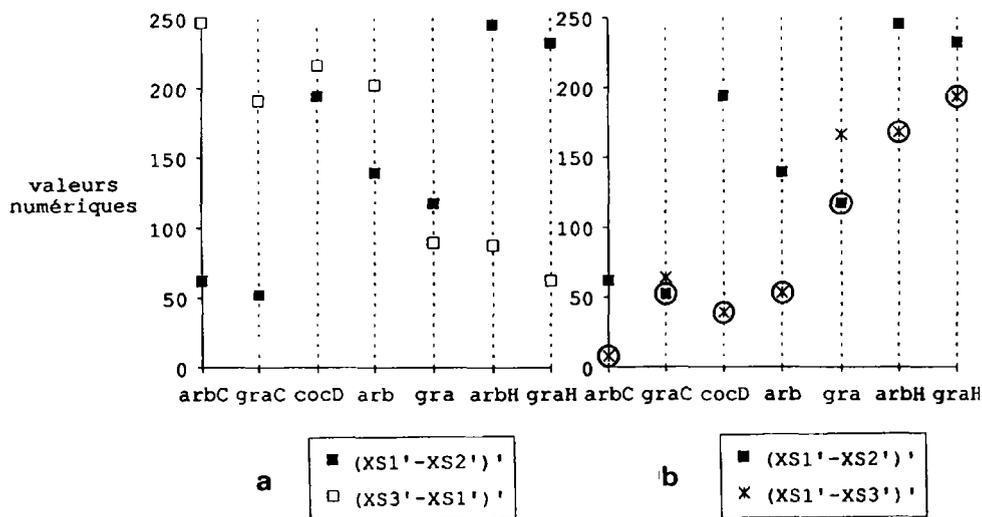


Figure 10. Valeurs numériques obtenues après rehaussement des données brutes, soustraction sur deux canaux et étalement linéaire de 0 à 255; a) valeurs sur (XS1'-XS2')' et (XS3'-XS1')'; b) valeurs sur (XS1'-XS2')' et (XS1'-XS3')' (l'opération (XS1'-XS3')', contraire de (XS3'-XS1')', est calculée de façon à obtenir des valeurs numériques maximales pour la végétation humide); les points entourés sur la figure 10b correspondent aux valeurs numériques conservées dans la suite du traitement par l'opération min[(XS1'-XS2')',(XS1'-XS3')']; ils sont également représentés sur la figure 11

3.6. Classification par minimum

À l'issue du deuxième rehaussement, les valeurs numériques de la végétation humide sont bien individualisées. Mais, sur (XS1'-XS2')', elles offrent peu de contrastes avec celles de la végétation dense et, sur (XS3'-XS1')', il existe des risques de confusion entre graminées sèches et arbres humides. Les erreurs de classification peuvent être évitées en analysant les deux images par maximum ou par minimum.

L'opération consiste à créer une nouvelle image dont chaque pixel a pour valeur numérique le maximum ou le minimum des pixels situés aux mêmes coordonnées sur les deux images :

$$XR(i,j) = \max [X1(i,j), X2(i,j)]$$

$$XR(i,j) = \min [X1(i,j), X2(i,j)] .$$

Dans le cas d'une analyse par maximum, seules les classes présentant de faibles valeurs numériques sur les deux images comparées peuvent garder ces faibles valeurs sur l'image résultante. Toutes les autres se trouvent confondues dans le domaine des fortes valeurs. De la même façon, une analyse par minimum permet de distinguer uniquement les classes présentant des valeurs élevées sur deux images à la fois, en regroupant toutes les autres zones dans le domaine des faibles valeurs.

Nous rappelons que, sur $(XS1'-XS2')$ et $(XS3'-XS1')$, la végétation humide correspond à des valeurs numériques respectivement fortes et faibles (fig. 10a). Afin de pouvoir appliquer la méthode d'analyse par minimum, l'image $(XS3'-XS1')$ est transformée en son contraire $(XS1'-XS3')$ par l'opération «inverse vidéo» :

$$XR(i,j) = 255 - X(i,j).$$

La végétation humide présente alors des valeurs élevées sur les deux images $(XS1'-XS2')$ et $(XS1'-XS3')$ (fig. 10b), et la classe peut être extraite par minimum (fig. 11) :

$$R = \min [(XS1'-XS2)', (XS1'-XS3)'].$$

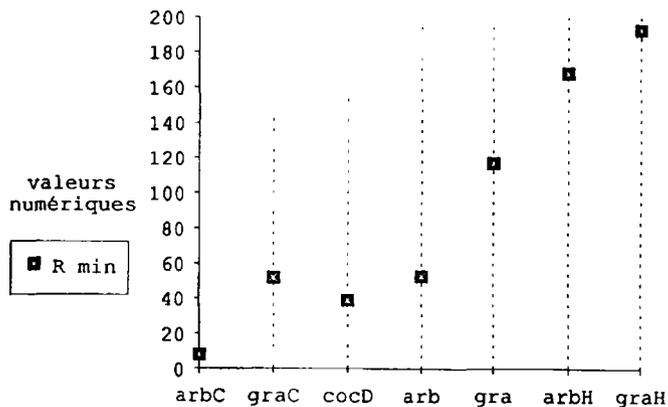


Figure 11. Valeurs numériques obtenues à l'issue du traitement par l'opération $\min[(XS1'-XS2)', (XS1'-XS3)']$ sur les zones-tests (la végétation humide est caractérisée par les valeurs numériques maximales)

3.7. Document final

Les valeurs extrêmes de la végétation humide sont mises en évidence par seuillage et traitement en pseudo-couleurs du rouge sombre au rouge clair. Les autres valeurs, non représentatives d'une classe, correspondent à un dégradé de teintes bleues (fig. 1-12, voir cahier couleur).

4. Exemples d'application

Dans l'archipel des Gambier, les zones de végétation humide sont localisées sur trois types de site correspondant à des configurations hydrogéologiques différentes. Dans le premier cas, qui est le plus fréquent, elles se situent au contact des versants et des plaines littorales lorsque celui-ci est marqué par des éboulis grossiers de bas de pente. Ces colluvions ont une capacité

d'infiltration et une perméabilité élevées. Lors d'une période pluvieuse, l'eau ruisselle presque intégralement sur les fortes pentes constituées en surface de matériaux imperméables : croûte latéritique des sols ferrallitiques ou argiles des sols vertiques (TERCINIER, 1974); elle s'infiltré dans les massifs de piedmont et alimente une nappe. De légers suintements signalent souvent le passage des colluvions en pente faible, où la végétation est particulièrement vigoureuse, aux alluvions fines, imperméables et horizontales qui constituent le remplissage supérieur des plaines littorales. Ces conditions sont largement représentées à Akamaru au bas des versants les plus abrupts qui subissent une érosion plus intense : limites de la grande plaine littorale nord et pied de pente sud de la principale arête rocheuse de l'île.

Une végétation plus humide que son environnement se développe également dans les zones déprimées des plaines littorales où la nappe des sables coralliens, captive sous les alluvions fines superficielles, affleure (MONIOD, 1974). Le sol y est nettement spongieux. Quelques exemples de mouillères semblables à ce deuxième type de cas sont visibles dans la plaine littorale nord.

Enfin, dans le troisième type de configuration hydrogéologique, les zones de végétation humide sont directement alimentées le long de fissures à partir des nappes contenues dans le matériel volcanique de l'île. Ces fissures peuvent être apparentes et donner des sources bien localisées suintant du rocher. Ce n'est pas le cas à Akamaru où les zones de drainage, masquées par des formations superficielles, se manifestent beaucoup plus discrètement dans le paysage par une répartition de la végétation humide en axes rectilignes. Le traitement numérique présenté ci-dessus constitue alors une méthode bien adaptée à leur mise en évidence.

Les résultats obtenus trouvent deux champs d'application : sur l'île étudiée, il n'existe aucun cours d'eau permanent, et la détermination des emplacements les plus favorables à l'implantation des captages se fait d'après la présence de fortes teneurs en eau dans le sol et la végétation; les zones de végétation humide constituent également des gîtes potentiels de moustiques qu'il est important de localiser pour lutter contre les épidémies de dengue; leur cartographie permet de les traiter rapidement et très précisément avec un minimum de nuisance pour l'environnement.

5. Conclusion

Le traitement numérique mis au point nécessite des opérations simples (rehaussement linéaire, soustraction, «inverse vidéo», maximum ou minimum) et peut être mené à partir de la plupart des logiciels destinés à l'interprétation des images multibandes numériques.

La correction ainsi obtenue des variations systématiques de luminance associées à l'exposition des versants et à la distinction arbres-graminées permet d'éviter les corrections radiométriques établies d'après un modèle numérique de terrain, coûteuses et longues à mettre en oeuvre.

La méthode de cartographie des zones de végétation humide, réalisée sur l'île d'Akamaru à l'aide de quelques points de contrôle sur le terrain, a pu être étendue très rapidement aux autres îles de l'archipel, difficiles d'accès, et où n'existent encore ni couverture photographique, ni cartes topographiques.

6. Remerciements

Cette étude a été menée à la Station polynésienne de télédétection (S.P.T.) à l'aide du logiciel Gringo, développé sur place et au Centre océanographique de Bretagne (C.O.B.) de l'IFREMER.

7. Références

- BROUSSE, R. 1974. Géologie et pétrologie des îles Gambier. Cahiers du Pacifique, n° 18, t. 1, p. 159-244.
- DEMETRIADES-SHAH, T. and STEVEN, M. 1988. High spectral resolution indices for monitoring crop growth and chlorosis. Proceedings of the 4th international colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing, Aussois, France, European Space Agency SP-287, p. 299-302.
- HUGLI, H. and FREI, W. 1983. Reflectance in mountainous terrain. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 49, n° 5, p. 671-683.
- KOCH, B., AMMER, U., SCHNEIDER, T. and WITTMEIER, H. 1990. Spectroradiometer measurements in the laboratory and in the field to analyse the influence of different damage symptoms on the reflection spectra of forest trees. International Journal of Remote Sensing, vol. 11, n° 7, p. 1145-1163.
- MONIOD, F. 1974. Étude hydrologique des îles Gambier. Cahiers du Pacifique, n° 18, t. 1, p. 291-325.
- TERCINIER, G. 1974. Les sols de Mangareva (Gambier), étude pédologique témoin d'une île haute de la Polynésie française. Cahiers du Pacifique, n° 18, t. 2, p. 341-457.
- THOMSON, A. and JONES, C. 1990. Effects of topography on radiance from upland vegetation in North Wales. International Journal of Remote Sensing, vol. 11, n° 5, p. 829-840.
- TUCKER, C. 1980. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. Remote Sensing of Environment, n° 10, p. 23-32.
- S.H.O.M. 1974. Îles Gambier partie sud, carte 6462, grandes corrections n° 1 1985.

2

Création d'une ortho-image à l'aide d'un modèle numérique d'altitude : influences des modes de rééchantillonnage radiométrique

RÉGIS CALOZ, THOMAS J. BLASER et GUILLEMETTE WILLEMIN

Institut d'aménagement des terres et des eaux (IATE), École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 1015 Lausanne, Suisse; téléphone : (41 21) 693 3725; télécopieur : (41 21) 693 3739

Résumé

L'utilisation d'image numérique conjointement avec d'autres informations de type cartographique exige que sa géométrie soit conforme aux précisions cartographiques. En régions de relief accidenté, les procédés habituels basés sur une transformation affine induisent parfois des décalages de plusieurs pixels, inadmissibles pour certaines applications. Le recours à des modèles numériques d'altitudes (MNA) permet la création d'ortho-images et rend ainsi l'information satellitaire conforme aux exigences cartographiques. On examine ici les principales étapes de la réalisation d'une ortho-image. Dans une deuxième partie, on évalue l'influence du mode de rééchantillonnage radiométrique sur la dynamique de l'image dérivée en prenant comme référence des indices statistiques ainsi qu'un indice textural.

1. Introduction

L'image satellitaire est de plus en plus utilisée conjointement avec d'autres informations de type cartographique au sein de systèmes d'information géographique (SIG). L'association de ces deux types de données autorise une exploitation plus riche de l'imagerie satellitaire et une meilleure gestion du territoire. La combinaison n'est évidemment possible que si la géométrie de l'ensemble des documents est identique et que si les pixels de chaque grille se superposent

parfaitement. Si la plupart des documents exploités dans un SIG ne présentent aucune difficulté parce qu'issus d'une base cartographique, il n'en est pas de même pour les images satellitaires. Leur géométrie est implicite, elle découle des mécanismes de prise de vue et apparaît souvent éloignée des normes cartographiques.

D'autres utilisations de l'image satellitaire ne deviennent possibles qu'après conversion aux normes cartographiques, notamment : l'extraction de surfaces ou de distances sur une image classée. Il est également probable que l'imprécision géométrique mentionnée peut faire apparaître comme mal classées, par rapport à la vérité-terrain, des zones qui en fait sont localisées de manière erronée.

Toutes ces raisons justifient que de sérieux efforts soient investis pour développer des méthodes afin de transformer les images satellitaires en document de type cartographique, en d'autres termes pour créer des ortho-images.

Les corrections géométriques généralement appliquées sur les images sont de type non paramétrique. Elles agissent globalement sur l'image sans tenir compte des conditions de la prise de vue. Elles se basent sur le principe des régressions linéaires ou d'ordre supérieur appliquées sur les couples de points repérés sur la carte et sur l'image. Cette procédure tend à minimiser les résidus associés aux points de contrôle. Il convient encore de préciser que ces résidus ne peuvent être réduits au-delà d'une certaine limite quelque soit le nombre d'amers. Les hypothèses autorisant ces transformations sont : un espace géométrique continu et une métrique constante ou pouvant être considérée comme telle (cas des surfaces de tendance).

La première condition peut être considérée comme remplie pour une image satellitaire. En revanche, la métrique constante n'est réalisée que pour une surface parfaitement plane et après correction des effets panoramiques.

En plus de l'aspect géométrique évoqué, toute opération sur l'image peut influencer l'étendue des informations spectrales qu'elle contient. En effet, l'image numérique n'est rien de plus qu'un ensemble numérique dont les éléments sont organisés sous forme matricielle. La géométrie est introduite lorsqu'on en donne une représentation visuelle. À l'écran, par exemple, le pixel est affecté à un espace de l'ordre du mm^2 . Si les luminances deviennent un attribut d'un fichier grille dans un SIG, le pixel recouvre la surface de la maille. Créer une image aux normes cartographiques revient à transformer les luminances de manière qu'elles correspondent aux éléments d'une grille régulière appliquée sur une carte, en d'autres termes réaliser une ortho-image. Cette opération passe par un rééchantillonnage des valeurs radiométriques. Dans quelle mesure, ces transformations modifient les caractéristiques spectrales de l'image et affectent leur richesse informative?

Le problème est donc double : d'ordre spatial, car il s'agit de déterminer les coordonnées spatiales des valeurs de luminance, d'ordre radiométrique lors du calcul de la nouvelle luminance.

C'est l'ensemble du processus que se propose d'analyser le présent article. Il se divise en deux parties principales. Dans la première partie, on examine la modélisation de la prise de vue pour proposer une procédure de création d'ortho-image. La deuxième partie évalue les méthodes de rééchantillonnage qui y sont associées en prenant comme référence quelques indicateurs statistiques sur l'image et sur la transformée texturale de l'image.

2. Modélisation de la prise de vue

Les procédures décrites plus loin interviennent sur des images ayant déjà subi plusieurs transformations réalisées par leur fournisseur. Il s'agit de corrections géométriques basées sur

la dynamique de vol du satellite et du mode de balayage du radiomètre. Ce dernier est particulièrement complexe sur Landsat TM. Nous ne les examinons pas ici. De nombreuses publications ont traité ce sujet notamment IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (1984) et HARDY (1990). Dans le même ordre d'idée, il convient de signaler les études sur la notion de résolution spatiale effective de l'image satellitaire notamment WILSON (1988). Par ailleurs, les informations publiées par les fournisseurs d'images contiennent des descriptions détaillées des modes de corrections correspondants (ESA, 1987). Il n'y a pas lieu d'y revenir. Notre modèle ne prend en compte que les caractéristiques du balayage latéral et de la parallaxe provoquée par l'effet panoramique et par le relief de la Terre. Il n'est pas tenu compte de la pente et de l'orientation dans le sens de la ligne de vol. L'objectif est de réaliser un modèle géométrique de l'image, c'est-à-dire d'établir les références spatiales des éléments de sol pour lesquels la luminance a été mesurée.

La littérature est peu abondante sur ce sujet. À titre d'information, nous citons WONG *et al.* (1981) et WILSON (1988). Ces deux articles ne proposent cependant pas un véritable modèle géométrique.

2.1. Modélisation de la prise de vue selon une ligne de balayage

La modélisation de la prise de vue s'articule autour de deux éléments clés qui déterminent la géométrie implicite de l'image : les paramètres de vol du satellite et le relief du sol. Les paramètres de vol sont fournis par les gestionnaires du satellite et figurent dans l'en-tête de l'image en format CCT. Le relief du sol est quant à lui décrit par un modèle numérique d'altitude (MNA).

En ce qui concerne les données du satellite lui-même, on connaît son altitude et son attitude, sa trace au sol et les angles du champ de vue du capteur et de la visée latérale maximum. Notons que le champ de vue du capteur est constant. Il est fixé par la durée d'échantillonnage du convertisseur analogique/numérique du radiomètre.

La figure 1 présente le modèle géométrique de la prise de vue. Il se caractérise par : β : angle de visée latérale; α : champ de vue du capteur (IFOV); h_{sat} : altitude sur mer du satellite; h : altitude du pixel; t : distance horizontale du pixel à la trace du satellite.

Les deux éléments principaux à considérer intervenant dans l'élaboration du modèle géométrique sont : l'angle de visée latérale et le relief.

2.1.1. Angle de visée latérale β

Avec une surface de la terre plane, à mesure que l'angle β augmente, l'intersection du cône de vision avec le sol s'agrandit. Dans le cas de Landsat, la résolution à la trace du satellite est de 30 m, elle devient 30,5 m environ à l'extrémité de l'image. L'effet panoramique se caractérise surtout en valeurs cumulées. Avec un nombre de pixels égal à 3000, la différence entre la valeur cumulée des pixels allant en s'allongeant et celle correspondant à la valeur nominale de 30 m s'élève à 493 m. L'effet de la courbure terrestre accentue encore cet effet. HARDY (1990) a analysé en détail l'effet panoramique et évalue à environ 850 m, soit 28,5 pixels, le déplacement latéral du dernier pixel de l'image (fig. 2).

Notons que l'effet panoramique induit une métrique facilement corrigible. Sa loi de transformation selon la ligne de balayage dépend de l'angle de visée latérale et de la courbure terrestre. Cette correction est réalisée pour les niveaux 1B dans le cas de HRV de SPOT et 5 pour TM de Landsat. Sans tenir compte de l'effet du relief, les tailles nominales des pixels sont ramenées respectivement à 20 m et 30 m.

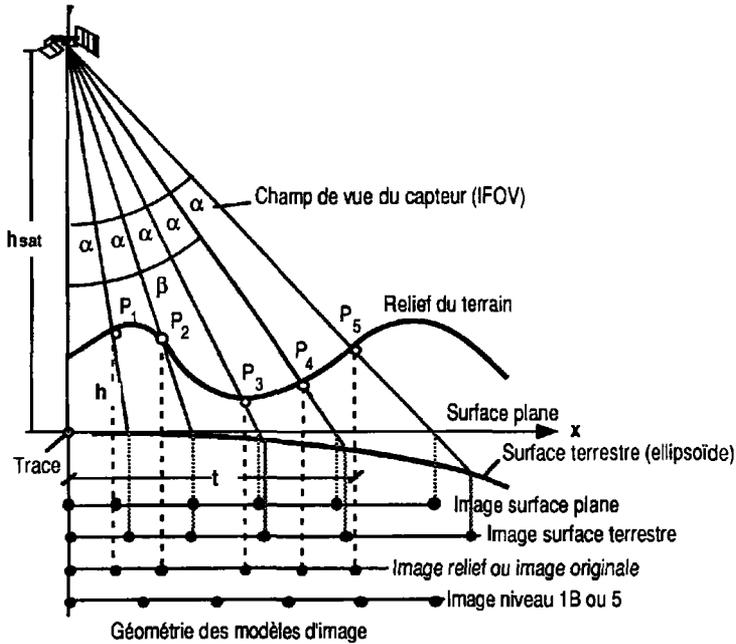


Figure 1. Modélisation de la prise d'image selon une ligne de balayage; modèles géométriques de l'image selon la surface considérée; β : angle de visée latérale; α : champ de vue du capteur (IFOV); h_{sat} : altitude sur mer du satellite; h : altitude du pixel; t : distance horizontale du pixel à la trace du satellite

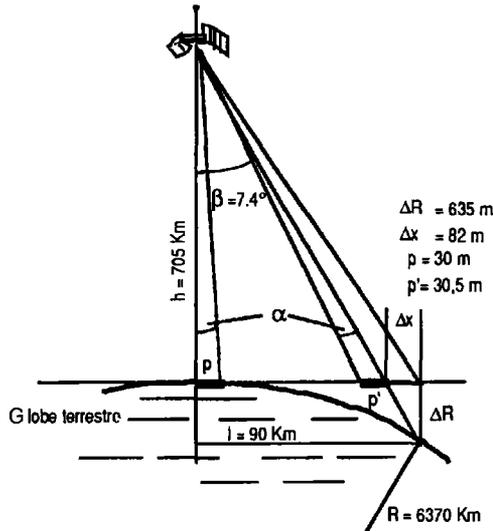


Figure 2. Rejet apparent du pixel extrême pour une image TM (d'après HARDY, 1990)

2.1.2. Relief

La figure 1 met bien en évidence l'effet du relief. L'intersection du cône de vision avec le terrain produit des pixels de taille variable selon la pente et l'orientation du terrain. Pour donner les ordres de grandeur de cette variation en projection horizontale, nous avons calculé la taille d'un pixel dans quelques situations caractéristiques. La figure 3 restitue la représentation géométrique et les résultats sont présentés sur le tableau I.

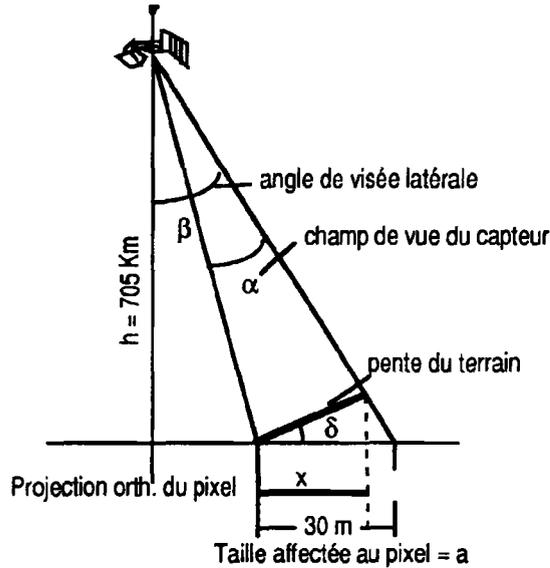


Figure 3. Variation de la taille apparente du pixel en fonction de l'angle de visée latérale et de la pente du terrain

Tableau I. Variation de la projection orthogonale du pixel

	Bord de l'image				Situation moyenne			
β [°]	7,5°	7,5°	7,5°	7,5°	4°	4°	4°	4°
δ [°]	30°	-30°	15°	-15°	30°	-30°	15°	-15°
x [m]	27,88	32,46	28,98	31,1	28,83	31,26	29,45	30,57

L'ortho-image est celle formée par les projections orthogonales des pixels. Si x désigne la taille de la projection, quelle est sa variation en fonction de l'angle latéral de visée β et de la pente δ du terrain? L'équation ci-dessous exprime la relation entre les différents paramètres.

$$x = \frac{a}{1 + \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} \delta}$$

où a est la résolution nominale du pixel. Elle est prise égale à 30 m pour le calcul des valeurs du tableau I. Notons encore que le relief n'est pas pris en compte pour cette analyse.

La connaissance de cette variation est fondamentale pour le problème qui nous préoccupe. Elle définit la métrique locale de la géométrie de l'image. Le tableau I rend compte de la variation de x en différentes situations.

En situation moyenne, pour des pentes courantes en zones accidentées, la taille du pixel varie de ± 1 m selon son orientation. Cette différence se cumule tant que l'orientation ne change pas de signe. Le décalage est ainsi progressif et peut atteindre des erreurs de localisation de plusieurs pixels.

2.2. Modèle géométrique de l'image

Pour la clarté du raisonnement, on caractérise le pixel par l'intersection de l'axe optique du champ de vue du capteur avec la surface du sol.

Le relief est représenté à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA). Sa résolution doit être de l'ordre de grandeur de celle des images, c'est-à-dire de 20 à 30 m. La surface du sol est représentée en reliant les points du MNA par des droites ou par une courbe calculée à l'aide d'une fonction d'interpolation «spline». Le calcul de l'intersection axe optique - surface du sol ne rencontre, ensuite, aucune difficulté mathématique. La composante x représente sa projection horizontale.

L'effet du relief provoque une variation de la distance séparant deux pixels consécutifs le long de la ligne de balayage. Il n'y a pas de déformation dans le sens de vol après corrections apportées pour éliminer les effets du mode de balayage et de la vitesse relative du satellite et de la Terre.

Les méthodes de calcul étant présentées, il s'agit maintenant de décrire les étapes à franchir pratiquement pour réaliser le modèle géométrique de l'image à l'aide d'un MNA.

L'image numérique ne contient aucune information explicite qui nous permettrait de relier une valeur radiométrique au modèle géométrique de l'image. Le pixel, dans l'image, est repéré par le numéro de ligne i et par son correspondant colonne j . On se déplace dans l'image selon les nombres i, j , alors que dans le modèle géométrique de l'image selon les coordonnées (x, y) par incréments $(\Delta x, \Delta y)$ calculés par rapport à l'angle α du champ de vue du capteur. Dans les deux cas, le déplacement se fait de manière discrète, soit par nombre entier dans l'image, soit par des multiples de Δx et Δy dans le modèle. Nous sommes donc en présence de deux ensembles construits indépendamment l'un de l'autre dont les éléments, cependant, correspondent de manière biunivoque. Il suffit donc d'ancrer un couple (i, j) à un couple de coordonnées (x, y) pour que l'ensemble de l'image soit défini tant radiométriquement que géométriquement. La procédure se résume dans les étapes brièvement décrites ci-dessous :

1) Choisir un point de contrôle selon la procédure habituelle : identifier un point sur la carte appartenant à la zone d'étude facilement repérable sur l'image, par exemple un croisement de route, une courbe de rivière, etc. La carte nous donne les coordonnées géographiques, l'image par l'intermédiaire du logiciel de traitement nous fournit le numéro du pixel tel qu'il est repéré dans l'espace numérique. Nous obtenons ainsi le couple R_{ij} et sa coordonnée cartographique (x, y) .

2) Les paramètres de vol nous informent sur la position de la trace du satellite. On suppose qu'elle coïncide avec la colonne centrale de l'image numérique. Comme l'illustre la figure 4, on déduit alors facilement l'angle β de visée latérale du radiomètre au moment où la maille contenant le point de contrôle a été mesurée.

3) L'ensemble des paramètres géométriques est maintenant déterminé; il reste à calculer l'intersection de l'axe optique avec la surface du sol modélisée par une fonction spline appliquée sur le MNA.

Avec cette information, il nous est maintenant possible de calculer les coordonnées de tous les pixels de la colonne j puisque β reste constant pour elle. Pour les colonnes suivantes, en-deçà ou au-delà de la colonne couvrant le point de contrôle, on ajoute ou on retranche de β un multiple de l'angle α mesurant le champ de vue du capteur.

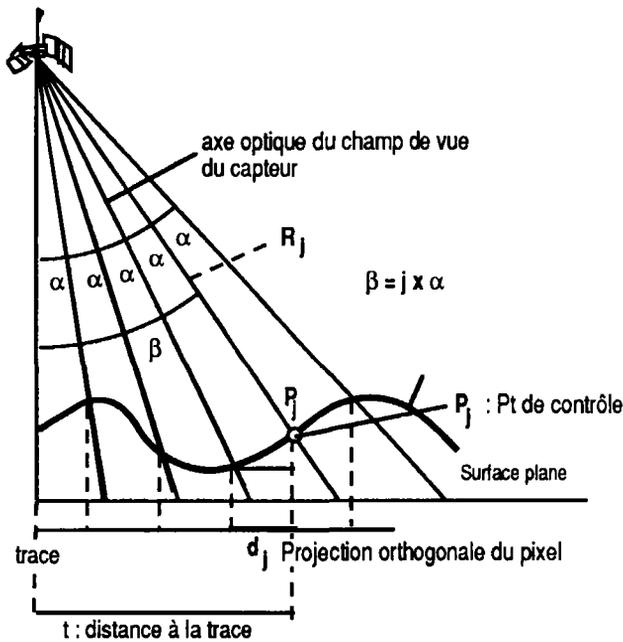


Figure 4. Relations géométriques du point de contrôle

Quelles sont les sources d'erreurs attachées à cette procédure?

Il convient de relever de prime abord que la précision que nous osons espérer ne peut être supérieure à celle permise par les précisions relatives aux paramètres de vol et du radiomètre.

L'angle de visée est calculé par rapport à la trace du satellite. Celle-ci ne peut être connue avec exactitude. Sa localisation peut être obtenue au moins par deux manières :

- On accepte les informations livrées par le fournisseur de l'image. L'incertitude est de l'ordre de deux kilomètres pour HRV de SPOT (communication de SPOT Image).

- On considère que la colonne centrale de l'image coïncide avec la trace. Comme décrit précédemment pour le point de contrôle, on repère un point dans la colonne centrale facilement identifiable sur l'écran et sur la carte. La direction de la trace est déduite ensuite des caractéristiques orbitales du satellite. Pour les visées latérales de HRV de SPOT, seule la première solution est utilisable.

L'ensemble du modèle géométrique de l'image prend la forme représentée sur la figure 5 : un semis de points irrégulièrement espacés en direction de l'axe des x et régulièrement en y (direction de vol).

Sous cette forme, l'image est difficile à représenter et inexploitable. Il faut la transformer en une grille à maille régulière, en d'autres termes créer une ortho-image.

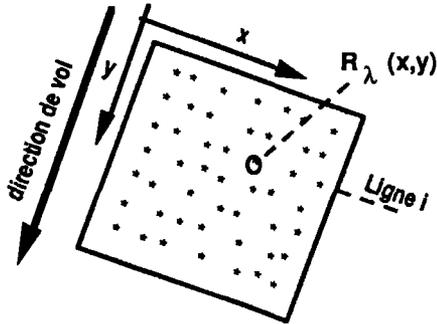


Figure 5. Semis de points correspondant au modèle géométrique de l'image

2.3. L'ortho-image du point vue géométrique

Du point de vue géométrique, l'ortho-image se caractérise par une grille régulière dont chaque élément correspond à une projection orthogonale de la surface du sol. Comme illustré sur la figure 6, l'ortho-pixel peut chevaucher un ou plusieurs pixels issus de la modélisation de la prise de vue.

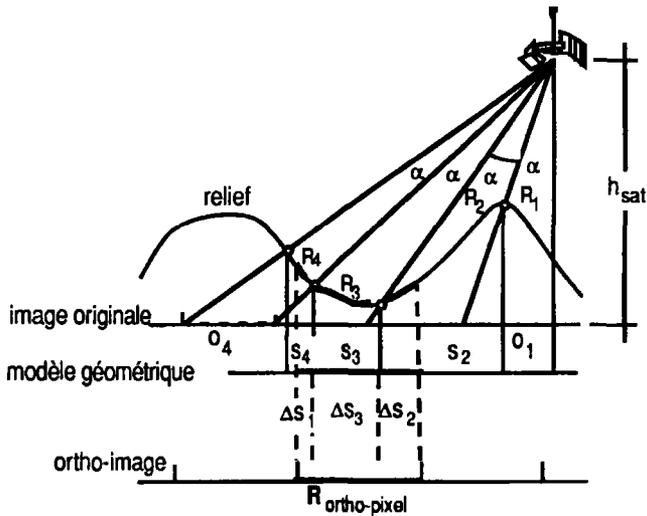


Figure 6. Relation ortho-pixel et pixels; R_i : luminance des pixels originaux; ΔS_i : élément de pixel contribuant la formation de la luminance de l'ortho-pixel; s_i : pixel projeté; o_i : pixel image originale

Le problème est donc de réaliser une image où chaque luminance correspond à une portion carrée élémentaire de la carte. La solution peut être abordée selon deux points de vue : soit les luminances sont considérées comme des valeurs points, soit elles sont interprétées comme des valeurs surfaces. Cette distinction est un problème classique en interpolation spatiale. Les deux points de vue seront examinés pour la création de l'ortho-image.

3. Création de l'ortho-image : rééchantillonnage radiométrique

Le problème du point de vue radiométrique est de rechercher la luminance que produirait une portion de sol correspondant à l'ortho-pixel. Les figures 6 et 7 rendent compte de cette situation.

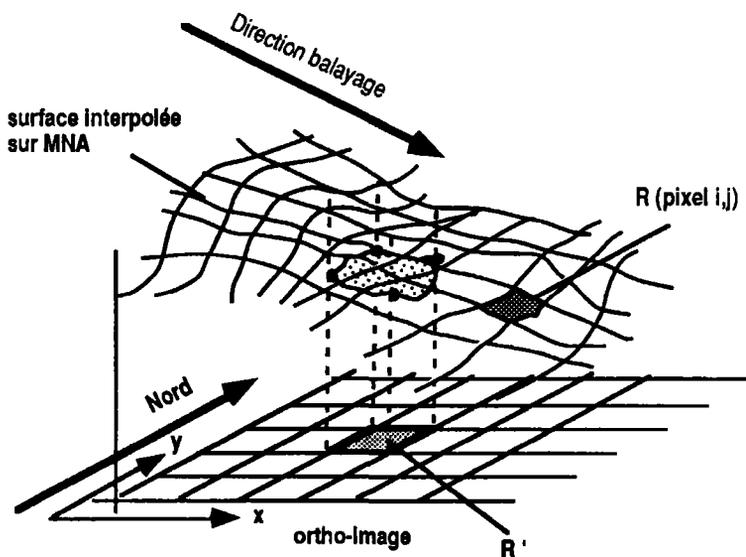


Figure 7. Luminance de l'ortho-pixel selon la pondération des surfaces

3.1. Par valeur point

Si la luminance est considérée comme une valeur point, le problème est de transformer le semis de points distribués de manière irrégulière en une grille régulière (fig. 5). De telles transformations sont connues en traitement d'images. Il s'agit des méthodes du «plus proche voisin», interpolation bilinéaire et convolution cubique. Elles s'appliquent lorsque l'on souhaite réorienter une image ou modifier la taille de la maille en mode grille.

3.2. Par valeur surface

Si la luminance n'est pas considérée comme une valeur point, mais comme un attribut affecté à une portion de sol, l'attribut de l'ortho-pixel résulte de la contribution de chaque pixel qu'il chevauche. Celle-ci est proportionnelle aux surfaces «en contact» (fig. 6.)

Luminance pondérée de l'ortho-pixel :

$$\bar{R}_{\text{ortho}} = \frac{\Delta s_2 R_2}{s_2} + \frac{\Delta s_3 R_3}{s_3} + \frac{\Delta s_4 R_4}{s_4}$$

où R_i : luminance des pixels originaux; Δs_i : élément de pixel contribuant à la formation de la luminance de l'ortho-pixel; s_i : pixel projeté.

Une manière simplifiée est de procéder comme le suggère la figure 6. La pondération est calculée à une dimension et se réfère donc à la longueur des segments seulement. Au cas où le MNA n'a pas la même orientation que celle des lignes de balayage, il est nécessaire de procéder à une rotation du MNA.

L'approche la plus complète consiste à calculer de la manière la plus précise la surface de contact de l'ortho-pixel avec les pixels originaux. Elle tient compte également de la pente et de l'orientation du pixel dans la direction de vol. BLASER et CALOZ (1991) proposent une méthode basée sur ce principe (fig. 7).

4. Effets du rééchantillonnage sur les luminances de l'ortho-image

L'image numérique n'étant au demeurant qu'une matrice de valeurs de luminance, toute transformation dite géométrique se traduit en fait par une modification des luminances. Les méthodes les plus couramment utilisées sont : «le plus proche voisin», l'interpolation bilinéaire et la convolution cubique. Les propriétés de ces trois méthodes sont connues. Le «plus proche voisin» offre l'avantage de conserver les valeurs radiométriques originales. La dynamique de l'image n'est ainsi pas affectée. En revanche, elle induit une incertitude de positionnement minimale du pixel de $\pm 0,5 \sqrt{2}$ pixel, les autres modifient les valeurs de luminance originales. L'interpolation bilinéaire introduit un lissage. Il peut en résulter des inconvénients sur le pouvoir discriminant des algorithmes de classification ou, de manière plus accentuée encore, lors d'analyses texturales. La convolution cubique ne provoque aucun lissage. Au contraire, elle a tendance à se comporter comme un filtre passe-haut et à produire ainsi un léger contrastage (KALMAN, 1985). Malgré les temps de calcul supérieurs à ceux des autres algorithmes, cette dernière méthode est souvent préférée car elle conserve assez bien la structure de l'image.

Dans la création d'une ortho-image, nous devons tenir compte de la pente et de l'orientation des surfaces élémentaires, en fonction du relief du terrain. L'ortho-pixel peut chevaucher, le cas échéant, partiellement plusieurs pixels. Nous sommes donc contraints de calculer la luminance qu'il serait sensé produire. Le rééchantillonnage est donc une étape cruciale de toute la procédure.

Quelle est l'influence de ces méthodes de rééchantillonnage sur l'information radiométrique?

La question est évidemment importante, car sur elle repose le pouvoir discriminant de toute méthode d'extraction de classes spectrales. Plus l'information radiométrique est riche, meilleur sera le pouvoir séparateur des opérateurs de classification! Il s'agit alors de définir des indicateurs de la richesse d'information relative à l'image dérivée. Nous avons choisi de

la mettre en évidence au niveau de la dynamique de l'image et de l'analyse texturale. Pour la dynamique, les paramètres suivants ont été retenus : moyenne, écart type, minimum et maximum. En ce qui concerne l'analyse texturale, nous avons retenu un indice composite proposé par BLASER *et al.* (1991) basé sur l'indice de contraste et sur celui d'autocorrélation.

L'imagette utilisée pour les tests décrits est une image TM du 6 septembre 1986. Elle couvre la région de Vevey (Suisse) qui se caractérise par un relief très accidenté. Sa taille est de 10 km par 10 km. La résolution des pixels est celle de l'image TM soit 30 m. La bande 4 a été choisie pour la présente étude en raison de sa dynamique.

4.1. Influence sur quelques indicateurs statistiques calculés sur l'ensemble de l'image

L'analyse porte sur l'imagette entière et sur deux zones dont la variabilité spectrale est reconnue comme très différente : la forêt et un espace faiblement construit. Les zones faiblement construites présentent habituellement une distribution spectrale relativement large qui entraîne de nombreuses confusions avec d'autres classes. Elles représentent donc une classe difficile pour les applications de la télédétection. Elles sont, pour cette raison, particulièrement indiquées pour évaluer les méthodes de rééchantillonnage. Les résultats sont présentés sur les tableaux II et III.

4.2. Influence sur un indice de texture

L'indice choisi exprime à la fois l'hétérogénéité du milieu et son niveau de gris moyen. La fenêtre d'analyse comporte 15 par 15 pixels.

Vis-à-vis des classes retenues pour notre test, son comportement est le suivant :

La zone faiblement construite est la plus hétérogène, l'indice s'exprime par une valeur relativement faible. Le fortement construit est moins hétérogène car il y a peu de végétation; en revanche, le ton de gris moyen est élevé. L'indice se présente pour cette classe avec des

Tableau II. Caractérisation statistique des méthodes de rééchantillonnage radiométrique

	Indicateurs	Image brute	Plus proche voisin	Interpolation bilinéaire	Convolution cubique	Pondération surfacique
Image entière	Moyenne	46,54	46,49	46,52	46,50	46,50
	Écart type	10,22	10,22	9,97	10,20	9,44
	Minimum	29	29	29	29	30
	Maximum	254	254	243	255	199
Zone forêt	Moyenne	33,88	33,84	33,88	33,86	33,87
	Écart type	1,07	1,04	0,91	1,02	0,76
	Minimum	30	30	31	31	32
	Maximum	38	38	37	38	36
Zone faiblement construite	Moyenne	50,97	50,88	50,86	50,94	50,66
	Écart type	5,47	5,43	4,97	5,58	3,76
	Minimum	39	39	41	39	43
	Maximum	83	83	77	81	67

Tableau III. Caractérisation de la texture en fonction des méthodes de rééchantillonnage radiométrique

	Indicateurs	Image originale	Plus proche voisin	Interpolation bilinéaire	Convolution cubique	Pondération surfacique
Zone faiblement construite	Moyenne	44,25	44,16	47,78	60,75	35,16
	Écart type	10,06	19,32	21,08	25,94	17,84
	Minimum	10	17	18	27	13
	Maximum	148	102	115	138	92
Zone fortement construite	Moyenne	123,84	92,98	100,69	113,86	83,22
	Écart type	10,35	9,88	11,48	14,22	10,08
	Minimum	100	69	77	88	59
	Maximum	148	114	122	151	102
Vignoble	Moyenne	198,03	168,93	163,83	201,87	146,90
	Écart type	24,55	9,82	12,02	13,94	11,38
	Minimum	137	147	139	175	122
	Maximum	241	184	181	223	162
Zone forêt	Moyenne	25,11	17,04	17,41	20,78	17,02
	Écart type	11,63	11,39	10,55	12,78	9,92
	Minimum	9	4	5	5	5
	Maximum	72	54	52	61	46

valeurs élevées. La vigne est très homogène par rapport à la résolution du capteur, et ses tons de gris sont très élevés, l'indice atteint donc sa valeur maximale. La forêt est très homogène, avec des tons de gris très bas; son indice est donc très faible. Dans quelle mesure, le mode de rééchantillonnage influence la plage de variation de l'indice? Les résultats sont formulés sur le tableau III.

Pour faciliter l'interprétation, les valeurs moyennes et les écarts types ont été reportés sur la figure 8.

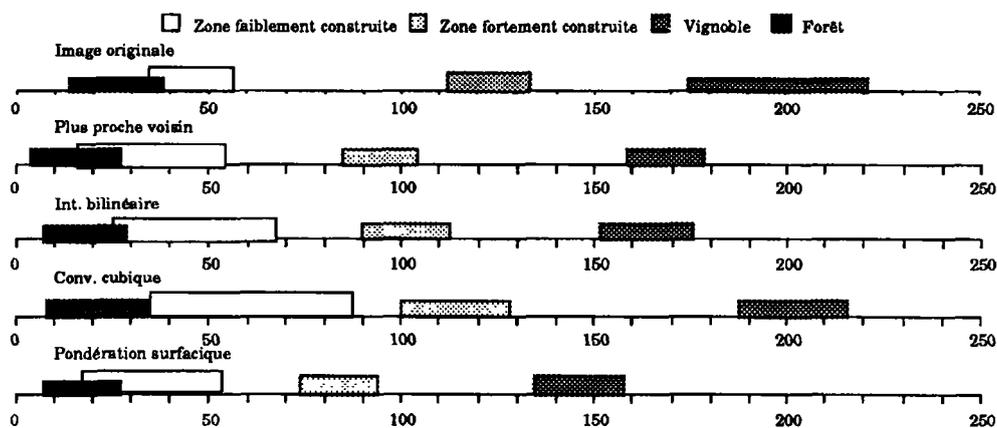


Figure 8. Influence du mode de rééchantillonnage sur l'indice de texture test

4.3. Analyse des résultats

La moyenne, comme on pouvait s'y attendre ne révèle rien sur la statistique de l'image. Elle est conservée sur le tableau pour servir de repère.

L'indice de texture varie considérablement d'un mode de rééchantillonnage à l'autre. Cependant, leurs différences ne peuvent s'interpréter de manière linéaire. Elles résultent, en partie, de la nature de l'indice utilisé. L'analyse formulée ci-dessous s'en réfère et n'évalue que le pouvoir discriminant qui subsiste dans les images rééchantillonnées.

4.3.1. Méthode basée sur la notion de valeur point

Tableau IV. Influence du mode de rééchantillonnage en valeur point

Statistiques sur l'image	Indice de texture
<p><i>Plus proche voisin</i></p> <p>Les résultats sont conformes à ceux présentés habituellement dans la littérature. La dynamique de l'image n'est pas modifiée tant pour l'image entière que pour les deux classes retenues.</p>	<p><i>Plus proche voisin</i></p> <p>L'image dérivée présente des valeurs moyennes moins élevées, les écarts types se trouvent modifiés. L'indice discrimine bien les quatre catégories d'occupation du sol.</p>
<p><i>Interpolation bilinéaire</i></p> <p>L'effet de lissage se remarque par la diminution sensible de l'écart type</p>	<p><i>Interpolation bilinéaire</i></p> <p>L'interpolation a agi de manière similaire à la méthode plus proche voisin : affaiblissement de la dynamique et modification des écarts types. Toutes les catégories sont toujours bien discriminées.</p>
<p><i>Convolution cubique</i></p> <p>La dynamique de l'image est aussi bien conservée. On n'observe pas sur cette image une accentuation des valeurs extrêmes (min. et max.) comme peut induire cette méthode.</p>	<p><i>Convolution cubique</i></p> <p>La convolution cubique, dans trois catégories sur quatre, a augmenté les écarts types tout en séparant davantage les classes. Toutes les catégories sont ainsi bien discriminées.</p>

4.3.2. Méthode basée sur la notion de valeur surface

Tableau V. Influence du mode de rééchantillonnage en valeur surface

Statistiques sur l'image	Indice de texture
<p><i>Pondération par surface</i></p> <p>L'effet de lissage est plus marqué que pour l'interpolation bilinéaire: plus faibles écarts types et réduction de la dynamique de l'image. La dégradation est très significative en zone faiblement construite.</p>	<p><i>Pondération par surface</i></p> <p>L'effet de lissage est prononcé. Si les valeurs moyennes des catégories d'occupation ont été conservées (cf. tableau III), la diminution du contraste, donc de l'écart-moyen, a davantage réduit la valeur de l'indice. D'autre part les valeurs extrêmes ont été réduites par la pondération. En conséquence, un nombre plus grand de pixels est tombé vers des valeurs inférieures par rapport au seuil de binarisation fixé lors de l'analyse texturale. Cette fois-ci la classe faiblement construite chevauche la classe forêt de 10 unités de gris.</p>

5. Conclusion

Si la télédétection souhaite fournir à l'utilisateur des informations de nature quantitative (surface et distance), produire en définitive des documents conformes aux normes cartographiques, fournir des fichiers numériques compatibles avec un SIG, il apparaît indispensable d'établir des ortho-images. Il y a quelques années, cette opération butait contre l'absence de modèle numérique d'altitude aux résolutions appropriées. Aujourd'hui, la plupart des pays industrialisés (ce n'est pas encore le cas hélas pour les pays du sud!) disposent, ou sont en bonne voie d'être dans cette situation, de MNA basés sur une maille de 20 à 30 m de côté.

L'évaluation globale des méthodes de rééchantillonnage est soumise à deux considérations antagonistes : la précision géographique du pixel et la richesse de l'information contenue dans l'image. Pour satisfaire aux exigences de précision dans la localisation, la méthode basée sur la « pondération par les surfaces » est théoriquement la plus correcte : elle tente d'affecter à la portion de sol la luminance correspondant au mieux à la réalité. Cependant, le rééchantillonnage est réalisé sur une distribution discrète des luminances. Toute combinaison de celles-ci ne peut que provoquer un lissage dont l'ampleur a été mise en lumière par la présente étude. À l'opposé, la méthode dite du « plus proche voisin » respecte presque totalement la dynamique mais est imprécise à $\pm 0,5 \sqrt{2}$ pixel du point de vue géométrique. Le choix d'une procédure dépend donc de l'usage qui sera fait des résultats. En ce qui concerne la liaison de la télédétection et des systèmes d'information géographiques, il nous paraît préférable de privilégier la conservation de la dynamique de l'image; on s'assure ainsi de tirer le maximum de profit de cette source d'informations.

6. Références

- BLASER, T. J. and CALOZ, R. 1991. Digital ortho-image generation from a SPOT panchromatic image using a digital elevation model. IGARSS'91, Helsinki, p. 2431-2434.
- BLASER, T. J., CALOZ, R., WILLEMIN, G., COLLET, C. et LYON, R. J. P. 1991. Sensibilité d'indices de textures aux résolutions spatiale et spectrale en milieux semi-urbains. 5^e Colloque sur les mesures physiques et signatures spectrales en télédétection, Courchevel, Agence spatiale européenne, p. 619-625.
- ESA 1987. Landsat Thematic Mapper (TM) CCT formats standards. ESA/EARTHnet, p. 91.
- HARDY, E. 1990. Modellorientierte Entzerrung von Thematic-Mapper-Rohdaten. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), p. 103.
- IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 1984. Special Issue on Landsat 4. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, n° 3, p. 175-338.
- WILSON, A. K. 1988. The effective resolution element of Landsat Thematic Mapper. International Journal of Remote Sensing, n° 8, p. 1303-1314.
- WONG, F., ORTH, R. and FRIEDMANN, D. E. 1981. The use of digital terrain model in the rectification of satellite-borne imagery. 15th ERIM Symposium, Ann Arbor, Michigan, p. 653-662.
- KALMAN, L. S. 1985. Comparison of cubic-convolution interpolation and least-squares restoration for resampling Landsat MSS imagery. in Technical Papers of the 51st Annual ASP-ASCM Convention : Theodolite to satellite, Washington, D. C., U. S. A., p. 546-556.

3

Le suivi par la télédétection des congères résiduelles de neige dans l'Arctique canadien : le lien avec les accumulations annuelles

YVES CREVIER*, JAMES T. GRAY**, CLAUDE DUGUAY*,
BERNARD LAURIOL* et HENRI AMYOTTE*

*Département de géographie, Université d'Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada, K1N 6N5;
téléphone : (613) 564-6792

**Département de géographie, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada,
H3C 3J7; téléphone : (514) 343-8017

Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les effets de causalités qui existent entre les données du couvert de neige estival, en milieux arctiques, extraites des images TM de Landsat-5 et les données météorologiques sur les accumulations hivernales. Ainsi, nous avons développé, à l'aide du logiciel de traitement d'images EASI/PACE, une méthode automatique d'inventaire des congères de neige. Cette méthode nous a permis de faire la compilation des superficies régionales du couvert nival résiduel pour la mi-juillet pour des secteurs au nord de la ligne des arbres. Une équation de régression qui met en relation le couvert de neige résiduel et les accumulations hivernales fut établie par LAURIOL *et al.* (1986) à partir d'une étude détaillée de photos aériennes. Nous avons appliqué cette équation aux données nivales estivales extraites des images TM pour trois régions. Les résultats démontrent une sous-évaluation de 8,9 cm pour le nord de l'Ungava et de 5,8 cm pour la péninsule de Melville par rapport aux données météorologiques hivernales acquises *in situ* : soit une sous-évaluation de 13% et de 10% respectivement. Pour le site du Labrador, cependant, il y a une sur-évaluation très significative due à la sélection d'une image qui a été affectée par une chute importante de neige estivale. Plusieurs problèmes demeurent à résoudre afin d'augmenter l'acuité des

paramètres qui s'intègrent dans la relation. Certains sont d'ordre méthodologique et d'autres d'ordre technique. Cependant, les études multitudes entreprises parallèlement pour une série de sites précis, permettraient d'établir des tendances à long terme pour le couvert nival, et surtout d'évaluer les répercussions potentielles des changements climatiques en milieux arctiques.

1. Introduction

Dans le cadre de recherches sur le couvert de neige estival dans l'Arctique canadien, LAURIOL *et al.* (1986) ont établi, par l'étude des photos aériennes pour onze endroits au nord de la ligne des arbres, une relation spatiale et temporelle très significative ($R = 0,93$) entre l'épaisseur maximale de neige en hiver et les superficies des congères résiduelles vers la fin de juillet. La corrélation entre les valeurs accumulées de degrés/jours au-dessus de 0°C et la superficie des congères étant très faible ($R = 0,29$), l'hypothèse retenue est que malgré une diversité des conditions météorologiques pendant la fonte des neiges, le facteur prédominant en ce qui concerne l'étendue et le nombre de congères de neige estivales est l'accumulation hivernale de neige pour la région.

Dans le but d'élaborer sur ce thème, nous avons jugé utile d'explorer le potentiel des images satellitaires, pour la cartographie des plaques de neige estivales. L'analyse des photographies aériennes est longue et fastidieuse et s'avère inefficace pour un suivi continu et prolongé du couvert nival. La grande fréquence des images TM de Landsat, leur aptitude à couvrir de vastes superficies, leur bon potentiel pour la discrimination de la neige dans les bandes visibles, proche et moyen infrarouge et la possibilité de traitement numérique des données nous ont amenés à choisir dans un premier temps trois images TM de Landsat-5 de sites côtiers localisés sur un transect nord-ouest à sud-est à travers l'Arctique canadien (fig. 1).

La physiographie de ces régions se décrit par un relief local qui est composé de plateaux monotones entaillés par des vallées glaciaires et disséqués par de nombreuses anfractuosités dans la roche en place (fig. 2). Ces deux régions sont situées dans la zone de toundra soit herbacée, soit arbustive et font partie du bouclier canadien. Les paramètres bio-physiques des trois régions et les renseignements sur les images sont présentés sur le tableau I. Les étapes suivies pour cette étude sont représentées schématiquement sur la figure 3.

Tableau I. Caractéristiques biophysiques des régions d'étude et description des images

Paramètres	Melville	Ungava	Labrador
Précipitation neigeuse	100 à 150 cm	150 à 200 cm	300 à 400 cm
Topographie	Plateau côtier entaillé	Plateau côtier entaillé	Plateau côtier entaillé
Végétation	Toundra	Toundra	Toundra arbustive
Localisation du centre des images	65°40'N 83°20'O	62°05'N 75°00'O	54°40'N 58°25'O
Date d'acquisition	03-08-1986	13-07-1984	05-07-1985
Taille	1880 pixels 2360 lignes 3993 km ²	3000 pixels 2900 lignes 7830 km ²	2496 pixels 1200 lignes 2693 km ²

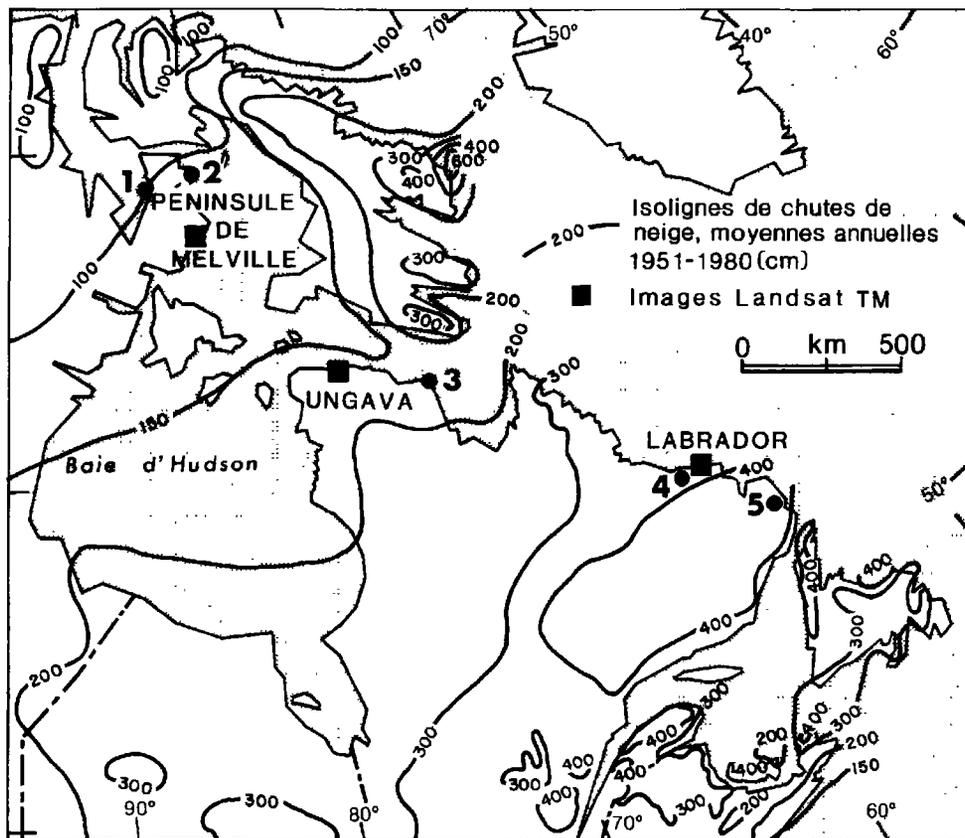


Figure 1. Localisation des régions d'étude; stations météorologiques indiquées sur la carte :
1) Mackar Inlet, 2) Hall Beach, 3) Koartac (Quaqtaq), 4) Hopedale, 5) Cartwright

2. L'extraction de la neige résiduelle sur les images TM

Il existe plusieurs propriétés du couvert nival qui influencent la luminance de la neige. Ces propriétés sont résumées, entre autres, par le contenu en polluants qui affecte la réflectivité pour les ondes courtes et le diamètre des grains de neige qui ont une influence pour les ondes longues du spectre solaire. L'influence de ces paramètres sur la luminance de la neige augmente avec l'âge du couvert nival. Au fur et à mesure que la saison avance et que les températures s'adoucissent, l'état de la congère se modifie. On assiste en surface à une concentration des matières contaminantes ainsi qu'à une augmentation de la taille des grains, ces effets ayant tendance de réduire l'albédo de la neige (HALL and MARTINEC, 1985; FOSTER, 1989). De plus, il existe des problèmes de discrimination entre la neige et d'autres surfaces dans les bandes visible et proche infrarouge du capteur TM, comme par exemple les terrasses de sables et graviers ainsi que les nuages. Une étude effectuée par GRAY *et al.* (1989) pour les pixels d'échantillonnage choisis sur l'image TM d'Ungava suggère TM2, TM4 et TM5 comme bonne combinaison pour la discrimination de la neige par rapport aux autres surfaces (fig. 4). La réponse de la neige dans la bande TM2 (0,52 à 0,60 μ m) est très élevée par rapport



Figure 2. Paysage du nord de l'Ungava mi-juillet 1986

aux autres surfaces, à l'exception des nuages; elle est donc très efficace pour la cartographie de la neige (DOZIER, 1989). La réponse de la neige dans la bande TM4 (0,76 à 0,90 μm) est aussi très élevée par rapport aux autres surfaces, et il peut aussi y avoir confusion avec la réponse du couvert nuageux. Ainsi, l'utilisation de la bande TM5, où la réponse de la neige est très faible, offre une discrimination évidente avec les nuages et elle complète la série de bandes utilisées pour l'analyse multibande de la neige. La figure 3-5a (voir cahier couleur), qui est une image composée couleur des bandes TM2, TM4 et TM5, illustre le contraste de la neige avec les autres surfaces.

3. Traitement de l'image

Le traitement de l'image, dans le but d'extraire les données sur les surfaces résiduelles de neige, s'est fait en deux étapes : le seuillage et la classification

3.1. Le seuillage

La méthode utilisée pour faire l'extraction des surfaces nivales à partir d'images satellitaires est le seuillage des données numériques. Cette technique consiste à segmenter l'espace spectral (données numériques) d'une bande d'une image afin d'isoler les éléments d'intérêts. Les résultats de cette méthode s'illustrent par des images binaires où chaque classe peut faire l'objet de traitements indépendants.

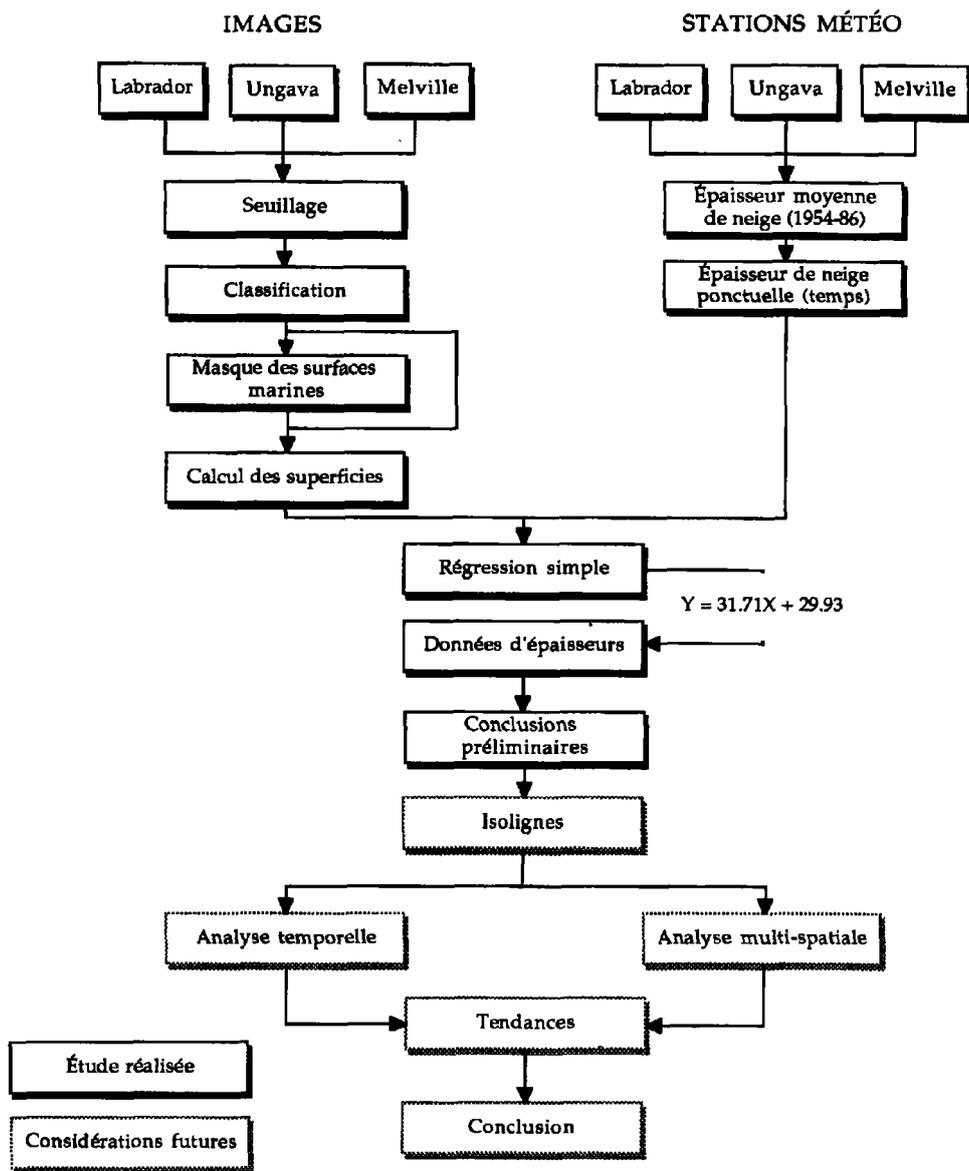


Figure 3. Étapes suivies dans l'étude

Pour ce projet, le seuillage consiste à définir précisément l'espace spectral occupé par la neige pour chacune des trois bandes retenues. Les connaissances *a priori* sur le comportement spectral de la neige nous ont permis d'identifier les sites d'entraînements sur les images satellitaires. La vérification de ces sites a été effectuée à partir de photographies aériennes des régions à l'étude. L'exploration des pixels de neige pour ces sites a permis de fixer les limites spectrales minimales et maximales de la neige pour chacune des bandes de chaque image.

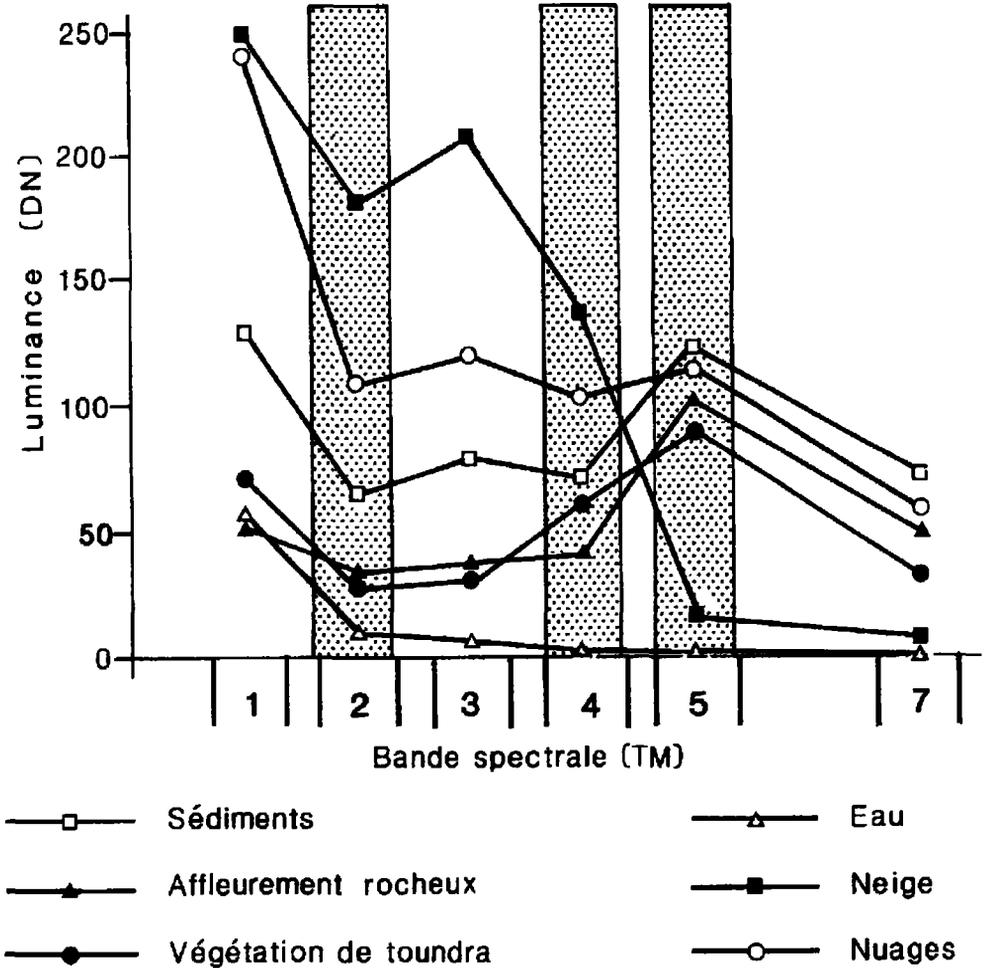


Figure 4. Signatures spectrales de la neige et d'autres surfaces sur l'image TM d'Ungava (tiré de GRAY *et al.*, 1989)

Les variations d'amplitude des données numériques, pour la neige résiduelle en été, sont importantes. Elles sont liées aux variations des caractères physiques des surfaces nivales (principalement aux variations du contenu en contaminants et en eau), à la date d'acquisition des données, qui influence le paramètre précédent, ainsi qu'à la configuration et à la taille des surfaces de neige résiduelle en fonction de la résolution spatiale du capteur.

Les paramètres qui modifient la luminance de la neige ont ici une influence significative considérant que les images de ce projet ont été acquises pendant le mois le plus chaud de l'année. Par conséquent, nous avons défini des valeurs de seuillage pour chaque bande avec une étendue relativement large afin d'englober les pixels de neige impurs (souillés ou mixtes) tant au centre qu'en bordure des congères. Les valeurs de seuillage retenues pour ce projet sont illustrées sur le tableau II.

Tableau II. Valeurs de seuillage (DN) pour la neige sur les images TM

Bandes spectr.	TM2	TM4	TM5
Seuils (DN)	125-255	100-250	5-60

3.2. La classification

Le but de la classification est d'extraire tous les pixels qui répondent aux caractéristiques spectrales de la neige. L'espace spectral des surfaces nivales pour chaque bande ayant préalablement été extrait à l'aide de la technique du seuillage, l'étape subséquente consiste à combiner les espaces spectraux des bandes TM2, TM4 et TM5 afin d'isoler de façon non équivoque les surfaces nivales comme illustrées en jaune sur la figure 3-5b (voir cahier couleur). La classification s'est effectuée à partir d'un opérateur booléen «ET» où la valeur résultante du pixel ne représente pas un nombre réel mais l'état du pixel. Par conséquent, tous les pixels dont les valeurs se retrouvent dans l'espace spectral tri-dimensionnel des bandes TM2 «ET» TM4 «ET» TM5 prennent la valeur de 1. Tous les pixels qui ne répondent pas à ces exigences prennent la valeur de 0. Par la suite, il est d'une simplicité élémentaire d'établir le nombre de pixels de neige par rapport au nombre total de pixels et d'en dériver la superficie. Un module de masquage des surfaces marines (optionnel) a été développé afin de corriger les erreurs amenées par la localisation côtière des images du projet. En effet, ce module est appliqué là où la présence des surfaces marines des images influence le rapport entre la superficie du couvert nival et la superficie des surfaces terrestres seulement.

Une procédure interactive a été développée afin d'automatiser l'extraction des données nivales. Cette procédure fut écrite dans le langage inhérent au logiciel de traitement d'images EASI/PACE. Elle se définit comme suit : a) segmentation des espaces statistiques; b) application de l'opérateur logique «ET» sur les trois bandes et finalement; c) production d'un rapport sur les superficies du couvert nival exprimées en nombre de pixels, en superficie et en pourcentage de l'image. Cette procédure permet d'optimiser en terme de temps l'extraction des données nivales.

4. Relation entre la neige résiduelle et l'épaisseur hivernale

Une régression linéaire simple entre le pourcentage des surfaces résiduelles de neige provenant des données de photographies aériennes et l'épaisseur maximale de neige a été effectuée par LAURIOL *et al.* (1986). Les résultats de cette régression démontrent un coefficient de détermination de 0,86 à un niveau de signification de 99% (fig. 6). La figure 6 illustre aussi la position, dans la relation, des données estimées à partir des images satellitaires et des données météorologiques des stations voisines : 1) Mackar Inlet, 2) Hall Beach, 3) Koartac (Qaqtaq) (fig. 1). Le médaillon de la figure 6 illustre la relation où sont ajoutées les données de l'image du Labrador (dans ce cas les accumulations hivernales sont pour Hopedale [4] et Cartwright [5]).

5. Résultats et discussion

Les résultats sur l'épaisseur du couvert nival estimés à partir de l'équation de LAURIOL *et al.* (1986), utilisant les données nivales extraites des images satellitaires, démontrent une sous-

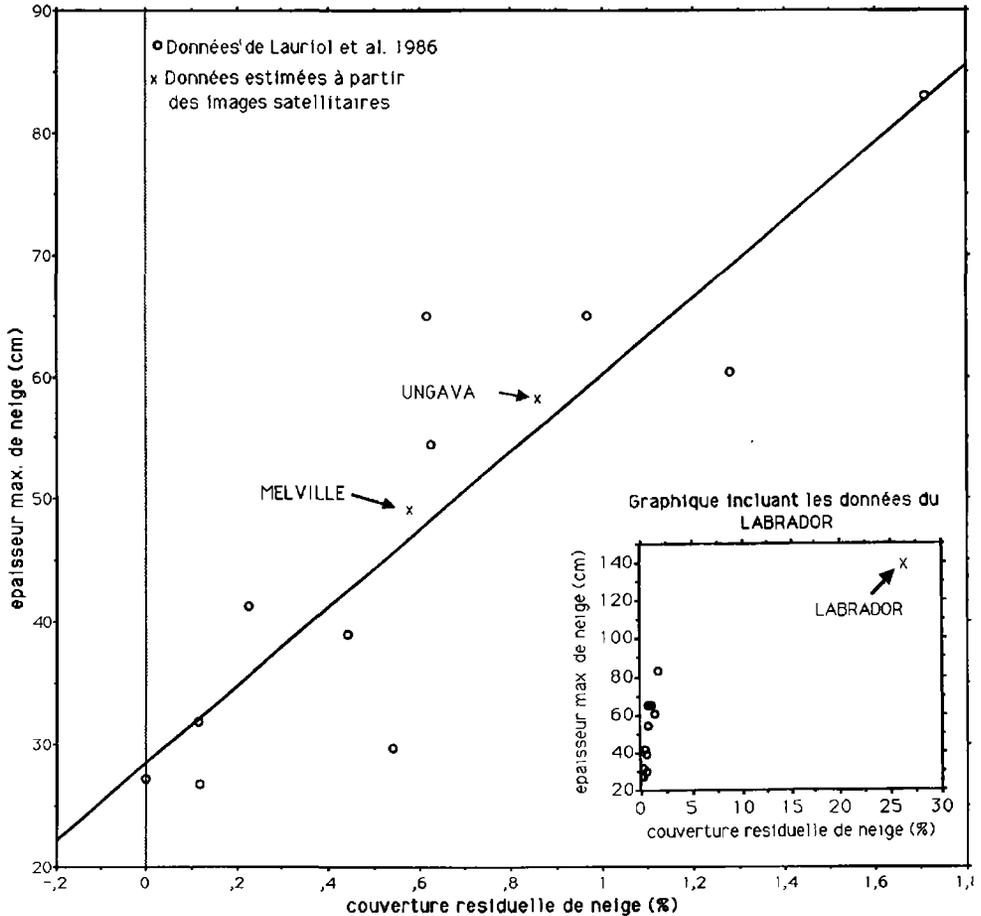


Figure 6. Régression de LAURIOL *et al.* (1986) entre le pourcentage de neige résiduelle en été et l'épaisseur maximale en hiver avec les données de la péninsule Melville et Ungava superposées; en médaillon, l'écart de valeurs pour Labrador

Tableau III. Résultats de l'analyse des accumulations nivales pour la péninsule de Melville et de l'Ungava

	Épaisseur moyenne de neige observée (cm)	Épaisseur de neige estimée (cm)	Différence (cm)	Différence (%)
Ungava	65,0	56,1	8,9	13,6 %
Melville	54,4	48,6	5,8	10,7 %

estimation de 10,7% pour l'Ungava et de 13,6% pour la péninsule de Melville par rapport aux données observées sur le terrain. Les résultats de ces deux sites sont détaillés au tableau III.

Les valeurs extraites de l'image du Labrador ne s'ajustent pas à l'équation de LAURIOL *et al.* (1986); la superficie totale de neige estivale atteignant 26% pour une épaisseur hivernale maximale de seulement 148 cm. Ce non-ajustement des données du Labrador, qui s'exprime

par une couverture nivale importante, s'explique par des chutes de neige importantes créant des accumulations appréciables dans les jours précédant l'acquisition de l'image par le capteur. La couverture nivale n'étant pas une couverture résiduelle représentative des précipitations hivernales cela nous oblige de rejeter l'image du Labrador pour la comparaison des résultats.

Plusieurs problèmes demeurent à résoudre afin d'augmenter l'acuité des paramètres qui s'intègrent dans la relation entre les superficies de neige résiduelle en été et la couverture de neige maximale en hiver. Certains facteurs d'ordre méthodologique ont un effet direct sur l'estimation des superficies de congères, notamment, la détermination des valeurs de seuillage (fonction des propriétés physiques de la neige) et la configuration des congères en relation avec la résolution spatiale du capteur. En fait, les facteurs mentionnés ci-haut rendent difficile la détermination de règles précises de classification automatique pour des régions ayant des propriétés physiographiques et climatiques différentes dans le temps et dans l'espace.

Il existe aussi des problèmes d'ordre purement technique reliés à la résolution spatiale du capteur TM, comparée avec celles des photos aériennes utilisées dans l'étude de LAURIOL *et al.* (1986). La résolution de 30 m s'avère grossière comparativement à la taille des plus petites congères résiduelles qui pourront être ainsi écartées des résumés de superficies de la neige. Il y a probablement aussi sous-estimation le long des bordures des congères classifiées (fig. 3-5b, voir cahier couleur).

Enfin, il existe des problèmes de représentativité des mesures observées aux stations météorologiques. Selon MCKAY et GRAY (1981), il existe toute une gamme de facteurs atmosphériques (vent, température, humidité) et physiographiques (topographie, orientation des versants, couverture végétale) qui influencent l'épaisseur du couvert nivale. Comme les stations météorologiques de l'étude sont éloignées des sites couverts par les images, ces facteurs revêtent une certaine importance.

6. Conclusion

D'après les résultats ressortant de la classification multibande des surfaces résiduelles de neige en été à partir d'images TM de Landsat, il semblerait possible d'estimer, compte tenu des limitations citées, les épaisseurs du couvert de neige hivernale et ainsi des chutes annuelles de neige pour les régions arctiques situées au-delà de la limite latitudinale des arbres. L'estimation des surfaces résiduelles de neige en été, effectuée selon une procédure automatisée, pourrait servir d'indicateur valable des précipitations neigeuses en hiver. Avec cette méthode, il est donc possible d'effectuer ces estimations très rapidement.

Les deux plus grandes limitations pour le suivi annuel, à l'aide d'imagerie satellitaire, du couvert nivale à travers un si grand territoire sont les couvertures de nuages très fréquentes en période estivale ainsi que le coût élevé des images. Par contre, pour des régions plus restreintes, des études annuelles méritent d'être entreprises afin de confirmer la relation entre la neige résiduelle et le couvert hivernal dans le but d'effectuer un suivi des tendances climatiques de l'Arctique canadien.

7. Références

DOZIER, J. 1989. Snow reflectance from Landsat-4 Thematic Mapper. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-22, n° 3, p. 323-328.

- FOSTER, J. L. 1989. The significance of the date of snow disappearance on the Arctic tundra as a possible indicator of climate change. *Arctic and Alpine Research*, vol. 21 (1), p. 60-70.
- GRAY, J. T., LAURIOL, B., BRUNEAU, D. and BRIAND, P. 1989. Residual snow patch mapping in Arctic Canada using Landsat TM images. *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing*, vol. 2, p. 562-565.
- HALL, D. K. and MARTINEC, J. 1985. *Remote sensing of ice and snow*. Chapman and Hall, London. 189 p.
- LAURIOL, B., CARRIER, Y., BEAUDET, H., and BINDA, G. 1986. The residual snow cover in the arctic in July : A means to evaluate the regional maximum snow depth in winter. *Arctic*, vol. 39, p. 309-315.
- MCKAY, G. S., and GRAY, D. M. 1981. The distribution of snow cover. *Handbook of Snow*, Pergamon Press, chap. 5, p. 153-190.

4

La carte morphostructurale de l'Ituri oriental (nord-est du Zaïre) : étude à partir de données satellitaires TM de Landsat

MOKILI MBULUYO* et **, ANDRÉ OZER** et JOHAN LAVREAU***

**Département de géographie et sciences naturelles, Institut supérieur pédagogique de Buta, B. P. 106, Buta, Haut-Zaïre, Zaïre*

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

****Musée royal d'Afrique centrale, Laboratoire de télédétection, chaussée de Louvain, 3080 Tervuren, Belgique*

Résumé

Cette étude vise à déterminer les conséquences de la tectonique, liée à la formation du rift occidental africain, sur la morphologie du nord-est du Zaïre. L'utilisation des données satellitaires TM de Landsat, appuyée par les observations de terrain, permet une analyse complète et quantitative des principaux traits structuraux de la région et autorise une délimitation de secteurs à lithologie semblable. Les différents traitements numériques des données satellitaires se résument de la manière suivante : 1) correction atmosphérique et étalonnage en réflectance, 2) réduction des effets d'ombre portée par la méthode du logarithme résiduel, 3) analyse en composantes principales, 4) dérivation d'images et composition colorée, 5) compilation numérique des cartes résultantes. Grâce à la vue globale que permet la télédétection, une carte morphostructurale à l'échelle de 1:100 000 a pu être dressée. Elle montre une typologie des escarpements qui délimitent ainsi des zones en place, effondrées ou surélevées. Ce compartimentage de l'Ituri constitue une reproduction, à l'échelle réduite, de la tectonique du rift qui caractérise toute cette partie de l'Afrique centrale.

1. Introduction

L'étude présentée ici fait suite aux travaux préliminaires réalisés dans le cadre de recherches en géomorphologie structurale de la région de l'Ituri oriental. Celle-ci, située dans la partie nord-est du Zaïre, couvre un territoire d'environ 8000 km² et s'étend, approximativement entre 1°10' et 2°15' de latitude N et entre 29°40' et 30°50' de longitude E. Ses limites naturelles occidentale et orientale correspondent respectivement à la rivière Ituri et au lac Mobutu (fig. 1).

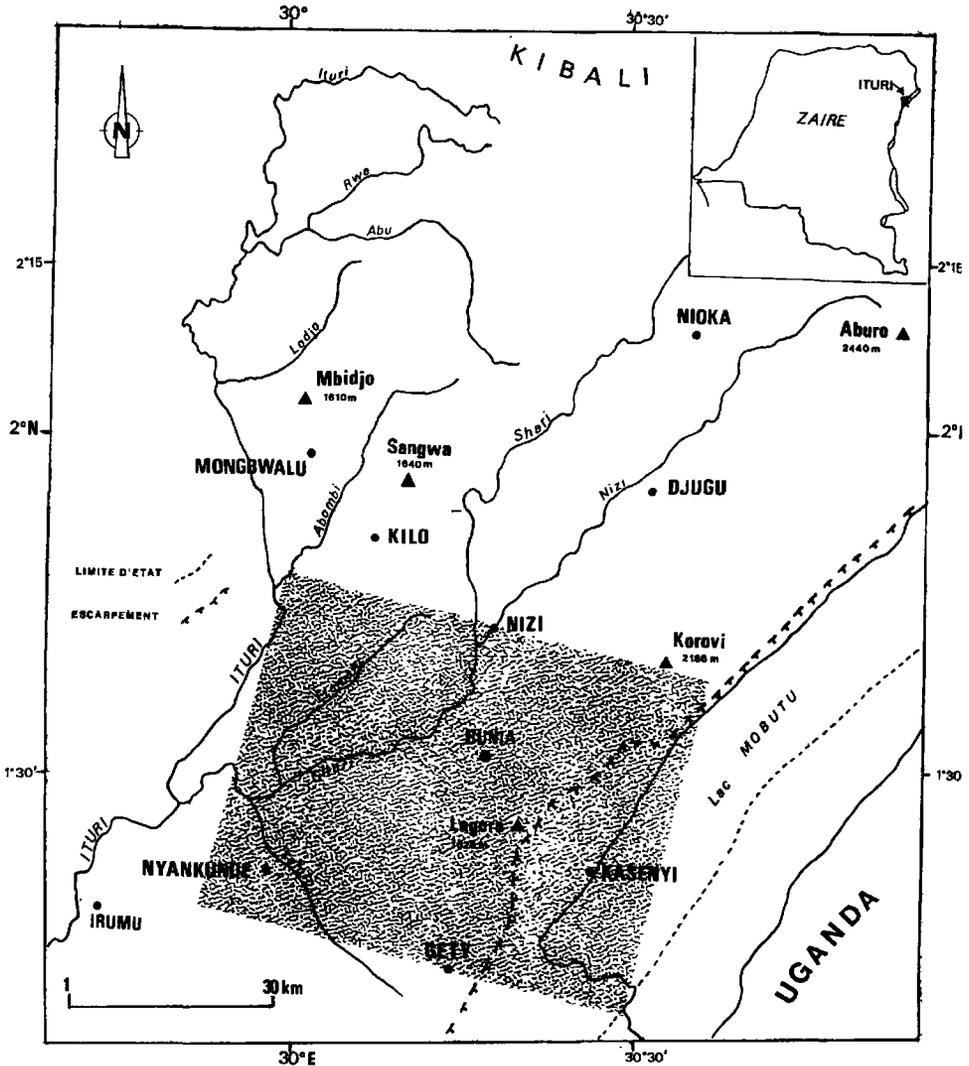


Figure 1. Carte de localisation de l'Ituri oriental; la zone tramée correspond à la sous-scène étudiée

Morphologiquement, elle fait partie de la zone du rift de l'Afrique centrale. Son relief est constitué de collines dont les sommets sont étroits et aplanis. Vus de loin, ces sommets forment une série de plates-formes ou de plateaux plus ou moins étagés qui témoignent de l'existence de surfaces topographiques anciennes. L'altitude générale de celles-ci augmente du sud-ouest (1086 m à Nyankunde) vers le nord-est (2166 m à Korovi). Ce relèvement de la région vers le nord-est trouve son explication essentiellement dans les mouvements tectoniques tertiaires contemporains à la formation du graben albertin (lac Mobutu).

Les mouvements tertiaires ont provoqué des dislocations dans toute la région, si bien que la détermination de leurs conséquences sur la morphologie a depuis très longtemps été la préoccupation principale des chercheurs qui se sont intéressés à la géomorphologie du nord-est du Zaïre (LEPERSONNE, 1949, 1956; RUHE, 1954; MOEYERSONS, 1975; MBULUYO, 1987, 1991). Bien souvent, l'origine des différents talus inventoriés dans l'Ituri a constitué l'objet de nombreuses controverses.

Cette étude aborde la question du rapport entre la tectonique et la morphologie de la région considérée et présente les résultats de l'analyse morphostructurale menée à partir des données satellitaires (Thematic Mapper de Landsat 4). La morphostructure est considérée ici comme un ensemble de formes de relief particulièrement grandes (d'échelle hectométrique à kilométrique) dans lesquelles le rôle de la structure ou des mouvements tectoniques demeure prépondérant. L'analyse est appliquée à la partie méridionale de l'Ituri (zone tramée, fig. 1) dont les images satellitaires offrent les meilleures conditions d'observation et pour laquelle, les données contrôlées de différentes campagnes de terrain sont suffisamment nombreuses et bien localisées.

2. Le cadre géologique

Dans la région étudiée, on distingue deux grandes unités lithostratigraphiques :

- sur les plateaux ainsi que dans la plaine de Bunia, les roches appartiennent au soubassement précambrien, localement rapportées au groupe du Kibali et au complexe gneissique (Archéen) Ouest-nilien. Elles sont formées de schistes, d'amphibolites, de gneiss et de divers granites généralement intrusifs. Un faisceau d'intrusions doléritiques, associé aux différents épisodes tectoniques ayant affecté la région, recoupe les formations précambriennes sous forme de dykes;

- dans la plaine de Kasenyi, par contre, affleurent des sédiments plus récents, datant du Tertiaire à l'Actuel. Dans toute la zone du rift, ils sont groupés en deux principaux étages bien définis : le plus ancien, dénommé formation de Kaïso, date du Plio-Pléistocène; cette formation est constituée de grès tendres et de sables fins et grossiers; le plus récent, appelé formation de Semliki, correspond au Quaternaire moyen et se compose de sables et de graviers.

Du point de vue tectonique, l'Ituri oriental fait partie des zones actives du rift de l'Afrique centrale caractérisées par de nombreuses failles radiales. Certaines d'entre elles, très anciennes, datant du Paléozoïque (VILLENEUVE, 1983), se sont vues réactivées, tout le long du Tertiaire, lors de la formation du fossé albertin. Cette activité tectonique se traduit actuellement par de nombreuses terrasses lacustres formées dans les dépôts quaternaires et récents.

3. Méthode et matériel utilisés

3.1. Les données initiales

Les images utilisées ont été enregistrées le 1^{er} juin 1989 par le capteur TM de Landsat 4 à la demande conjointe du Laboratoire de géomorphologie tropicale de l'Université de Liège et du Département de géologie et de minéralogie du Musée royal d'Afrique centrale de Tervuren. Elles correspondent à la scène n° y4251207464X0 qui couvre approximativement 32 400 km². Toutefois, à cause de la couverture nuageuse relativement importante dans le secteur nord de la région, nous avons utilisé uniquement la sous-scène méridionale de dimension 2 048 par 2 048 pixels (résolution nominale de TM = 28,5 m) soit une superficie d'environ 3 500 km². Les divers traitements d'images et la réalisation automatique des cartes ont été respectivement exécutés à l'aide des logiciels GM-PCIMAGE et AUTOCAD.

3.2. Les prétraitements des images numériques

Les prétraitements sont choisis en fonction des caractéristiques de la sous-scène utilisée. Bien qu'au départ, celle-ci présentait une quantité considérable d'informations, les prétraitements s'avéraient nécessaires, afin de mieux faire apparaître les propriétés spectrales des objets étudiés.

3.2.1. La correction atmosphérique et l'étalonnage en réflectance

Une correction pour les effets de l'atmosphère peut être réalisée au travers d'un modèle atmosphérique. Les valeurs de la luminance enregistrées par le satellite peuvent ensuite être converties en mesures physiques telle la réflectance du pixel au sol. Pour ce faire, nous avons utilisé le programme 5S proposé par TANRÉ *et al.* (1987) qui permet d'estimer la luminance au satellite ou une cible au sol de dimension déterminée, placée dans un environnement de réflectance connue éventuellement différent de la cible. La luminance au satellite a ensuite été exprimée en DN en se basant sur la table de quantification des signaux fournie par EOSAT, en considérant qu'une cible de dimension infinie et de réflectance 1 aurait un DN de 255. Ces nouvelles valeurs de DN étant des valeurs physiques, elles peuvent être utilisées comme telles dans les raisonnements portant sur la comparaison entre DN dans les différentes bandes spectrales.

3.2.2. Le logarithme résiduel («log. residual») de la luminance

C'est une approche semi-quantitative de traitement d'images développée par GREEN and GRAID (1985). Elle est basée sur l'idée que la valeur de la luminance varie en fonction de la topographie (T), de la réflectance de la cible (R) et de l'illumination de la scène (I).

$$DN = T \cdot R \cdot I$$

Le facteur T se manifeste par l'ombre portée et par la clarté des différentes surfaces en rapport avec leur lambertianité. Dans une région accidentée comme l'Ituri, ce facteur T joue un rôle déterminant dans la réduction des effets de discontinuité essentiellement dus à l'ombre. Il varie d'un pixel à l'autre.

Le facteur R de la formule qui indique le rapport entre l'énergie réfléchiée et l'énergie incidente pour une longueur d'onde donnée c'est-à-dire la réflectance des cibles. Pour les sols,

ce facteur dépend surtout de l'humidité, de la teneur en carbonate, en fer et en matières organiques.

Le facteur I concerne l'éclairement solaire; il est relativement constant pour toute l'image. Il varie cependant notamment en fonction de l'état global de l'atmosphère et de la longueur d'onde.

En mettant en relation les trois facteurs considérés par une série de transformations logarithmiques, on déduit l'équation suivante exprimant la luminance c'est-à-dire à un facteur d'étalonnage près, la valeur numérique (DN) de chaque pixel dans chacun de canal du TM :

$$\text{Log Res} = \log \text{DN}_{i\lambda} - \log \overline{\text{DN}}_i - \log \overline{\text{DN}}_\lambda + \log \overline{\text{DN}}$$

où

$$\log \text{DN}_{i\lambda}$$

est le logarithme de la valeur de chaque pixel i dans chaque bande spectrale λ ;

$$\log \overline{\text{DN}}_i$$

correspond au logarithme de la moyenne inter-pixel dans chaque bande spectrale;

$$\log \overline{\text{DN}}_\lambda$$

est le logarithme de la moyenne inter-bande, inter-pixel;

$$\log \overline{\text{DN}}$$

désigne la moyenne des moyennes précédentes.

L'application de ce traitement permet, dans une certaine mesure, de corriger (ou d'atténuer) les effets combinés de l'éclairement et du relief.

3.3. Les traitements effectifs

3.3.1. L'analyse en composantes principales

Le calcul des composantes principales a été effectué sur les images pré-traitées en correction atmosphérique et en logarithme résiduel. Les trois premières composantes expliquent 99,7% de la variance observée parmi lesquelles la première composante principale détient 80,5%. Ce premier axe apparaît, par conséquent, comme une sorte de moyenne des variables originelles de TM (tab. I). Les deux axes suivants expliquent respectivement 15,4% et 3,8%. Les images résultantes de ces derniers axes, n'ont pas apporté plus d'informations que celles qui figurent sur l'image du premier axe. Quant au quatrième axe, qui présente 0,3% de la variance, son image est fortement bruitée. Les images de ces trois derniers axes, pour les raisons évoquées plus haut, n'ont pas été, par conséquent, considérées dans la suite de l'étude.

3.3.2. La dérivation d'images

Afin de rehausser les discontinuités structurales, but recherché par la présente étude, plusieurs filtres (tab. II) de type Sobel et Prewitt (SCHOWENGERDT, 1983) ont été testés, d'abord sur l'ensemble de l'image, ensuite sur des fenêtres de 512 par 512 pixels. Les opérateurs matriciels choisis ont été appliqués successivement sur l'image brute et sur celles qui sont traitées en

Tableau I. Données statistiques de la sous-scène (2048 par 2048 pixels) de l'Ituri, après filtrage des zones nuageuses

Canal	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	
Longueur d'onde (µm)	450 - 520	520 - 600	630 - 690	700 - 900	1550 - 1750	2080 - 2350	
Valeurs des TM							
Moyenne	79,04	33,01	34,35	81,06	84,23	34,68	
Écart-type	5,91	3,68	6,30	11,44	17,89	11,11	
Matrice de corrélation linéaire							
TM1	1,000	0,819	0,810	-0,144	0,740	0,737	
TM2		1,000	0,900	-0,021	0,815	0,755	
TM3			1,000	0,282	0,867	0,886	
TM4				1,000	-0,135	-0,363	
TM5					1,000	0,936	
TM7						1,000	
Matrice des variances-covariances							
TM1	371,33	304,29	418,37	202,40	473,00	345,92	
TM2		266,67	354,91	198,11	362,00	267,98	
TM3			484,88	243,28	526,97	388,29	
TM4				461,56	165,24	119,00	
TM5					738,44	549,45	
TM7						399,60	
Analyse des composantes principales (CP) : poids des vecteurs (sur base des variances-covariances) et pourcentage de contribution							
CP1	0,401	0,326	0,455	0,224	0,558	0,403	80,5%
CP2	0,045	0,140	0,095	0,880	-0,365	-0,248	15,4%
CP3	-0,357	-0,418	-0,440	-0,415	0,526	0,231	3,8%
CP4							0,3%

composantes principales notamment sur la première composante qui exprime, comme décrit ci-haut, 80,5% de la variance globale. Pour l'ensemble de l'image, les résultats de filtrage provoquent un lissage important alors que sur les fenêtres choisies, ils sont de loin meilleurs.

3.3.3. La composition colorée TM5 - TM4 - TM1

La composition colorée TM5 - TM4 - TM1 (fig. 4-2, voir cahier couleur) a été réalisée sur les images prétraitées en logarithme résiduel. Au regard de la faible corrélation existant entre certains canaux initiaux (tab. I), la composition colorée TM5, TM4 et TM1, en rouge, vert et bleu, a donné une image fortement améliorée par rapport aux compositions colorées des images TM brutes.

Tableau II. Opérateurs matriciels utilisés (SCHOWENGERDT, 1983)

Directions	Filtres
Est-Ouest (Sobel "A")	-1 -2 -1
	2 4 2
	-1 -2 -1
Nord-Sud	-1 2 -1
	-2 4 -2
	-2 -2 1
NO-SE	-2 -1 -2
	-1 4 -1
	-2 -1 2
NE-SO	-2 -1 2
	-1 4 -1
	2 -1 -2
ONO-ESE	1 -2 -2
	1 4 1
	-2 -2 1
NNO-SSE	1 1 -2
	-2 4 -2
	-2 1 1
NNE-SSO	-2 1 1
	-2 4 -2
	1 1 -2
Prewitt	1 1 1
	-1 -2 1
	-1 -1 1

À partir de ces images améliorées, ainsi que celles obtenues selon les traitements décrits sommairement plus haut, plusieurs cartes des discontinuités ont été dressées par interprétation visuelle. Celles-ci ont été rassemblées en une seule carte de synthèse. Trois principales étapes ont été nécessaires pour cette élaboration : 1) compilation des calques d'interprétation (1:100 000) des images améliorées; 2) numérisation de cette carte par le logiciel AUTOCAD qui offre la possibilité à la fois de tracer des limites de discontinuités (lithologiques et linéamentaires) ainsi que leurs calculs statistiques; 3) superposition de la carte résultante, à l'aide de l'équation de redressement à partir d'amers connus (coordonnées géographiques et rectangulaires de la triangulation de la région de Kilo-Moto et lac Albert, 1936), avec la carte topographique numérisée. La carte finale obtenue est interprétée sur la base de données recueillies à la fois sur le terrain et sur les divers documents d'archives.

4. Interprétation et discussion des résultats

4.1. Interprétations lithologique et morphologique

Sur la composition colorée TM5-TM4-TM1 des logarithmes résiduels (fig. 4-2, voir cahier couleur), on reconnaît grâce aux aspects de surface (texture dense ou lâche), deux grands ensembles qui correspondent respectivement aux terrains anciens du socle (Précambrien) et aux dépôts récents (Néogène à Actuel) de la plaine de Kasenyi. Les deux entités lithologiques sont séparées par un escarpement de graben à forte dénivellation topographique et dont les versants sont incisés par de nombreuses vallées plus ou moins rectilignes.

La morphologie est remarquablement bien mise en évidence ainsi que les différents modelés associés à chaque type lithologique connu. Les terrains granitiques présentent un relief doux caractérisé par des vallées peu encaissées et un réseau hydrographique lâche alors que les roches métamorphiques (principalement schistes et amphibolites) se caractérisent par une morphologie accidentée et découpée par un réseau hydrographique profondément encaissé et dense.

Les autres formations lithologiques telles que les dolérites qui se présentent en nappes ou dykes et les itabirites (quartzites ferrifères) sont reconnaissables par leur texture typique et par leur relief vigoureux. Elles traduisent par leur morphologie, les aspects locaux de l'érosion différentielle rencontrée dans la région.

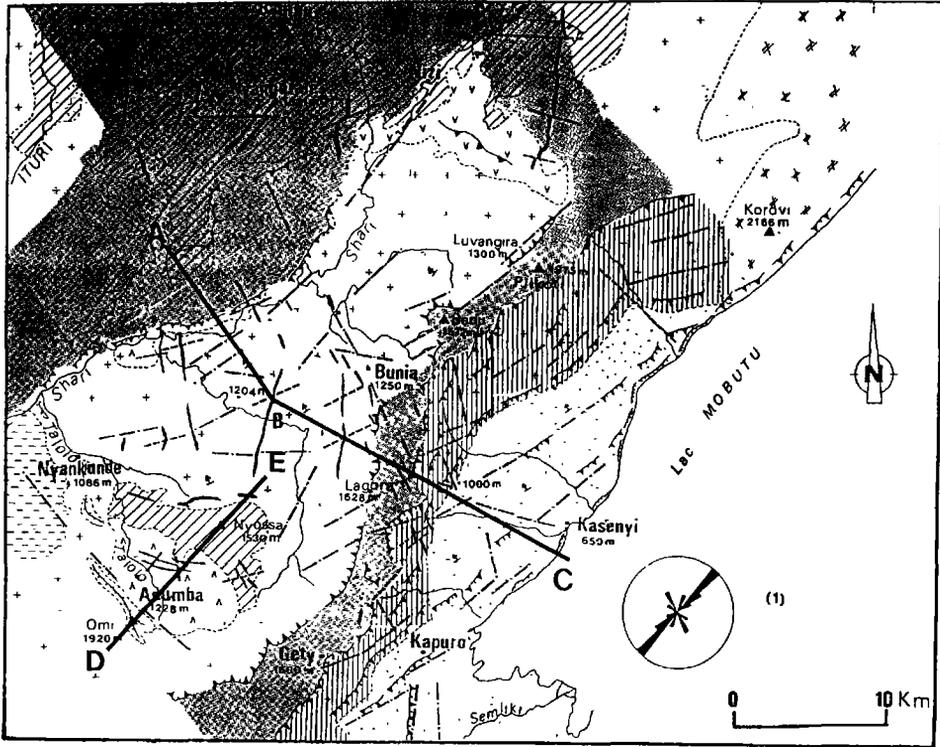
Dans la plaine de Kasenyi, l'image permet de distinguer différentes formations superficielles qui peuvent, selon la connaissance du terrain, être associées à la formation de Kaiso (Plio-Pléistocène) ou la formation de Semliki (Quaternaire moyen). Quant aux dépôts récents (sub-actuels et actuels), ils sont parfaitement rehaussés et on y reconnaît des paléo-réseaux qui constituent des véritables témoins de mouvements tectoniques récents dans la région.

4.2. Significations tectoniques des linéaments et typologie des escarpements

La carte télé-interprétative (1:100 000) issue des calques des images améliorées et de leur superposition sur les documents topographiques existants (IGCB, 1955) donne un aperçu de synthèse relatif à la morphostructure de l'Ituri oriental (fig. 3). Cette esquisse cartographique présente également la rosace de principales orientations des linéaments et en complément, deux coupes topographiques schématiques (fig. 4) utiles pour son interprétation. On y reconnaît sans ambiguïté plusieurs unités morphostructurales séparées par deux types d'escarpements. Les plus importants de ceux-ci ont fait l'objet de contrôle *in situ* et leur détermination se fait selon les techniques préconisées dans les travaux de LAGASQUIE (1989) et LAGEAT (1989).

4.2.1. Les abrupts lithologiques

Moins importants que les abrupts de faille (voir plus loin), les abrupts lithologiques sont associés à la présence de roches de résistance différente telles que les itabirites, les dolérites massives et les amphibolites. Certains d'entre-eux se superposent aux talus tectoniques comme c'est le cas pour l'escarpement de Nyangaraie. Ce talus, à pente très adoucie, s'est formé aux dépens des schistes du Kibalien (supérieur) relativement moins résistants que les amphibolites massives (Kibalien inférieur) du niveau sous-jacent.



LÉGENDE

GÉOLOGIE

- Sables et graviers (Plio-Quaternaire)
- Dolomites et grès d'Irumu (Primaire)
- Granite
- Schistes du Kibalien (Précaibrien inférieur)
- Amphibolites du Kibalien (Précaibrien inférieur)
- Gneiss (Précaibrien inférieur)
- Nappes de dolérites

TECTONIQUE

- Failles
 - Fracturation
 - Dykes doléritiques
- } failles et linéaments par télédétection et photogéologie

UNITÉS MORPHOSTRUCTURALES

- Abrupts dérivés de failles
- Abrupts lithologiques
- Zones d'escarpement
- Zones surélevées
- Zones effondrées
- Reliefs de résistance différentielle (itabirites et quartzites)
- Niveau altimétrique local
- Pente topographique
- Sommets
- Coupes topographiques (fig. 4.1 et 4.2)
- Rosace directionnelle des discontinuités linéamentaires (1)

Figure 3. Les unités morphostructurales de l'Ituri oriental et les reliefs associés avec la rosace directionnelle des discontinuités relevées sur les différents documents satellitaires

Un autre abrupt lithologique reconnu sans équivoque, est celui qui forme une barrière incurvée limitant vers le nord la plaine de Bunia-Irumu. Il se prolonge vers le nord-ouest, en direction de Bambu, par une série des crêtes courtes et parallèles.

4.2.2. Les abrupts dérivés de failles

Ils sont reconnaissables par leur allure relativement rectiligne et par leur direction parallèle aux failles télédéetectées (LAVREAU, 1976; MUKONKI, 1980; MBULUYO et LAVREAU, 1989) qui sont localisées généralement en contrebas de l'escarpement.

Sur la carte, les abrupts tectoniques les plus importants sont situés près du fossé et atteignent une dénivellation supérieure à 100 m (talus de Bedu à l'est de la plaine de Bunia); la dénivellation peut être appréciée par le déplacement des dykes qui ont fidèlement enregistré les mouvements relatifs.

Ailleurs, dans les zones éloignées du graben, ces talus sont d'amplitude relativement faible et parfois, dans les roches moins résistantes, fortement modifiés par l'érosion. On les identifie, sur le terrain, par l'orientation des diaclases qui est perpendiculaire à la direction de la faille.

Dans la plaine de Kasenyi, les talus tectoniques sont de faible ampleur et correspondent à de petits ressauts rectilignes (généralement moins de 4 m) en contrebas desquels se forment actuellement des micro-cônes de déjection et des aires dépressionnaires occupées saisonnièrement par des eaux stagnantes. Le long du lac, ces ressauts se terminent par des falaises vives atteignant la dizaine de mètres.

4.2.3. Les unités morphostructurales

Les plus importantes sont de taille kilométrique et sont représentées sur la carte par des compartiments topographiques découlant des mouvements de différenciation tectonique. Les escarpements qui les limitent sont sans exception des talus tectoniques. On peut distinguer deux principales zones d'effondrement séparées par une série de horsts dont certains atteignent des altitudes considérables (monts Plikoti, 1975 m; Bedu, 1572 m; Lagora, 1628 m; Gety, 1600 m). Sur les coupes topographiques schématisées (fig. 4), elles sont nettement individualisées.

La principale zone d'effondrement est la plaine de Kasenyi à l'est de la région. Elle fait partie des grabens du système du rift de l'Afrique centrale considérés d'âge tertiaire. Plusieurs failles post-kaiso (Pléistocène), signalées plus haut, recourent les formations fluvio-lacustres. À l'ouest des horsts s'étend la plaine de Bunia. Elle constitue également un graben mais d'amplitude relativement faible. Son alignement par rapport au graben d'Irumu, d'âge précambrien permet, de lui attribuer le même âge. Le soulèvement du Tertiaire a provoqué son basculement, ce qui explique que dans cette plaine, l'orientation générale des cours d'eau est du SSE vers le NNO.

Enfin une zone d'effondrement de dimension très réduite est le graben de Talolo au sud-ouest de la région. Elle est séparée de la plaine de Bunia par le horst du mont Nyossa (1533 m).

Des cas similaires d'unités morphostructurales d'échelle variable peuvent être mis en évidence dans toute la région et soulignent l'importance de la tectonique cassante dans la mise en place de grands volumes morphologiques.

5. Conclusion

Cette étude montre le rôle prépondérant de la tectonique sur la morphologie de l'Ituri. Dans les secteurs de la région où la géologie est suffisamment connue comme dans ceux dont les

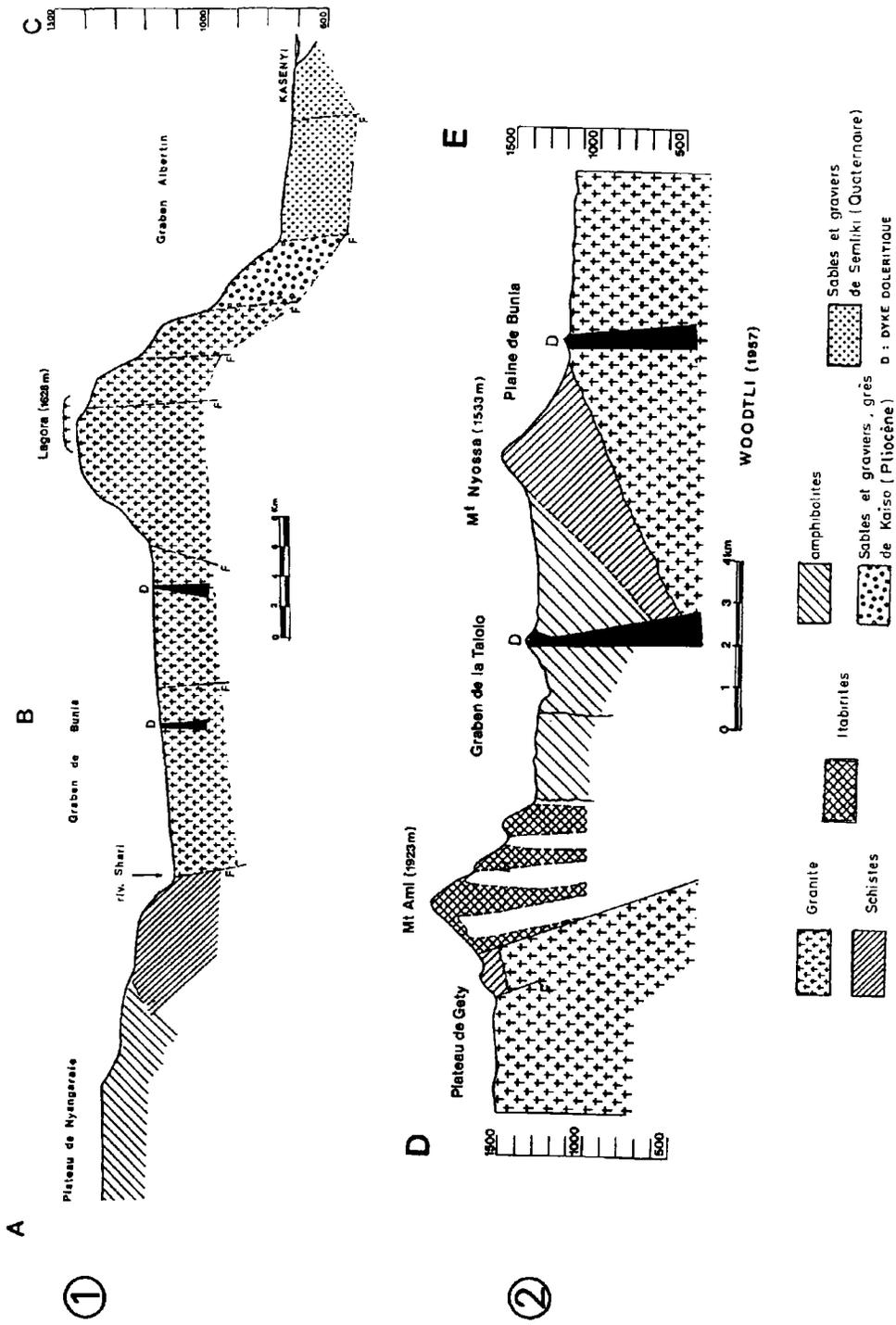


Figure 4. Coupes topographiques schématiques de l'Ituri oriental

connaissances géologiques sont encore peu avancées, chaque type d'analyse ou traitement d'images a apporté de nouveaux éléments complémentaires pour une meilleure compréhension de la structure géologique. La télédétection a privilégié particulièrement deux domaines de la cartographie.

Du point de vue de la cartographie géologique, la carte interprétative des documents satellitaires TM donne des résultats pertinents pour la reconnaissance de formations lithologiques de l'Ituri particulièrement dans les zones situées en dehors des secteurs miniers et où les cartes sont schématiques et sommaires. En dépit de limites lâches ou douteuses dans certaines de ces zones, les cartes obtenues constituent de véritables tests de fiabilité des différents documents cartographiques utilisés dans le travail et sur lesquels on peut désormais s'appuyer avec certitude.

À partir de différentes plages lithologiques identifiées sur les documents satellitaires, la reconnaissance de la morphologie et de différents modelés associés aux principales formations lithologiques de la région a été facilitée. L'identification de ces différents aspects du paysage s'est révélée de très grande utilité lors de la campagne de terrain en donnant un cadre plus précis à nos observations in situ.

Du point de vue de la cartographie structurale, les images satellitaires (Landsat TM) ont mis en évidence deux systèmes orthogonaux de dislocation datant d'épisodes tectoniques différents :

- des fractures NNO-SSE caractérisées dans la plupart des secteurs de l'Ituri par des intrusions de dolérite. Elles sont les plus anciennes puisque les intrusions sont légèrement métamorphiques (un âge radiométrique minimum d'environ 800 millions d'années a été obtenu, PASTEELS, communication personnelle). Cet âge ancien constitue la limite à partir de laquelle les accidents rhéomatiques de cette orientation ont cessé d'être très actifs;

- des fractures NNE-SSO qui localement deviennent ENE-OSO. Elles coupent les fractures anciennes liées aux intrusions doléritiques, ce qui prouve leur postériorité par rapport à ces dernières. Ce second épisode tectonique majeur a connu son grand développement à l'Eocène au moment de la mise en place définitive du graben albertin. Ce mouvement tectonique se poursuit encore de nos jours par le soulèvement du bord occidental du fossé (d'où son profil dissymétrique) et par la création, dans les séries sédimentaires plio-quadernaires à l'intérieur de celui-ci, de demi-grabens à profil asymétrique.

Ces deux systèmes de dislocation sont, à l'origine, des failles radiales qui délimitent des blocs de dimensions très variables et qui confèrent, à la région étudiée une structure tectonique en damier. Considérant l'ensemble de territoires voisins du rift, le découpage de l'Ituri oriental constitue la reproduction, à l'échelle réduite, de la tectonique générale du rift africain.

6. Références

- IGCB (Institut géographique du Congo belge) 1955. Atlas topographique de Kilo-Moto, 12 planches.
- GRENN, A. A. and GRAID, M. D. 1985. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals. Proceeding of the First Airborne Imaging Spectrometer data Analysis Workshop, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, p. 111-119.
- LAGASQUIE, J. J. 1989. Fracturation et étagement des surfaces d'érosion dans un socle : l'exemple de Millas (Pyrénées-orientales). Bulletin de l'Association des géographes français, Paris, n° 1, p. 36-41.
- LAGEAT, Y. 1989. Notion de la forme structurale dans les socles. Bulletin de l'Association des géographes français, Paris, n° 1, p. 3-11.

- LAVREAU, J. 1976. Étude photogéologique de la région de Djugu-Mahagi-lac Mobutu (nord-est du Zaïre) et Uganda. Département de géologie et de minéralogie, Musée royal d'Afrique centrale, Tervuren, Belgique, rapport annuel 1975, p. 113-121.
- LEPERSONNE, J. 1949. Le fossé tectonique lac Albert-Semiliki-lac Edouard : résumé des observations géologiques effectuées en 1938-1939-1940. Annales de la Société géologique de Belgique, n° 71, p. 1-92.
- LEPERSONNE, J. 1956. Les aplanissements d'érosion du nord-est du Congo belge et des régions. Académie des sciences coloniales, Sciences naturelles et médicales, 108 p.
- MBULUYO, M. K. 1987. Les formations superficielles du bassin de Mongwalu, contribution à la connaissance géomorphologique du Haut-Ituri (nord-est du Zaïre). Mémoire de maîtrise en géologie de terrains superficiels, Université de Liège, 55 p.
- MBULUYO, M. K. 1991. Les principales entités géomorphologiques de l'Ituri oriental et les faciès cuirassés associés. Hommage au professeur J. Alexandre, Afrique centrale : géomorphologie et géologie récente, Bulletin de la Société géographique de Liège, n° 27, 139-149.
- MBULUYO, M. K. et LAVREAU, J. 1989. Apport de la télédétection à la connaissance de grands traits structuraux du bassin du Haut-Ituri (nord-est du Zaïre). Département de géologie et de minéralogie, Musée royal d'Afrique centrale, Tervuren, Belgique, rapport annuel 1987-1988, p. 165-172.
- MOEYERSONS, J. 1975. Les surfaces d'aplanissement et les cycles géographiques dans le nord-est du Zaïre. Annales de la Société géologique de Belgique, n° 98, p. 439-448.
- MUKONKI, M. 1980. Application de la télédétection à l'étude du système des fossés de l'Est Africain. Thèse, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris VI, 2 tomes, 97 + 168 p.
- RUHE, R. V. 1954. Erosion surfaces of central African high plateaus. Publication de l'Institut national des études agronomiques au Congo, série scientifique, n° 54, 38 p.
- SCHOWENGERDT, R. A. 1983. Techniques for image processing and classification in remote sensing. Academic Press, 49 p.
- TANRÉ, D., DEROC, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J. J., PERBOS, J. and DESCHAMPS, P. Y., 1987. Simulation of the satellite signal in the solar spectrum (5S). 149 p.
- VILLENEUVE, M. 1983. Les sillons tectoniques du Précambrien supérieur dans l'est du Zaïre; comparaison avec les directions du rift-est Africain. Bulletin du Centre de recherche et d'exploitation du pétrole, vol. 7, n° 1, p. 163-174.

5

Comparaison de différentes méthodes de rapports de bandes pour l'application de la télédétection satellitaire à la reconnaissance géomorphologique d'un milieu montagneux subarctique semi-aride

JANINE SOMMA et FRANÇOIS CAVAYAS

Département de géographie, Université de Montréal, C. P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, Canada, H3C 3J7; téléphone : (514) 343-8016; télécopieur : (514) 343-8008

Résumé

L'application de la télédétection à la reconnaissance géomorphologique nécessite deux sortes d'analyse : l'une de type statistique pour la cartographie automatique des matériaux, l'autre de type visuel pour l'identification des formes d'érosion et de dépôt. En terrain montagneux, il est, de plus, important d'éliminer les effets d'ombre afin de maximiser le rendement des données. La méthode de rapports de bandes dirigés de CRIPPEN *et al.* (1988) prenant en compte un objet de faible ratio a été testée et modifiée à cette fin sur l'image MSS d'une région semi-aride et montagneuse du nord du Labrador. Les modifications ont été réalisées par la prise en compte : 1) de n'importe quel objet; 2) de plusieurs objets à la fois; et 3) par l'ajout d'une constante dans les zones d'ombre. Ces trois méthodes offrent des résultats équivalents. La dernière s'avère cependant plus intéressante parce que plus rapide d'exécution et parce que ses résultats visuels sont plus attrayants. Expérimentée sur l'image TM d'une autre région, elle a permis de réduire significativement les écarts d'intensité lumineuse entre ombres et zones éclairées. Bien qu'inaptes à corriger également toutes les parties de l'image, ces procédures sont utiles pour le traitement des données avant la classification automatique des matériaux.

1. Introduction

Il est déjà bien établi que l'imagerie satellitaire peut être d'un secours appréciable pour la compréhension des phénomènes étudiés en sciences de la terre et de l'environnement. La reconnaissance géomorphologique demeure cependant un des rares domaines où le potentiel de cette imagerie n'a pas encore été étudié à fond. En effet, les quelques recherches effectuées jusqu'à présent sur ce sujet ne traitent pas le problème dans sa globalité qui est à la fois identification des matériaux en présence et caractérisation des formes d'érosion et de dépôt (JONES, 1986; MILLINGTON *et al.*, 1986; HAYDEN, 1986; CLÉMENT *et al.*, 1983; DEAN and MORISSEY, 1988; SIEGAL and GILLESPIE, 1980). Les recherches portant sur un terrain montagneux semi-aride visaient le développement d'une méthodologie d'analyse d'images couvrant ces deux aspects fondamentaux.

Les expériences effectuées ont démontré que pour une série d'objets visibles sur les images analysées (MSS de Landsat) :

- l'identification automatique des matériaux est possible pourvu que l'on élimine au préalable les effets dus au relief (SOMMA et CAVAYAS, 1987). Nous entendons par là non seulement la réduction de la variabilité des valeurs spectrales des objets mais également le rehaussement des objets ombragés au même niveau de luminance que leurs homologues au soleil;

- l'identification des formes demande plutôt l'interprétation visuelle des images rehaussées de façon appropriée;

- l'utilisation d'un modèle numérique d'altitude (M.N.A.) facilite beaucoup les opérations d'analyse.

Cet article a comme objectif de présenter les principaux résultats obtenus en employant la technique des rapports de bandes à des fins de reconnaissance automatique des matériaux.

2. La région d'étude et les données utilisées

La région d'Eclipse Channel est une région semi-aride sub-arctique du nord du Labrador (fig. 1). Elle est caractérisée par un relief alpin prononcé et son paysage reste très marqué par le passage des grands glaciers quaternaires : vallées en auge, cirques glaciaires, arêtes, corniches, till, champs de blocs, bourrelets morainiques d'importance variable. Certains cirques glaciaires sont encore occupés par de petits glaciers récessifs ou d'importants névés permanents.

Le relèvement isostatique qui a accompagné la fonte de l'inlandsis a permis l'étagement d'une série de terrasses marines le long de la côte ainsi que de quelques petits deltas.

Un climat périglaciaire y modère aujourd'hui roche en place et dépôts. Ces derniers sont mobilisés par une glace sous-jacente favorisant solifluxion et glaciers rocheux ou encore géliformes à triage. De nombreux couloirs d'avalanches et d'éboulis sont incisés dans les versants et des cônes jonchent les pieds de ces couloirs.

Les processus fluviaux participent, mais dans une moindre part, au façonnement du paysage par un découpage de chenaux et de terrasses dans le matériel meuble.

Une végétation de toundra clairsemée colonise les dépôts meubles des fonds de vallées (SOMMA, 1984).

L'image utilisée était une MSS de Landsat, seule image présentant une couverture nivale et nuageuse minimum. Elle a été captée le 25 août 1979 avec un soleil à 32° d'élévation et 150°

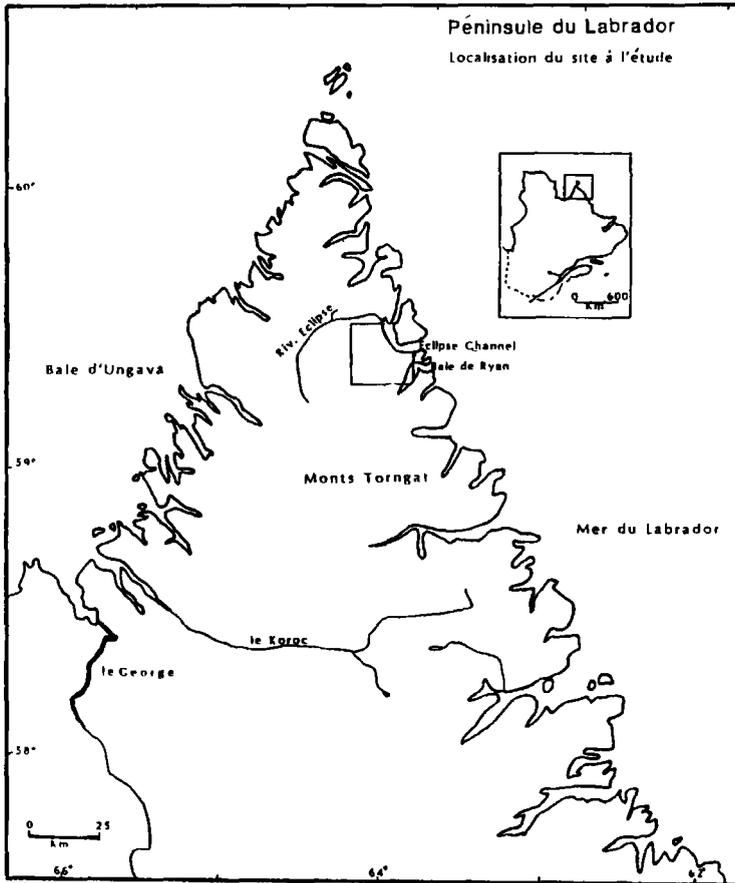


Figure 1. Localisation de la région d'étude

d'azimut. Compte tenu de la position du soleil et du fort relief de la région, plusieurs parties du terrain y apparaissent fortement ombragées. Cette image a été corrigée géométriquement par le Centre canadien de télédétection selon la grille UTM (Universal Transverse Mercator, à 50 m de résolution).

Un MNA de même résolution, créé par numérisation des isohypses d'une carte topographique au 1:50 000 selon la méthode décrite par LETTS and ROCHON (1980) a également été utilisé. Grâce à ce modèle, il a été possible de produire une image du facteur d'insolation du terrain (image des cosinus de l'angle d'incidence du rayonnement, $\cos i$), de calculer les ombres portées et d'isoler les régions ombragées. Par ailleurs, l'image des altitudes a servi de canal additionnel lors de la classification des données. Son ajout améliorait les pourcentages de précision globale.

3. Problématique et méthodologie

Les rapports de bandes sont souvent utilisés dans le but de réduire les écarts radiométriques dus aux effets topographiques et d'homogénéiser les classes. Ceci n'est valable que lorsque les points suivants se réalisent :

- a) les effets topographiques s'expriment de la même façon dans les deux bandes spectrales utilisées;
- b) les effets atmosphériques doivent être éliminés avant division des bandes;
- c) les décalages d'étalonnage par bande spectrale sont pris en considération.

Les analyses dans les régions semi-arides sous d'autres latitudes ont démontré que la première condition semble être satisfaite (KOWALIK *et al.*, 1983). Ainsi les matériaux devraient avoir la même valeur de ratio quelles que soient les valeurs d'éclairement. Un rapport de bandes minimiserait donc les effets causés par les variations topographiques et mettrait en relief les différences de réflectance entre les objets (CRIPPEN, 1988; VOGELMAN and ROCK, 1988) à condition que les points b) et c) soient pris en considération. Dans notre cas, les décalages d'étalonnage sont nuls en raison de la méthode suivie par le Centre canadien de télédétection pour la production de l'image.

En ce qui concerne les effets atmosphériques à travers l'image, des études effectuées antérieurement sur des terrains montagneux indiquent que même si l'atmosphère est homogène sur le plan horizontal, son uniformité sur le plan vertical n'est pas assurée à cause de changements de composition en fonction de l'altitude par rapport au niveau de la mer. Pour notre part, nous avons extrait la luminance moyenne d'une série de lacs à différentes altitudes (0 à 800 m environ). Aucune relation statistiquement significative n'a pu être établie entre ces luminances moyennes et l'altitude des plans d'eau, aussi avons-nous considéré l'atmosphère comme étant homogène verticalement. La méthode des lacs oligotrophes combinée avec le modèle atmosphérique de TURNER et SPENCER (AHERN *et al.*, 1979) ont permis de calculer les paramètres atmosphériques à différents endroits sur l'image. Généralement leurs variations sur le plan horizontal étaient négligeables et leurs faibles valeurs indiquaient une atmosphère passablement claire au moment de la prise de vue. En conséquence, il a été décidé de procéder seulement à la correction des effets de la luminance atmosphérique. Les valeurs estimées par le modèle ont été ajustées pour les rendre plus conformes aux données satellitaires en raison d'une surestimation de ce paramètre par le modèle; surestimation observée lors de l'examen des valeurs minimales des pixels dans l'ombre. L'ajustement a été fait à l'aide des histogrammes des bandes à diviser ainsi qu'à l'aide de leur graphique bispectral ramenés à l'origine des ordonnées.

Pour tester l'efficacité des rapports de bandes à réduire les effets topographiques, la région d'étude a été séparée en deux zones : l'une éclairée par le soleil, l'autre ombragée et ce, à l'aide d'un masque des régions d'ombre. Le comportement radiatif des objets n'est, en effet, pas le même dans les deux types de zones et les rapports de bandes ne se montrent pas assez efficaces dans le cas présent pour ramener au même niveau de gris les objets homologues à l'ombre et au soleil (tab. I). Pour parer à cet inconvénient, nous nous sommes inspirés de la méthode de rapports de bandes de CRIPPEN *et al.* (1988). Ces auteurs proposent une méthode de ratio «dirigée» maniable quelle que soit l'image où une série d'opérations arithmétiques simples, appliquées en fonction des données bispectrales, permettent de contrôler l'expression des effets topographiques sur les images de rapport. L'une des étapes consiste, après élimination des effets additifs de l'atmosphère, à multiplier les données de la bande qui constitue le dénominateur du ratio par un nombre permettant la rotation des vecteurs bispectraux. Si ce nombre est choisi de sorte que le vecteur bispectral le plus proche de l'axe du dénominateur soit ramené à 45°, un rehaussement de toute l'image est ainsi obtenu, tout en minimisant, en principe, les effets du relief.

4. Résultats et modifications méthodologiques

Dans les régions éclairées, après élimination des effets de la luminance atmosphérique, ce type de rapport de bandes montre une grande efficacité quant à la réduction des effets atmosphériques. Ceci est démontré par les figures 2a et 2b.

La méthode de CRIPPEN *et al.* (1988) expliquée ci-dessus rehausse effectivement les images de ratios dans les parties ensoleillées. Même les zones d'ombre deviennent beaucoup plus faciles à interpréter. Cependant le rehaussement opéré accroît d'avantage les écarts entre valeurs de ratios pour certaines classes d'objets au soleil et à l'ombre. Différentes variantes de la méthode de rotation des vecteurs bispectraux ont donc été testées afin de vérifier si une meilleure homogénéisation des zones ombragées et ensoleillées était possible. Après différents essais, deux de ces variantes ont retenu notre attention. Toutes deux agissent dans un premier temps sur les données dans l'ombre. Une fois cette opération terminée, la méthode de CRIPPEN *et al.* (1988) est appliquée pour l'ensemble de l'image.

Dans le premier cas, les données du dénominateur sont multipliées par un nombre qui tient compte de la différence initiale des rapports de bandes entre pixels à l'ombre et pixels au soleil pour le même type d'objets. Il a été nécessaire pour cela d'établir des moyennes de ratios d'objets à l'ombre et au soleil (tab. I). À titre d'exemple, pour le rapport MSS1/MSS4, c'est un facteur multiplicatif de 2,5 pour la bande MSS4, correspondant à la valeur moyenne requise pour amener le vecteur moyen de la neige à l'ombre à une valeur approximative de 1, qui a été utilisé. Ce facteur a été préféré à la valeur de 3,32 (tab. I, fig. 3) afin d'éviter de générer de trop grands écarts avec les autres objets. Ce facteur permet une rotation de l'ensemble des vecteurs bispectraux des zones ombragées autour de l'axe de 45° et réduit passablement les écarts entre zones ombragées et zones ensoleillées sur l'image résultante.

Dans le second cas, une table de correspondance a été créée de sorte que, connaissant le rapport initial dans les zones ombragées, il est possible de définir et d'appliquer un facteur multiplicatif du dénominateur pour chaque type d'objet avant de calculer le rapport de bandes à nouveau.

4.1. Résultats visuels

Pour les deux variantes essayées, les objets dans les zones à l'ombre apparaissent d'une façon générale au même niveau d'intensité lumineuse que leurs homologues dans les zones ensoleillées. Cependant l'algorithme de correction crée des plages de même valeur à l'ombre puisque la procédure impose des facteurs définis en fonction d'une moyenne. Il y a donc sur ce plan un manque de souplesse qui empêche le passage en gradation d'intensité lumineuse entre un pixel et son voisin comme dans les zones au soleil.

4.2. Résultats statistiques

Toutes ces méthodes permettent une amélioration de la précision globale de la classification par maximum de vraisemblance d'environ 15% par rapport aux données brutes avec un pourcentage pratiquement équivalent tournant autour de 64%. Les classifications ont été effectuées avec l'image des altitudes et une modification des probabilités *a priori*. Ces dernières concernaient la probabilité d'occurrence de chaque classe évaluée à partir de sa superficie relative sur l'image. Celle-ci a été déterminée visuellement. Douze thèmes ont été

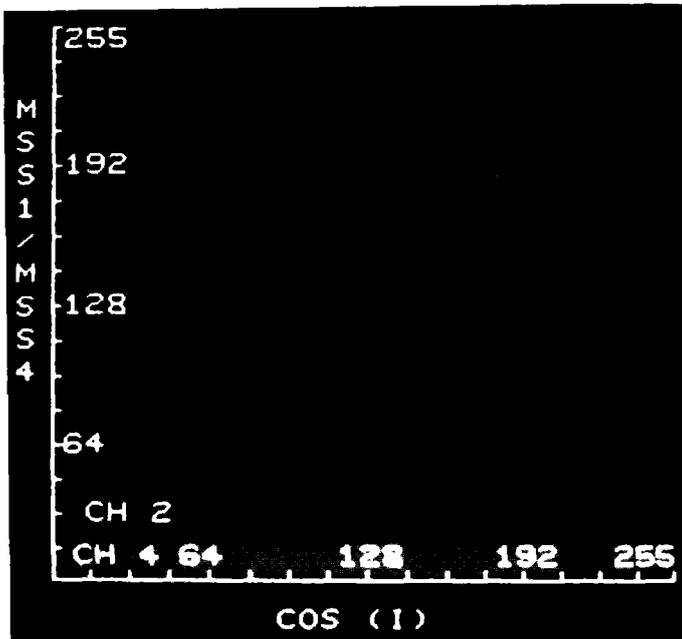
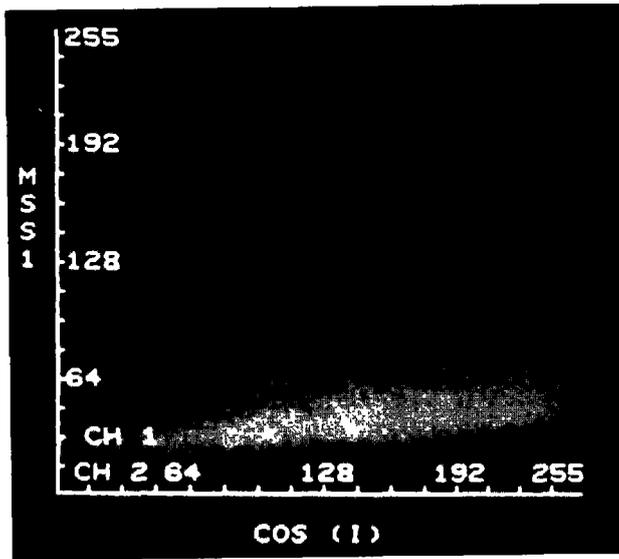


Figure 2. a) luminances de l'image brute vs les valeurs d'éclairément; b) valeurs de ratios selon la méthode de Crippen *et al.* (1988) vs les valeurs d'éclairément

Tableau I. MSS1/MSS4 : moyennes de ratios après correction de la luminance atmosphérique

Matériel/Zones	Zone ensoleillée	Zone ombragée
Neige	1,19	3,32
Matériel rocheux	0,60	1,89
Végétation	0,19	0,97

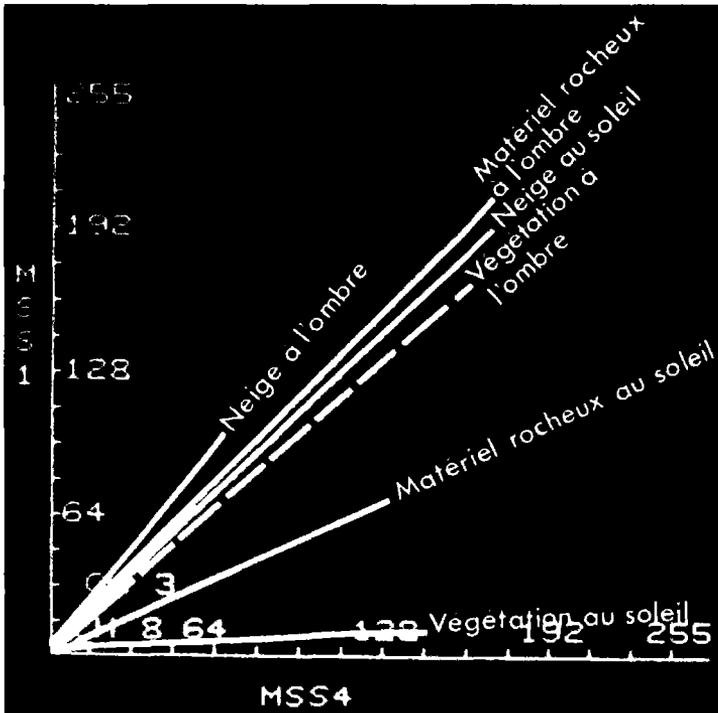


Figure 3. Pentes moyennes de ratios de différents objets

classifiés : la roche en place, la neige, les moraines à noyau de glace, les moraines à bourrelets dans les fonds de vallées, le till remanié par la solifluction sur les versants, la moraine de fond, les champs de blocs sommitaux, les glaciers rocheux, la végétation, les terrasses marines, les versants et l'eau. La vérification des résultats s'est faite par apposition de la grille UTM sur la classification évaluée et par comparaison des thèmes à chacun des 316 points extraits avec les classes situées aux mêmes points sur une carte géomorphologique établie par photo-interprétation et observations sur le terrain (SOMMA, 1984).

Une comparaison des résultats a été effectuée par le calcul du coefficient de Kappa (K) (COHEN, 1960), respectif à chacune des matrices de confusion issues des classifications, qui peut être considéré comme une mesure de précision globale des cartes thématiques (ROSENFELD and FITZPATRICK-LINS, 1986). Les différents K sont ensuite confrontés deux par deux par un test Z qui permet d'évaluer si la différence entre deux matrices est

significative à 90% d'intervalle de confiance. Dans le cas présent ce test a confirmé l'équivalence significative entre les résultats des classifications effectuées sur les différents ratios (tab. II).

Tableau II. Test Z sur les différents ratios (N représente un ratio MSS1/MSS4 non dirigé)

Méthodes \ Z	Z	90%	95%	99%
Ratio normal vs troisième variante	0,73	NS	NS	NS
Ratio normal vs première variante	0,73	NS	NS	NS
Ratio normal vs deuxième variante	1,01	NS	NS	NS
Troisième variante vs première variante	0,0006	NS	NS	NS
Troisième variante vs deuxième variante	0,28	NS	NS	NS
Première variante vs deuxième variante	0,28	NS	NS	NS

5. Discussion

Vu l'équivalence des résultats, la méthode de CRIPPEN *et al.* (1988) reste opérationnellement la plus intéressante parce que la plus rapide d'exécution. Elle offre également l'avantage d'une meilleure gradation des niveaux de gris et l'élimination visuelle des effets topographiques.

Nous l'avons cependant légèrement modifiée par l'ajout d'une constante (1 en l'occurrence) au numérateur comme au dénominateur dans les zones d'ombre. Ceci a permis non seulement d'éviter les rapports non définis mais a pu également favoriser une réduction du coefficient de variation et de la variance entre zones ensoleillées et zones ombragées. C'est ce qui est confirmé d'ailleurs par un test effectué sur une autre région avec une meilleure résolution d'image.

Pour un rapport de bandes TM3/TM5 d'un terrain aride, sans neige (image TM de baie Déception), il a été vérifié que pour des variances considérées comme différentes, la moyenne d'un échantillon de pixels de zones ensoleillées est significativement différente de la moyenne d'un échantillon de pixels de zones ombragées. Le test T (WINER, 1971) indique une différence significative à 95% d'intervalle de confiance pour un rapport de bandes normal ainsi que pour un rapport de bandes selon la méthode de CRIPPEN *et al.* (1988), mais aucune différence significative pour un rapport de bandes selon la procédure de CRIPPEN *et al.* (1988) avec ajout de 1 au numérateur et au dénominateur (tab. III).

Tableau III. Paramètres statistiques obtenus pour une image TM de baie Déception (Québec)

	Ratio normal		Ratio Crippen <i>et al.</i> , 1988		Ratio Crippen modifié	
	soleil	ombre	soleil	ombre	soleil	ombre
N	45	45	45	45	45	45
Moyenne	9,244	7,578	9,240	7,570	9,600	10,467
Variance	16,643	20,022	16,640	20,002	18,609	16,755
t observé	1,85 S à 95%		1,85 S à 95%		0,978 NS	

6. Conclusion

De ces tentatives d'élimination des effets topographiques, il ressort que :

- Les différentes méthodes utilisées sont pratiquement équivalentes en termes de résultats. La méthode de CRIPPEN *et al.* (1988) modifiée reste cependant la plus facile à utiliser.

- Il est possible d'homogénéiser certains éléments et de réduire l'écart radiométrique entre zones d'ombre et de soleil par l'utilisation de constantes adaptées, calculées en fonction des valeurs moyennes de ces éléments à l'ombre et au soleil.

- Une des variantes de la méthode permet de travailler tous les éléments de l'image à la fois mais sa mise en application est plus longue.

- Il apparaît d'autre part, que l'amélioration de la visibilité des objets n'est pas uniforme sur l'image, non seulement d'un objet à l'autre, mais également pour un même objet en fonction de son éclairage initial ou de sa position sur le terrain.

- C'est la végétation qui reste, dans tous les cas, la plus facile à discerner visuellement. D'autres classes comme la neige sont facilement identifiables statistiquement.

En résumé, il est possible par l'une ou l'autre de ces méthodes de manipuler l'image soit en fonction d'un ou plusieurs objets à «homogénéiser», soit en fonction d'un rehaussement visuel général des zones d'ombre. Bien qu'inaptes à générer des corrections égales sur toute l'image, ces procédures restent utiles à la reconnaissance géomorphologique, qu'elle soit effectuée de façon statistique ou visuelle, car elles offrent la possibilité de «voir» clairement dans les régions non éclairées par le soleil.

7. Références

- AHERN, F. J., TEILLET, P. M. and GOODENOUGH, D.G. 1979. Transformation of atmospheric and solar illumination conditions of the CCRS image analysis system. Machine processing of remotely sensed data symposium, p. 34-52.
- CLÉMENT, P., BONN, F. et DUBOIS J. M. 1983. Télédétection et caractéristiques physiques des dépôts meubles dans un milieu anciennement englacé du sud du Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 37, n° 1, p. 107-117.
- COHEN, J. 1960. A coefficient of agreement of nominal scales. Educational and Psychological Measurement, vol. 20, n° 1, p. 37-46.
- CRIPPEN, R. E. 1988. The dangers of underestimating the importance of data adjustments in band ratioing. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, n° 4, p. 767-776.
- CRIPPEN, R. E., BLOM, R. G. and HEYADA, J. R. 1988. Directed band ratioing for the retention of perceptually independent topographic expression in chromaticity-enhanced imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, n° 4, p. 749-765.
- DEAN, K. G. and MORISSEY, L. A. 1988. Detection and identification of arctic landforms : an assessment of remotely sensed data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, n° 3, p. 363-371.
- HAYDEN, R. S. 1986. Geomorphological mapping. Geomorphology from space : a global overview of regional landforms. Chap. II, US National aeronautics and space administration, Scientific and technical information office, Washington, D.C., p. 637-656.
- JONES, A. R. 1986. The use of thematic mapper imagery for geomorphological mapping in arid and semi arid environments. Symposium on Remote Sensing for resources development and environmental management, Enschede, p. 273-280.

- KOWALIK, W. S., LYON, R. J. P. and SWITZER, P. 1983. The effects of additive radiance terms on ratios of Landsat data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, n° 5, p. 659-669.
- LETTS, P. J. and ROCHON, G. 1980. Generation and use of digital elevation data for large areas. 6th Canadian Symposium on Remote Sensing, p. 597-602.
- MILLINGTON, A. C., JONES, A. R., QUARMBY, N. and TOWSHEND, J. R. G. 1986. Monitoring geomorphological processes in desert marginal environments using multitemporal satellite imagery. *Symposium on Remote Sensing for resources development and environmental management*, Enschede, p. 631-637.
- ROSENFELD, G. H. and FITZPATRICK-LINS, K. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, n° 2, p. 223-227.
- SIEGAL, B. S. and GILLESPIE, A. R. 1980. *Remote Sensing in geology*. Wiley & Sons, 702 p.
- SOMMA, J. 1984. *Géomorphologie de la région d'Eclipse Channel, Labrador*. Mémoire de Maîtrise ès sciences, Université de Montréal. 195 p.
- SOMMA, J. et CAVAYAS F. 1987. Reconnaissance géomorphologique d'une région montagneuse semi-aride par télédétection. 11^e Symposium canadien sur la télédétection, Waterloo, Ontario, p. 429-440.
- VOGELMANN, J. E. and ROCK, B. N. 1988. Assessing forest damage in high elevation coniferous forest in Vermont and New Hampshire using Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 24, p. 227-246.
- WINER, B. J. 1971. *Statistical principles in experimental design*. McGraw-Hill, 2nd edition, 907 p.

6

Correction radiométrique sur les données satellitaires en zone de relief : modélisation et application

CHONGJUN YANG, URUYA WEESAKUL et CHRISTIAN PUECH

Laboratoire commun de téledétection CEMAGREF-ENGREF, B.P. 5095, 34033 Montpellier, France; téléphone : 67-04-63-00; télécopieur : 67-63-57-95; télex 490 990

Résumé

L'objectif de ce travail est de proposer une correction des effets topographiques sur les données satellitaires des milieux montagneux, pour y diminuer les effets perturbateurs du relief et permettre une cartographie thématique. Une équation de correction ainsi que des méthodes d'obtention des valeurs des paramètres ont été proposées. Cette équation a été ensuite appliquée sur une image HRV de SPOT-1 du bassin versant du Réal Collobrier, France. Les résultats montrent que la perception des formes du relief est de beaucoup atténuée sur les images corrigées par rapport aux images brutes. Les coefficients de variation de l'image corrigée sur une zone spectrale homogène de châtaigniers de 1269 pixels, choisie à l'aide de la vérité de terrain, sont diminués pour les canaux XS1, XS2, XS3 respectivement de 11%, 38%, 52%. De plus, les pourcentages de pixels bien classés sur la zone sont augmentés de façon conséquente pour les trois couverts principaux de l'image.

1. Introduction

De nombreux travaux ont déjà constaté que les données satellitaires sont considérablement influencées, dans le domaine du visible et du proche infrarouge, par la topographie des régions accidentées.

Cette influence peut conduire à des radiométries très différentes sur des surfaces de même nature spectrale ou très similaires sur des surfaces de différentes natures spectrales. C'est un problème important en télédétection, notamment pour les classifications automatiques, la cartographie et la segmentation.

Nous essayerons dans cette étude de proposer et puis d'appliquer un modèle de correction.

Après une revue des modèles de correction actuels, nous présenterons successivement la modélisation, un exemple d'application, et sa validation.

2. Principaux modèles de correction actuels

On peut dénombrer une vingtaine de modèles de correction proposés au cours des 15 dernières années qui présentent tous des avantages et des inconvénients. Les principaux modèles sont présentés succinctement dans les paragraphes suivants.

2.1. Modèle lambertien

Parmi les modèles de correction des effets topographiques, le plus ancien est le modèle lambertien, qui consiste à normaliser la luminance mesurée par le capteur en ne prenant en compte que l'effet d'angle d'incidence solaire.

Déjà décrit par JUSTICE et HOLBEN (1979), SMITH *et al.* (1980), ce modèle a été examiné dans le cas des données de l'image Landsat par STRAHLER *et al.* (1978), puis JONES *et al.* (1988) ont étendu son application dans le cas des données HRV de SPOT-1.

Une surface est dite lambertienne si la luminance réfléchie reste constante quelle que soit la direction d'observation. Cette correction suppose donc que la surface est constante et que les influences des luminances de l'atmosphère et de l'environnement sont négligeables.

Cette dernière hypothèse amène sûrement une surcorrection d'où une augmentation de la variance des données comparativement aux données brutes, parce que la luminance influencée par l'angle d'incidence solaire n'est qu'une part de la luminance mesurée. Évidemment, moins l'atmosphère est claire, moins l'effet d'angle d'incidence solaire est important, et plus la surcorrection est grave.

Par exemple, pour une hauteur du soleil de 30°, une visibilité de 23 km, et une altitude de 500 m, on peut constater que la surcorrection théorique obtenue par ce modèle atteint 74% pour 0,55 μm et 39% pour 0,85 μm . Si la visibilité est inférieure à 23 km, l'erreur est encore plus importante.

2.2. Modèle non lambertien

Parmi les modèles de correction des effets topographiques, le plus connu est le modèle non lambertien. En utilisant le théorème de réciprocité optique donné par Helmholtz sur chaque formation lunaire typique, MINNAERT (1941) a trouvé une fonction photométrique caractéristique, appelée aussi «fonction de Minnaert» en astrophysique. Cette fonction a d'abord été introduite sans modification en télédétection sous le terme de «modèle non lambertien» puis améliorée (CAVAYAS, 1984; JONES *et al.*, 1988).

Les problèmes rencontrés sont cependant les suivants :

- La fonction de Minnaert a été définie pour l'étude de la Lune autour de laquelle il n'y a pas d'atmosphère. Au contraire, en télédétection terrestre, l'influence atmosphérique ne peut

être négligée. La fonction de Minnaert ne peut donc pas être transférée en télédétection sans modification.

- Dans l'expression d'origine le terme θ_p (pente de l'élément au sol) de l'équation de correction est l'angle d'observation (ou angle d'incidence satellitaire). Pour une observation oblique (ex. SPOT) ces deux termes sont différents.

- En pratique, la valeur de la constante K de Minnaert, dans le modèle non lambertien, est estimée par régression linéaire sur une zone spectrale homogène. Elle varie fortement selon les moyens de regroupement des données dans la régression linéaire.

Certains auteurs ont trouvé qu'en segmentant les données des images en fonction de l'angle d'incidence solaire ou en fonction de la pente, les valeurs de K calculées pour chaque sous-groupe de données ne sont pas identiques à celles calculées pour l'ensemble des données. Ces incertitudes posent fortement le problème du choix de la valeur de K. De celui-ci résultent les limites d'application de ce modèle.

2.3. Autres modèles existants

Plusieurs auteurs proposent dans la littérature leur propre modèle comme méthodes d'élimination des effets topographiques : TEILLET *et al.* (1982), SJOBERG and HORN (1983), CAVAYAS (1984, 1987), PROY (1986), WOODHAM and GRAY (1987), KAWATA *et al.* (1988), CHEN *et al.* (1989), CIVCO (1989).

En résumé, les modèles de correction topographique existants peuvent être classés en deux catégories : les modèles de correction absolue consistant à transformer le compte numérique brut en réflectance spectrale, les modèles de correction relative qui transforment le compte numérique brut correspondant à une condition réelle de prise de vue en un compte numérique normalisé.

Pour les modèles existants, on observe que les modèles absolus sont en général moins précis et moins applicables que les modèles relatifs (plus grand nombre de paramètres difficiles à obtenir).

Les modèles proposés dans la littérature ne sont pas assez précis, et ne permettent pas de corriger l'ensemble des effets topographiques d'une image satellitaire. Dans ces modèles il apparaît que la pente et l'azimut de surface sont les facteurs les plus importants pour la détermination de la luminance en région accidentée et que le seul effet généralement pris en compte est l'effet de l'angle d'incidence solaire.

Les valeurs de luminances d'atmosphère et d'environnement sont des fonctions monotones décroissantes de l'altitude. Mais dans la littérature les valeurs de ces luminances sont souvent fixées pour tous les pixels de l'image pour la correction, ce qui peut entraîner un problème de surcorrection locale.

Lorsque l'on utilise une méthode statistique, les valeurs obtenues des paramètres nécessaires sont souvent très différentes et dépendent de la méthode d'obtention utilisée.

3. Établissement de l'équation de compte numérique de scène

Avant de proposer un modèle de correction, nous allons établir ici l'équation dite «équation de compte numérique (CN) de scène» qui donne le CN lié à la luminance spectrale en fonction de divers paramètres. Nous utiliserons pour cela un certain nombre de notions angulaires qui sont :

- θ_s , angle zénithal solaire, angle entre la verticale locale et la direction du soleil;
- θ_v , angle zénithal satellitaire, angle entre la verticale locale et la direction du satellite;
- θ_p , pente locale de l'élément de terrain;
- θ_s , angle zénithal solaire, angle entre la normale locale à l'élément de sol et la direction du soleil;
- θ_v , angle zénithal satellitaire, angle entre la normale locale à l'élément de sol et la direction du satellite;
- nous définissons aussi le terme S comme paramètre d'ombre, égal à zéro si l'élément est à l'ombre, égal à 1 sinon.

Nous pouvons alors donner ci-dessous les expressions des divers éclairagements.

3.1. Éclairagement spectral direct

Dans les canaux du visible et du proche infrarouge dans lesquels nous travaillons, la source d'énergie est le soleil. Le rayonnement du soleil est caractérisé par l'éclairagement spectral solaire E_0 . L'effet dû à la distance réelle terre-soleil D peut être corrigé par le facteur $(D_0/D)^2$, D_0 étant la moitié de la somme des distances de périhélie et d'aphélie. Supposons que l'atmosphère soit composée d'une série de couches horizontales, parallèles et homogènes, l'atténuation du rayonnement solaire lors de sa traversée de l'atmosphère peut alors, se mettre sous la forme $e^{-\delta/\cos \theta_s}$ où δ est l'épaisseur optique normale totale. L'éclairagement spectral direct d'un élément au sol E_D ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$) s'écrit donc :

$$E_D = S(D_0/D)^2 E_0 \cos \theta_1 e^{-\delta/\cos \theta_s} \quad (1)$$

Pour un élément plat, éclairé, en négligeant l'effet dû à la distance soleil-terre, on retrouve à partir de l'équation (1) l'expression traditionnelle de l'éclairagement direct :

$$E_0 \cos \theta_s e^{-\delta/\cos \theta_s}.$$

3.2. Éclairagement spectral diffus

L'effet d'éclairagement diffus est défini comme la variation d'éclairagement diffus entre deux éléments de pente différente, mais de même nature spectrale. L'éclairagement E_d reçu par un élément quelconque peut être approché en corrigeant l'éclairagement spectral diffus reçu par un élément horizontal E_h ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$) par un facteur g (sans dimension) dépendant des caractéristiques topographiques de cet élément :

$$E_d = E_h g \quad (2)$$

L'expression mathématique de E_h , qui n'est pas ici discutée est donnée généralement par une intégrale (CHANDRASEKHAR, 1960; KONDRATYEV, 1977). Dans la littérature, certains auteurs ont proposé plusieurs expressions d'un facteur de passage de l'insolation diffuse ($W \cdot h \cdot m^{-2}$) reçue par un élément quelconque à celle reçue par un élément horizontal. En supposant que le facteur de passage est indépendant du temps et de la longueur d'onde, on peut l'utiliser pour le calcul de la modification de l'éclairagement diffus et donc transformer toutes les expressions trouvées dans la littérature suivant la forme de l'équation (2). Six expressions principales de g sont présentées ci-dessous.

3.2.1. Modèle isotrope

Si l'on suppose que l'éclairement spectral diffus a une distribution isotrope, le facteur g devient (LIU and JORDAN, 1963) :

$$g = (1 + \cos \theta_p) / 2 = \cos^2(\theta_p / 2) \quad (3)$$

Bien que cette hypothèse d'isotropie soit très discutable, plusieurs auteurs utilisent ce facteur (KONDRATYEV, 1977; TEMPS and COULSON, 1977; TEILLET *et al.*, 1982; CAVAYAS, 1984; WOODHAM and GRAY, 1987).

3.2.2. Modèle isotrope et héliocentrique

L'hypothèse d'un éclairement diffus isotrope n'est généralement pas acceptable. En supposant l'éclairement diffus isotrope et héliocentrique, HAY (1978) propose la forme suivante :

$$g = 0,5 \cos^2(\theta_p / 2) + 0,5 \cos \theta_i / \cos \theta_s \quad (4)$$

Le premier terme de cette expression concerne l'éclairement diffus isotrope, l'autre l'éclairement héliocentrique. Les valeurs de pondération de ces deux termes sont de 0,5 (raison non donnée par l'auteur).

En tenant compte de ces mêmes effets, PROY (1986) propose une autre expression de E_d :

$$E_d = E_{iso} \cos^2(\theta_p / 2) + E_{max} \cos \theta_i / \cos \theta_s \quad (5)$$

où E_{max} et E_{iso} proviennent de la séparation de l'éclairement diffus en deux composantes. Ils peuvent être calculés par la méthode numérique proposée par ce même auteur en connaissant la visibilité considérée. Cette expression modifie en effet les coefficients de pondération de l'équation (4), ce qui apporte, peut-être, une approximation plus précise. Mais la détermination des valeurs de E_{max} et E_{iso} n'est pas évidente. Elle entraîne d'autres difficultés : temps de calcul plus élevé et connaissance de la valeur de visibilité.

3.2.3. Modèle isotrope et anisotrope

L'éclairement diffus présente un maximum vers l'horizon et, suivant la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère, un autre maximum plus ou moins prononcé autour du disque solaire. En tenant compte de tous ces effets, HAY (1978) propose :

$$g = \cos^2(\theta_p / 2) [1 - (I/E)^{1/m} \cos \theta_s] \quad (6)$$

où m est la masse d'air optique, I est l'insolation directe totale, E est la constante solaire ($1353 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ pour HAY (1978)). De leur côté, en tenant compte de ces mêmes effets, TEMPS and COULSON (1977) proposent également :

$$g = \cos^2(\theta_p / 2) [1 + \sin^3(\theta_p / 2)] [1 + \cos^2 \theta_i \sin^3 \theta_s] \quad (7)$$

Bien que cette équation améliore la solution du problème, elle ne correspond pas parfaitement aux données empiriques obtenues par les mêmes auteurs.

KLUCHER (1979) modifie l'équation (7) sous la forme suivante :

$$g = \cos^2(\theta_p / 2) [1 + F \sin^3(\theta_p / 2)] [1 + F \cos^2 \theta_i \sin^3 \theta_s] \quad (8)$$

avec $F = 1 - (I_D / I_H)^2$ où I_D est l'insolation totale (insolation directe et diffuse) reçue par un élément horizontal, I_H est l'insolation diffuse reçue par le même élément. HOOPER and BRUNGER (1980) proposent une autre expression similaire de g .

En pratique, il est très difficile de déterminer les valeurs de E_{iso} , E_{max} dans l'équation (5), de I dans l'équation (6), et de F dans l'équation (8). Nous allons donc utiliser l'équation (7) pour notre étude.

3.3. Éclairement spectral réfléchi par l'environnement

Un élément reçoit encore une part du rayonnement réfléchi par le paysage avoisinant. KONDRATYEV (1977) prend en considération ce type de rayonnement en supposant que la luminance réfléchie par l'environnement est distribuée de façon isotrope :

$$E_e = \pi F \sin^2(\theta_p/2) \quad (9)$$

où F est la luminance réfléchie par l'environnement.

On peut trouver d'autres expressions de cet éclairement (TEMPS and COULSON, 1977; PROY, 1986).

3.4. Luminance spectrale totale réfléchie au sol

Considérons pour le moment, que l'élément est non lambertien. La luminance réfléchie spectrale totale au sol se compose de trois parties (fig. 1) :

- celle provenant de l'éclairement direct, qui peut être exprimée, sous la forme : $f(\theta_r, \theta_i, \theta_r, \theta_r) E_D$, où $f(\theta_r, \theta_i, \theta_r, \theta_r)$ est la fonction de distribution de la réflectance (sr^{-1});

- celle provenant de l'éclairement diffus sous la forme $E_d p_{hd}(2\pi; 2\pi)$, $p_{hd}(2\pi; 2\pi)$ étant la réflectance hémisphérique directionnelle (sr^{-1});

- enfin celle provenant de l'éclairement réfléchi par l'environnement (E_e).

Il est difficile de décomposer le terme E_e , d'une part en source directionnelle, d'autre part en source hémisphérique. Cette part de la luminance réfléchie est donc supposée avoir une distribution isotrope, soit sous la forme : $p E_e / \pi$ où p est la réflectance spectrale. On a donc la luminance spectrale réfléchie totale au sol ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) :

$$L_r = f(\theta_r, \theta_i, \theta_r, \theta_r) E_D + E_d p_{hd}(2\pi; 2\pi) + p E_e / \pi \quad (10)$$

3.5. Luminance spectrale arrivant au capteur

La luminance spectrale L' arrivant au capteur se décompose aussi en trois parties (fig. 2) :

- la luminance atmosphérique L_a , qui correspond au rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère et au rayonnement atmosphérique ;

- la luminance réfléchie par l'environnement de l'élément L_e ;

- la luminance réfléchie par l'élément sous la forme : $L_r e^{-\delta/\cos\theta_v}$ où δ est l'épaisseur optique normale totale.

Soit :

$$L' = [f(\theta_r, \theta_i, \theta_r, \theta_r) E_D + E_d p_{hd}(2\pi; 2\pi) + p E_e / \pi] e^{-\delta/\cos\theta_v} + (L_e + L_a) \quad (11)$$

en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, la somme de L_e et L_a correspond à ce qui est appelé la «path luminance» dans la littérature. Selon le théorème de réciprocité de Helmholtz, on peut montrer que les positions de la source et du capteur peuvent s'interchanger sans affecter la valeur de l'épaisseur optique normale totale. La valeur de δ dans l'équation (11) est donc identique à celle de l'équation (1).

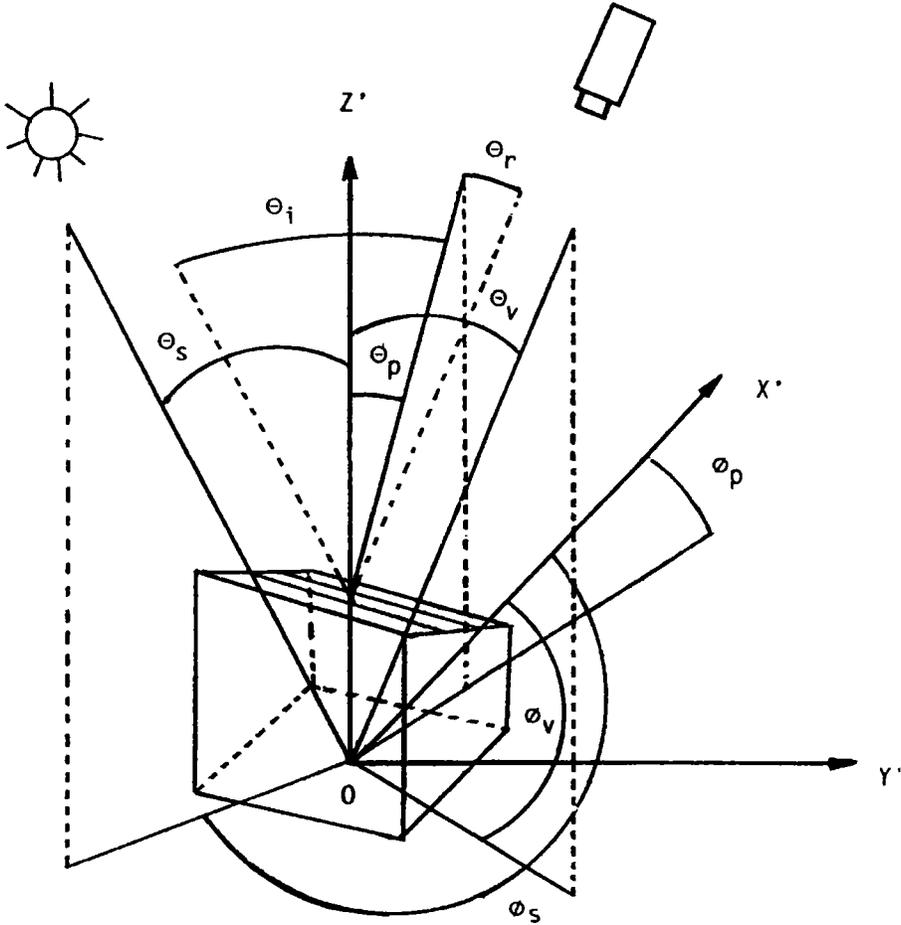


Figure 1. Paramètres angulaires définissant la position du soleil et du satellite et l'orientation d'un élément au sol

En remportant l'équation (1) dans l'équation (11), on a :

$$L' = [f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) S (D_o/D)^2 E_o \cos \theta_i T_s + E_d p_{hd}(2\pi; 2\pi) + p E_e/\pi] T_v + L_c + L_a \quad (12)$$

(en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) avec $T_s = e^{-\delta/\cos \theta_s}$, $T_v = e^{-\delta/\cos \theta_v}$.

3.6. Transformation de luminance spectrale en compte numérique

Les comptes numériques enregistrés sur les bandes magnétiques à partir de l'information reçue par le capteur du satellite ne nous renseignent pas directement sur la luminance spectrale. Pour obtenir celle-ci, il faut effectuer plusieurs transformations mathématiques à partir de l'équation (12) et des modes d'étalonnage.

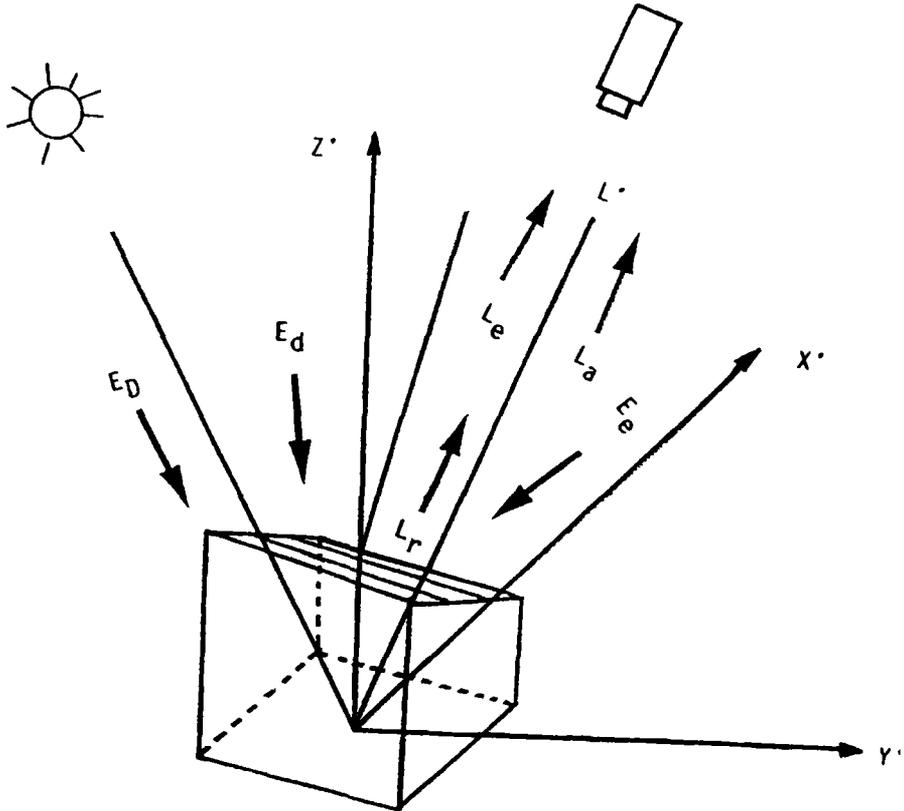


Figure 2. Paramètres nécessaires pour l'établissement de l'équation de compte numérique

3.6.1. Luminances équivalentes et comptes numériques HRV

Les luminances équivalentes HRV sont au nombre de quatre, une pour le mode panchromatique, trois pour le mode multibande. La définition rigoureuse de la notion de luminance équivalente HRV est la suivante (BEGNI, 1982) :

$$L(\lambda) = \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda) L'(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

où $S(\lambda)$: sensibilité spectrale de l'instrument HRV pour la bande considérée, exprimée en unités arbitraires,

$L'(\lambda)$: luminance spectrale arrivant au capteur,

λ : longueur d'onde, exprimée en micromètre.

La luminance équivalente HRV représente une luminance spectrale moyenne dans la bande considérée, ou encore, c'est la luminance spectrale du paysage fictif de répartition uniforme en longueur d'onde ($L(\lambda) = \text{constante}$), qui donnerait la même réponse que la zone homogène considérée.

Le compte numérique CN (sans dimension) en sortie du système est proportionnel à la luminance équivalente HRV $L(\lambda)$. La constante de proportionnalité dépend uniquement :

- de la date de prise de vue, à cause de l'évolution progressive de la sensibilité du capteur;
- du «numéro m de gain analogique G_m ». Le paramètre m peut prendre 8 valeurs entières, de 1 à 8. Il permet l'amplification du signal afin d'adapter au mieux sa dynamique à la plage de codage des comptes numériques.

La relation permettant le calcul de la luminance équivalente HRV est (CHAVEZ, 1989) :

$$CN = A' G_m L \quad (14)$$

avec $G_m = 1,3^{(m-3)}$.

A' est déterminé en fonction de la date, de la bande spectrale et du capteur. Notez que les gains d'image G_m pour nos images sont respectivement 1,690 - 2,197 - 1,690 pour les canaux XS1 - XS2 - XS3.

Dans le cas de l'utilisation d'un gain standard, la relation entre la luminance équivalente HRV $L(\lambda)$ et le compte numérique CN peut être liée par les coefficients absolus d'étalonnage :

$$CN = A'' L \quad (15)$$

où A'' est le coefficient d'étalonnage absolu. Il peut permettre d'éliminer les différences de sensibilité des deux instruments HRV qui peuvent provoquer de légers écarts entre les valeurs radiométriques moyennes des deux images d'une scène bi-HRV.

Les coefficients d'étalonnage absolu étant fournis avec les bandes magnétiques HRV, nous utilisons donc l'équation (15) dans notre étude.

3.6.2. Transformation de luminance en compte numérique pour MSS et TM de Landsat

Pour les images MSS et TM de Landsat, la transformation des comptes numériques en luminance peut être accomplie à l'aide de la formule (ROBINOVE, 1982) :

$$L = (CN/CN_{\max}) (L_{\max} - L_{\min}) + L_{\min} \quad (16)$$

où CN est le compte numérique correspondant à la valeur de la luminance L mesurée; CN_{\max} est le compte maximum du canal considéré (il dépend du système de prétraitement); L_{\max} et L_{\min} correspondent aux valeurs limites de luminance.

Nous pouvons simplifier l'expression (16) en l'écrivant sous la forme :

$$CN = A L + B \quad (17)$$

où $A = CN_{\max} / (L_{\max} - L_{\min})$ et $B = L_{\min} CN_{\max} / (L_{\min} - L_{\max})$.

À partir de l'équation (17), on retrouve l'équation (16) pour le cas où B est nul, ce qui est le cas de HRV. Nous n'utiliserons donc que l'équation (17) pour effectuer la transformation de luminance spectrale en compte numérique.

3.6.3. Équation de compte numérique de scène

Pour utiliser l'équation (17), on définit les moyennes pondérées de E_o , E_h et E_e (éclairagements solaires en haut de l'atmosphère, sur élément horizontal, et réfléchi par l'environnement), de p (réflexivité directionnelle), de T_s et T_v (facteurs d'atténuation), de L_a et L_e (luminances

atmosphérique et réfléchie) que l'on note respectivement E_{om} , E_{hm} , E_{em} , p_m , T_{sm} , T_{vm} , L_{am} , L_{em} dans un canal spectral donné. L'équation (12) peut être réécrite :

$$L = T_{vm} [f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) S(D_o/D)^2 E_{om} T_{sm} \cos \theta_i + E_d p_{hd} (2\pi; 2\pi) + p_m E_{em} / \pi] + L_{am} + L_{em} \quad (18)$$

En utilisant les équations (17) et (18), le compte numérique d'un élément de scène peut s'écrire :

$$CN = A T_{vm} [f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) S(D_o/D)^2 E_{om} T_{sm} \cos \theta_i + E_d p_{hd} (2\pi; 2\pi) + p_m E_{em} / \pi] + CN_{ae} \quad (19)$$

où

$$CN_{ae} = A (L_{am} + L_{em}) + B \quad (20)$$

pour HRV de SPOT : $A = A''$ et $B = 0$

pour MSS ou TM de Landsat : $A = CN_{max} / (L_{max} - L_{min})$ et $B = L_{min} CN_{max} / (L_{min} - L_{max})$.

Pour un élément lambertien,

$$f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = p_{hd} (2\pi; 2\pi) = p_m / \pi \quad (21)$$

En supposant que l'éclairement spectral diffus a une distribution isotrope et anisotrope (équation 7), et que la luminance réfléchie par l'environnement a une distribution isotrope (équation 9), pour l'élément lambertien l'équation (19) devient donc :

$$CN = A p_m T_{vm} \frac{S \left(\frac{D_o}{D} \right)^2 E_{om} T_{sm} \cos \theta_i + E_{hm} \cos^2 \left(\frac{\theta_p}{2} \right) \left[1 + \sin^3 \left(\frac{\theta_p}{2} \right) \right] \left[1 + \cos^2 \theta_i \sin^3 \theta_s \right] + \pi F \sin^2 \left(\frac{\theta_p}{2} \right)}{\pi} + CN_{ae} \quad (22)$$

C'est l'équation (22) qui servira de base à notre méthodologie de correction.

4. Établissement de la méthodologie de correction

Nous allons dans cette partie bâtir un modèle de correction ainsi que les méthodes qui permettent d'obtenir les valeurs nécessaires pour les corrections.

4.1. Formulation

Considérons un élément horizontal et d'altitude nulle, l'angle d'incidence solaire est donc égal à l'angle zénithal solaire. Nous voulons chercher l'expression analytique du compte numérique normalisé correspondant à cet élément.

Pour tenir compte de l'effet d'altitude dans le modèle de correction, nous rappelons que les études menées sur la variation de l'épaisseur optique normale totale en fonction de la hauteur impliquent les facteurs modifiés suivants :

- épaisseur optique des aérosols δ_a , fonction de l'altitude (KONDRATYEV, 1969) :

$$\delta_a(h) = \delta_a(0) e^{-h/1,2} \quad (23)$$

- épaisseur optique de Rayleigh δ_r , qui varie comme la pression atmosphérique (CHAHINE *et al.*, 1983) :

$$\delta_r(h) = \delta_r(0) e^{-h/7.9} \quad (24)$$

En ce qui concerne les variations de l'épaisseur optique d'ozone et de vapeur d'eau (δ_o et δ_v) en fonction de l'altitude, nous supposons qu'elles sont relativement stables, leurs contributions étant négligeables devant les précédentes.

Si les autres atténuations atmosphériques (ex. le gaz carbonique et l'oxygène) sont négligées, la transmission totale du rayonnement solaire le long du trajet entre le soleil et la terre est alors :

$$T_{sm} = e^{-\delta/\cos \theta_s} = e^{-[\delta_r(h) + \delta_a(h) + \delta_o + \delta_v]/\cos \theta_s} \quad (25)$$

Rappelons que les atténuations du rayonnement dues à la diffusion et à l'absorption n'interfèrent pas, on peut donc simplifier le problème et découper ces deux processus. L'équation (25) peut s'écrire sous la forme :

$$T_{sm} = e^{-[\delta_r(h) + \delta_a(h)]/\cos \theta_s} e^{-(\delta_o + \delta_v)/\cos \theta_s} = t_{hs} t_s \quad (26)$$

avec $t_{hs} = e^{-[\delta_r(h) + \delta_a(h)]/\cos \theta_s}$ et $t_s = e^{-(\delta_o + \delta_v)/\cos \theta_s}$.

De même manière, on a la transmission totale du rayonnement solaire réfléchi par l'élément le long du trajet entre la terre et le satellite :

$$T_{vm} = e^{-\delta/\cos \theta_v} = e^{-[\delta_r(h) + \delta_a(h) + \delta_o + \delta_v]/\cos \theta_v} = e^{-[\delta_r(h) + \delta_a(h) + \delta_a(h)]/\cos \theta_v} e^{-(\delta_o + \delta_v)/\cos \theta_v} = t_{hv} t_v \quad (27)$$

avec $t_{hv} = e^{-[\delta_r(h) + \delta_a(h)]/\cos \theta_v}$ et $t_v = e^{-(\delta_o + \delta_v)/\cos \theta_v}$.

En utilisant la définition de la transmittance totale $T(h)$ de l'atmosphère diffusant (DESCHAMPS *et al.*, 1983), l'éclairement diffus d'un élément horizontal peut s'écrire :

$$E_{hm} = t_s (R_o/R)^2 E_{om} \cos \theta_s [T(h) - t_{hs}] \quad (28)$$

Les mêmes auteurs indiquent que, si l'épaisseur optique de Rayleigh δ_r et l'épaisseur optique des aérosols δ_a sont connues, l'approximation de $T(h)$ suivante peut être utilisée avec précision :

$$T(h) = \{1 + [0,50 \delta_r(h) + 0,16 \delta_a(h)]/\cos \theta_s\}^{-1} \quad (29)$$

Notons que ces auteurs ne présentent pas la variation de T , δ_r , et δ_a en fonction de l'altitude. Si cette définition originale de la transmittance est convenable pour un élément quelconque, on a alors raison d'écrire cette transmittance selon l'équation (29).

En supposant que la luminance réfléchie par l'environnement sur la surface est négligeable et que la surface est lambertienne, et en utilisant les équations (27), (28), (29), l'équation (22) devient :

$$CN = A p_m t_{hv} t_v (D_o/D)^2 E_{om} \{S t_{hs} t_s \cos \theta_i + t_s \cos \theta_s [T(h) - t_{hs}] g\} / \pi + CN_{ae} \quad (30)$$

avec $g = \cos^2(\theta_p/2) [1 + \sin^3(\theta_p/2)] [1 + \cos^2 \theta_i \sin^3 \theta_s]$.

Considérons un élément horizontal, d'altitude nulle ; l'angle d'incidence solaire est donc égal à l'angle zénithal solaire. À partir de l'équation (30), on obtient le compte numérique de cet élément :

$$CN_n = A p_m t_{0v} t_v (D_o/D)^2 E_{om} \{t_{0s} t_s \cos \theta_s + t_s \cos \theta_s [T(0) - t_{0s}]\} / \pi + CN_{ae} \quad (31)$$

avec

$$t_{0s} = e^{-[\delta_o(0) + \delta_v(0)]/\cos \theta_s}$$

$$t_{0v} = e^{-[\delta_o(0) + \delta_a(0)]/\cos \theta_v} \text{ et}$$

$$T(0) = \{1 + [0,50 \delta_r(0) + 0,16 \delta_a(0)]/\cos \theta_s\}^{-1}$$

Combinant les équations (30) et (31), le compte numérique normalisé concernant cet élément de référence peut s'écrire :

$$CN_n = (CN - CN_{ac}) \{ T(0) t_{ov} \cos \theta_s \} / \{ S t_{hs} \cos \theta_1 + [T(h) - t_{hs}] \cos \theta_s g \} t_{hv} + CN_{ac} \quad (32)$$

avec $g = \cos^2(\theta_p/2)[1 + \sin^3(\theta_p/2)] [1 + \cos^2\theta_i \sin^3\theta_s]$.

4.2. Obtention des valeurs des paramètres

Afin d'appliquer l'équation de correction ci-dessus, il est obligatoire de connaître la grandeur de tous les paramètres nécessaires, soit $\theta_s, \theta_v, \theta_1, \theta_p, h, S, \delta_r, \delta_a, t_{hs}, t_{ov}, t_{hv}, T(0), T(h), CN_{ac}$.

Les valeurs de θ_s, θ_v sont disponibles dans l'en-tête d'image.

Les valeurs de θ_1, θ_p, h, S de chaque pixel peuvent être calculées à partir du MNE.

L'épaisseur optique des aérosols $\delta_a(0)$ et l'épaisseur optique de Rayleigh $\delta_r(0)$ peuvent être estimées par la formule générale suivante (SINGH, 1988) :

$$\delta(0) = \frac{C}{N} \sum_{j=1}^N (\lambda_{i,j})^n \quad (33)$$

où i est le numéro du canal HRV de SPOT-1.

Pour l'épaisseur optique de Rayleigh : $C = 0,00879$ et $n = -4$; pour l'épaisseur optique des aérosols : $C = 0,1$ et $n = -1,3$.

Pour le canal 1, $N = 10, \lambda_{1,1} = 0,50 \mu\text{m}$ et $\lambda_{1,10} = 0,59 \mu\text{m}$.

Pour le canal 2, $N = 8, \lambda_{2,1} = 0,61 \mu\text{m}$ et $\lambda_{2,8} = 0,68 \mu\text{m}$.

Pour le canal 3, $N = 11, \lambda_{3,1} = 0,79 \mu\text{m}$ et $\lambda_{3,11} = 0,89 \mu\text{m}$.

On peut alors à partir des équations (24), (25), (27), (30), (31), calculer les valeurs de $\delta_r(h), \delta_a(h), t_{hs}, t_{ov}, t_{hv}, T(0), T(h)$.

La littérature propose quatre méthodes pour l'estimation de CN_{ac} :

- 1) modèle physique,
- 2) mesure atmosphérique,
- 3) méthode de régression (ex. CHAVEZ, 1975),
- 4) soustraction du pixel le plus sombre (ex. CRANE, 1971; CHAVEZ, 1988).

Les deux premières ne sont pas exploitées par les utilisateurs en télédétection qui traitent souvent plusieurs images en mode multiscan et doivent aussi envisager la variabilité spatio-temporelle de l'état atmosphérique sur chacune des images. Le résultat obtenu par la troisième méthode est très sensible au choix de la fenêtre dans laquelle on effectue la régression.

C'est la dernière méthode qui est la plus connue, la plus utilisée. Elle suppose que le compte numérique le plus faible de l'image entière correspond à un élément au sol ayant une réflectance nulle, ce compte numérique est donc considéré comme celui de la luminance correspondante de l'atmosphère et de l'environnement.

C'est cette méthode que nous avons utilisée.

5. Application

Nous avons choisi une image HRV de SPOT-1 du 24 janvier 1989 du bassin versant du Réal Collobrier pour appliquer et évaluer le modèle proposé.

Le bassin versant du Réal Collobrier est située sur la façade méditerranéenne dans le département du Var (région Provence-Côte d'Azur) à l'extrémité ouest du massif des Maures à une vingtaine de kilomètres au nord-est de Toulon en France.

Cette région est topographiquement caractérisée par un relief de 70 m à 770 m avec des pentes fortes. La pente maximum est 54° et la pente moyenne est 20° .

Les angles zénithal et azimutal solaires concernant cette image sont de $64,3^\circ$ et $162,2^\circ$. L'angle zénithal satellitaire est de $R3,7^\circ$.

Après création du modèle numérique d'élévation (MNE) par numérisation de la carte topographique et interpolation suivant l'algorithme de PROY (1986), l'image satellitaire a été géométriquement corrigée pour qu'elle puisse être parfaitement superposée avec celle des MNE.

Les valeurs de CN, CN_{ac} , S, θ_r , θ_s , θ_p , t_{os} , t_{ov} , t_{hs} , t_{hv} , T_o , T_h ont été obtenues par les méthodes présentées au paragraphe 4.2.

Les figures 6-3 et 6-4 (voir cahier couleur) présentent le bassin versant avant et après correction par le modèle proposé, et l'on remarque que la perception du relief est nettement diminuée.

6. Validation

Nous avons testé trois critères de validation sur ces images.

6.1. Analyse visuelle

C'est la méthode empirique la plus immédiate. Si l'on a une perception sensible des formes du relief sur une image brute, on peut considérer qu'il y existe des effets topographiques. L'image corrigée doit alors montrer une atténuation de cette perception et cela d'autant plus que l'amélioration est correcte.

La comparaison des figures 6-3 et 6-4 (voir cahier couleur) montre bien une telle atténuation.

6.2. Analyse statistique

C'est une approche plus fiable. En effet, il apparaît qu'un modèle de correction est d'autant plus efficace que les écarts types de la radiométrie sur une zone de couvert homogène sont faibles sur l'image corrigée. Dans la littérature, certains auteurs valident les résultats de correction en comparant les valeurs de l'écart type avant et après correction. Si ces valeurs sont diminuées, on estime que les effets topographiques sont diminués. Mais, une correction topographique peut diminuer aussi les comptes numériques absolus en même temps que les valeurs de l'écart type. Donc la diminution de l'écart type ne signifie pas obligatoirement la diminution des effets topographiques. Par contre, elle peut être signifiée par une diminution du coefficient de variation (écart type divisé par la moyenne).

Pour tester statistiquement notre modèle, nous avons retenu une zone de châtaigniers de 1269 pixels, considérée spectralement homogène. Le tableau I présente les moyennes, écarts types, et coefficients de variation de cette zone pour chaque canal de ces deux images. L'examen de ces valeurs montre que les coefficients de variation sur les images corrigées sont diminués pour les canaux XS1, XS2, XS3 respectivement de 11%, 38%, 52%.

Tableau I. Résultats d'analyse statistique de chaque canal de l'image brute et l'image corrigée sur une zone spectrale homogène de 1269 pixels

		Brut	Corrigé
Moyenne (M)	XS1	19,503	18,317
	XS2	14,160	13,024
	XS3	21,849	21,652
Écart type (E)	XS1	2,117	1,778
	XS2	2,820	1,615
	XS3	8,100	3,895
Coefficient de variation (E/M)	XS1	0,109	0,097
	XS2	0,199	0,124
	XS3	0,371	0,179

6.3. Analyse d'amélioration de classification

Nous avons testé l'amélioration des classifications apportée par le modèle proposé en utilisant une classification multidate par maximum de vraisemblance.

Outre l'image du 24 janvier 1989, une autre image HRV du 26 juin 1986 a été choisie pour effectuer cette classification multidate. La dernière image n'a pas été corrigée radiométriquement car son angle zénithal solaire est très élevé (66,4°), les ombres des versants étant très réduites ou inexistantes.

Après une correction géométrique de la date 2 et superposition pixel à pixel avec la date 1, une classification multidate a été effectuée. Les résultats de classification menée sur l'image brute et sur celle radiométriquement corrigée montrent que les pourcentages de pixels bien classés sont nettement augmentés. Le tableau II représente deux matrices de confusion où l'on constate cette amélioration sensible.

Tableau II. Matrice de confusion (en %); C1 : chataîgniers; C2 : chêne dense; C3 : chêne semi-dense; C4 : maquis; C5 : vigne; IB : image brute; MP : modèle proposé

		C1	C2	C3	C4	C5
C1	IB	42,8	45,2	0,4	9,6	2,0
	MP	94,3	0,0	0,7	3,9	1,1
C2	IB	0,0	89,4	7,7	2,9	0,0
	MP	0,0	78,8	17,3	3,8	0,0
C3	IB	1,6	29,7	64,1	4,7	0,0
	MP	0,0	17,2	78,1	4,7	0,0
C4	IB	57,1	0,0	14,3	27,1	1,4
	MP	15,7	1,4	10,0	72,9	0,0
C5	IB	1,9	0,0	0,0	7,7	90,4
	MP	1,9	0,0	0,0	3,8	94,2

7. Discussion et conclusion

Après avoir établi les équations des divers termes composant l'éclairement d'un élément de sol, sa transformation en luminance puis en compte numérique, nous avons établi l'expression théorique du passage d'un compte numérique quelconque au compte numérique de terrain plat correspondant avec l'altitude nulle.

La qualité de toute correction topographique dépend principalement de la connaissance de l'état réel de l'atmosphère qui présente une variabilité spatio-temporelle. Or, il est quasiment impossible de pouvoir disposer de mesures permettant de connaître l'état de l'atmosphère lors de la prise de vue. L'estimation *a posteriori* de cet état à partir des données satellitaires est donc préférable, et cette estimation reste un problème essentiel pour les corrections topographiques, comme pour les autres prétraitements radiométriques des images satellitaires.

L'application de cette formulation à une image HRV prise en hiver sur un massif forestier français a conduit à une amélioration sensible des divers canaux : diminution de la perception de relief, diminution des coefficients de variation et amélioration de la matrice de confusion des classifications tirées de cette image.

8. Références

- BEGNI, G. 1982. Selection of the optimum spectral bands for the SPOT satellite. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 48, p. 1613-1620.
- CAVAYAS, F. 1984. Correction radiométrique des effets topographiques des images Landsat des territoires forestiers. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 177p.
- CAVAYAS, F. 1987. Modeling and correction of topographic effect using multi-temporal satellite images. *Canadian journal of remote sensing*, vol. 13, p. 49-67.
- CHAHINE, M.T., McCLEESE, D.J., ROSENKRANZ, P.M. and STAELIN, D.H. 1983. Interaction mechanisms within the atmosphere. *Manual of Remote Sensing*. p. 165-230.
- CHANDRASEKHAR, S. 1960. Radiative transfert. Dorner Publications Inc., New York, N.Y.
- CHAVEZ, P.S. Jr. 1975 Atmospheric, Solar, and MTF correction for ERTS digital imagery. *Proceedings of American Society of Photogrammetry*. Falls Church, Va., October, abstract, 69p.
- CHAVEZ, P.S. Jr. 1988. An improved dark object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, vol. 24, p. 459-479.
- CHAVEZ, P.S. Jr. 1989. Use of the variable gain settings on SPOT. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, p. 195-201.
- CHEN, N.Y. *et al.* 1989. Use the Lowtran 6 and DEM to derive path radiance for SPOT Imageries over mountainous terrain. *Proceedings of IGARSS'89 symposium*, p. 900-902.
- CIVCO, D.L. 1989. Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, p. 1303-1309.
- CRANE, R.B. 1971. Preprocessing techniques to reduce atmospheric and sensor variability in multispectral scanner data. *Proceedings of the seventh international symposium on remote sensing of environment*. Ann Arbor, MI, p. 1345-1355.
- DESCHAMPS, P.Y., HERMAN, M. et TANRÉ, D. 1983. Modélisation du rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère et la terre, entre 0,35 et 4 μm . Contrat ESA 4393/80/F/DD(SC).

- HAY, J.E. 1978. Measurement and modelling of shortwave radiation on inclined surfaces. Conference on atmospheric radiation. Davis, California, p. 150-153.
- HOOPER, F.C. and BRUNGER, A.P. 1980. A model for the angular distribution of sky radiance. Transactions of the ASME, vol. 102, p. 196-202.
- JONES, A.R., SETTLE, J.J. and WYATT, B.K. 1988. Perspective images from the SPOT-1 HRV sensor. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, p. 1405-1407.
- JUSTICE, C. and HOLBEN, B. 1979. Examination of lambertian and non-lambertian models for simulating the topographic effect on remotely sensed data. NASA TM 80557, GSFC.
- KAWATA, Y., UENO, S. and KUSAKA, T. 1988. Radiometric correction for atmospheric and topographic effects on Landsat MSS images. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, p. 729-748.
- KONDRATYEV, K.Y. 1969. Radiation in the atmosphere. Int. Geog. Series, vol. 12, Academic Press.
- KONDRATYEV, K.Y. 1977. Radiation regime of inclined surfaces. Technical note n° 152, WMO n° 467.
- LIU, B.Y.H. and JORDAN, R.C. 1963. The long term average performance of flat-plate solar-energy collectors. Solar Energy, vol. 7, n° 2, p. 53-74.
- MINNAERT, M. 1941. The reciprocity principle in lunar photometry. Astrophysical Journal, vol. 93, p. 1770-411.
- PROY, C. 1986. Intégration du relief au traitement d'images de télédétection. Thèse. Institut National Polytechnique, Toulouse.
- ROBINOVE, C.J. 1982. Computation with physical values from Landsat digital data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 48, p. 781-784.
- SINGH, S.M. 1988. Lowest order correction for solar zenith angle to Global Vegetation Index (GVI) data. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, p. 1565-1572.
- SJOBERG and HORN 1983. Atmospheric effects in satellite imaging of mountainous terrain. Applied Optics, vol. 22, n° 11, p. 1702-1716.
- SMITH, J.A., KIN, T.L. and RAMSON, K.J. 1980. The lambertian assumption and Landsat data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 46, p. 1183-1189.
- STRAHLER, A.H. *et al.* 1978. Improving forest cover classification accuracy from Landsat by incorporating topographic information. 12th International symposium on remote sensing of environment. ERIM, Mich., U.S.A., p. 927-942.
- TEILLET, P. *et al.* 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data, Canadian Journal of remote sensing, vol. 8, n° 2.
- TEMPS, R.C. and COULSON, K.L. 1977. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. Solar Energy, vol. 19, p. 179-184.
- WOODHAM, R.J. and GRAY, M.H. 1987. An analytic method for radiometric correction of satellite multispectral scanner data. I.E.E.E. Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 25, p. 258-271.

PARTIE II

Cartographie des ressources en eau

7

Cartographie des fractures d'un réservoir hydrogéologique en milieu volcanique à partir de données HRV de SPOT contrôlées sur le terrain (basaltes miocènes de Djibouti)

FRANÇOIS ARTHAUD* et MOHAMED JALLUDIN**

**Laboratoire de géologie structurale appliquée, case 058, Université des sciences et techniques du Languedoc (USTL), 34095 Montpellier cedex 05, France; téléphone : (33) 67-14-32-45; télécopie : (33) 67-54-30-79*

***Laboratoire d'hydrogéologie, Institut supérieur d'études et de recherches scientifiques et techniques (ISERST), B.P. 486, République de Djibouti; téléphone (253) 35-27-95; télécopie : (253) 35-48-12*

Résumé

Le site expérimental des basaltes du Dalha a été choisi pour effectuer essentiellement l'analyse géométrique du réseau de fissures de surface, étudié sur une couverture stéréoscopique SPOT à l'échelle du 1:200 000 où les discontinuités tectoniques sont marquées par des reliefs de failles plus ou moins régularisés, par les perturbations du réseau hydrographique et par des linéaments indéterminés. Le traitement statistique de la carte de fractures permet de reconnaître quatre familles principales de fractures : N020, EO, N120 et courbes pour les longueurs comprises entre 200 m et à plus de 10 km. Ce travail a été complété sur photos aériennes et sur le terrain par une étude surtout morphotectonique. Le contrôle sur le terrain montre que dans chaque famille il faut tenir compte des données suivantes : âge relatif des failles, valeur du rejet, rejeu récent, phénomènes hydrothermaux syntectoniques, reprise d'érosion, conditionnant fortement le comportement hydraulique des fractures.

1. Introduction

La République de Djibouti (fig. 1) se situe en zone tropicale aride à moins de 200 mm de précipitation par an. L'alimentation en eau potable de ses populations dépend à plus de 90% des eaux souterraines. En domaine rural l'eau est généralement exploitée par des puits peu profonds captant dans les nappes alluviales d'inféoflux, alors que des forages profonds sont nécessaires pour les grandes villes afin d'assurer les besoins en eau élevés.

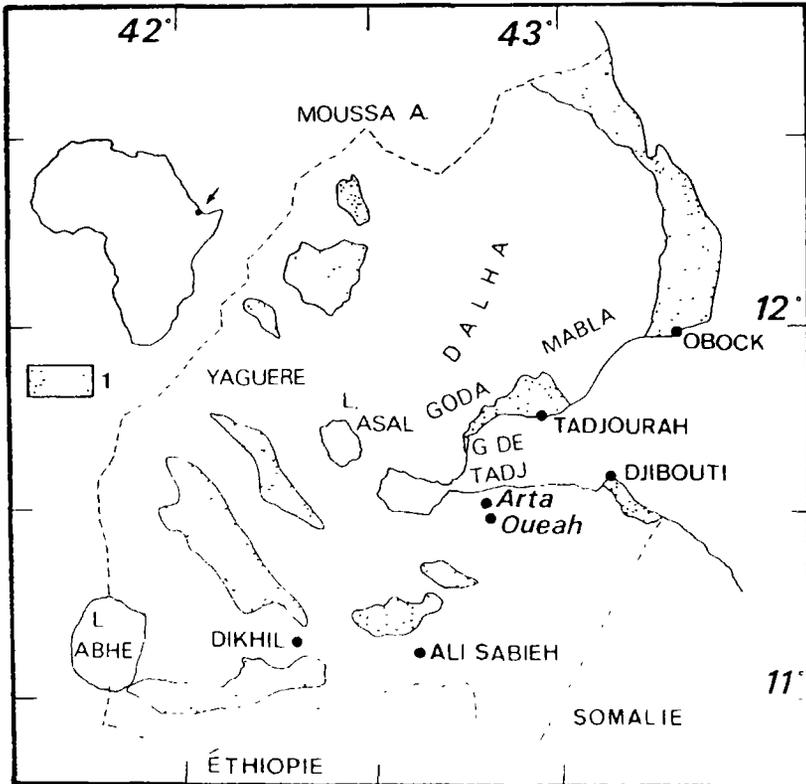


Figure 1. Carte de localisation; 1) principales plaines

La majeure partie du sol djiboutien est constituée de roches volcaniques et les recherches en eaux souterraines ont de plus en plus accès sur ces formations géologiques dont la structure est très hétérogène. La localisation des forages et l'évaluation des potentialités de ces formations sont intimement liées à leur fracturation.

En ce sens, le site expérimental des basaltes du Dalha a été sélectionné en raison des besoins en eau immédiats, des problèmes dus à son exploitation intensif au niveau de certains captages et de la disponibilité des données géologiques et hydrogéologiques. L'étude porte sur la reconnaissance de la fracturation à partir des tirages photographiques au 1:200 000 d'images satellitaires HRV de SPOT stéréoscopiques. Sur la base d'une analyse statistique du champ de fractures, on effectue une étude de terrain associée aux observations des photos aériennes au 1:30 000 afin d'établir une caractérisation qualitative des fractures et leur participation dans la perméabilité du réservoir en tenant compte de l'histoire tectonique, de l'altération et de l'hydrothermalisme.

2. Géométrie d'ensemble du réservoir

Les basaltes du Dalha au sud du golfe de Tadjourah ont une extension de 120 km et décrivent une forme allongée depuis le SO jusqu'au NE couvrant près de 1800 km² (fig. 2). Ils sont recouverts à l'ouest par les basaltes stratoïdes (3,4 - 1 Ma) et les bassins sédimentaires continentaux. À l'est le Dalha repose sur les rhyolites Mabla (15 Ma). Dans la partie nord viennent se juxtaposer contre le Dalha les basaltes somali (9 - 3,4 Ma) et plus au nord les basaltes du golfe (3,4 - 1 Ma) en bordure du golfe de Tadjourah (BARBERI *et al.*, 1974; BLACK *et al.*, 1974; CHESSEX *et al.*, 1974).

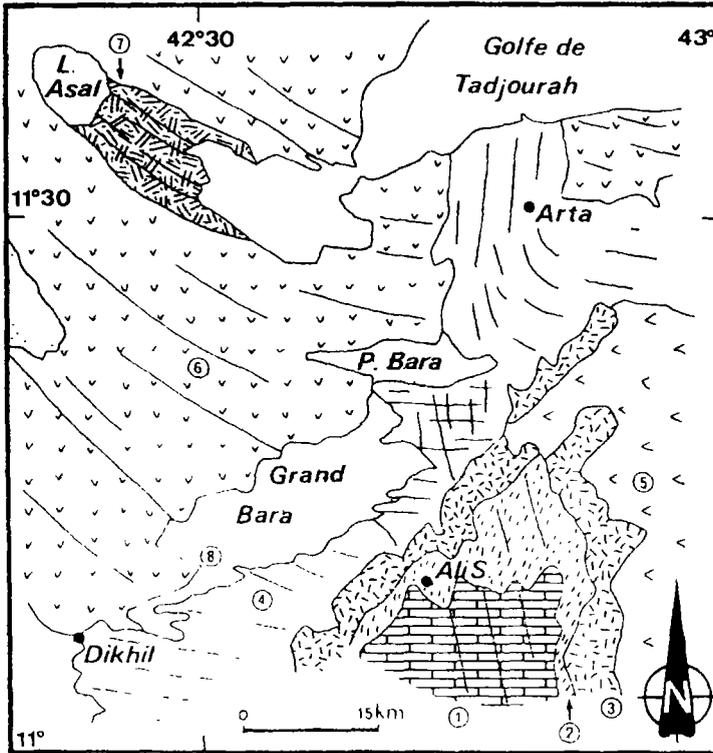


Figure 2. Carte géologique simplifiée; 1) socle sédimentaire jurassique crétaïc; 2) basalte ancien; 3) rhyolite Mabla; 4) basalte du Dalha; 5) basalte somali; 6) basalte stratoïde; 7) basalte récent du rift d'Asal; 8) bassin sédimentaire

Cette formation volcanique qui dépasse plusieurs centaines de mètres d'épaisseur dans la zone d'étude (ISERST, 1986) a fait l'objet d'une cartographie de la fracturation sur la base des tirages photographiques à l'échelle du 1:200 000 d'images satellitaires HRV stéréoscopiques. L'intérêt d'une telle opération consiste en l'acquisition d'une carte de fracturation à moindre coût, rapidement et de plus sur un support ayant un format pratique d'utilisation. Cette cartographie vise à mettre en évidence le comportement de la fracturation sur une surface donnée. Le relevé de la fracturation a été effectué à l'aide d'un stéréoscope qui a permis de procéder à deux types d'observations directes et indirectes. La première se caractérise par l'observation de falaises, d'alignements morphologiques ou d'escarpements rectilignes tandis

que les observations indirectes s'identifient par les perturbations du réseau hydrographique, les alignements de cônes ou de coulées volcaniques ainsi que les informations lithologiques.

Des travaux sur images satellitaires ont permis essentiellement d'analyser les structures d'ensemble à l'échelle de la tectonique des plaques (BANNERT, 1972; KRONBERG *et al.*, 1974). Récemment les images HRV ont été utilisées dans la dépression Afar pour reconnaître des accidents tectoniques (TAPPONIER *et al.*, 1990).

La carte de fracturation des basaltes du Dalha ainsi obtenue nous permet de distinguer 5 ensembles à extension variable (fig. 3) où la fracturation semble se comporter différemment en orientation et en dimension.

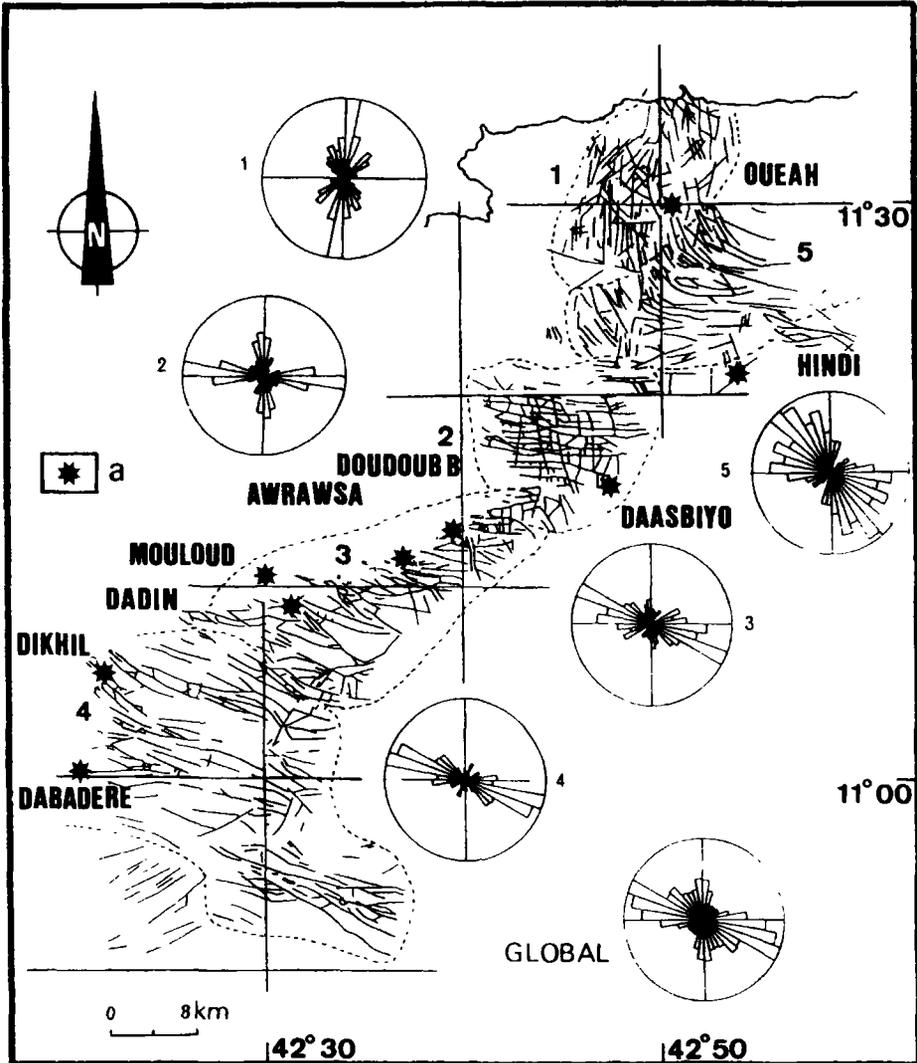


Figure 3. Carte de fracturation des basaltes du Dalha, d'après les images SPOT au 1:200 000; a) champs de captage

Afin de détecter d'éventuelles différences significatives entre les familles de fractures au sein des différentes zones et de les comparer, la fracturation a été numérisée à l'aide du programme RAFNUM et traitée ensuite par le programme RAFORT (RAZACK, 1984). On obtient de cette manière les rosaces, soit les histogrammes directionnels relatifs à chaque zone et pour la fracturation globale.

Les directions principales de fracturation dans la zone 1 sont NS, N050 et N150. Les fractures semblent relativement petites et serrées. Celles EO sont longues mais apparaissent discrètement sur l'ensemble de la zone. Le relief est marqué par des oueds encaissés NS et une érosion active importante.

Dans la zone 2 la fracturation forme un réseau plus ou moins régulier de fractures principalement N160-180 moins fréquentes, recoupées par des directions EO. Le basalte se présente sous forme de blocs d'altitude assez uniforme délimités par les oueds.

Dans la zone 3 les axes principaux de fracturation sont EO et N110-130. Cette zone forme une bande allongée qui s'élargit du NE vers le SO. Parallèlement, des blocs à relief émoussé deviennent de plus en plus allongés. L'ensemble est recoupé par des fractures NS, N060-070 de petites dimensions.

La zone 4 ressemble à la précédente à ceci près que la direction principale de fracturation est N100-120. Certaines fractures dépassent 10 km en longueur.

La fracturation de la cinquième zone se caractérise particulièrement par des arcs elliptiques ayant un foyer vers le golfe de Tadjourah. Elle affecte des reliefs élevés et très escarpés.

L'histogramme directionnel de la fracturation globale indique un axe principal de fracturation dans la fourchette N090-120, mais comme mentionné ci-dessus, chaque zone, en fait, se caractérise par son champ de fractures spécifique.

3. Fracturation dans le réservoir et son rôle hydrogéologique

Le Dalha se compose d'empilements de coulées de basalte de quelques mètres d'épaisseur, séparées par les bases de coulées, qui peuvent se présenter sous forme de brèches et des paléosols. L'ensemble est interstratifié avec des niveaux de scories et parfois des niveaux sédimentaires. Les coulées ont généralement subi une fissuration due au refroidissement lors de la mise en place. Cette stratification dans la formation des basaltes du Dalha introduit une perméabilité dans le plan horizontal.

La fracturation qui affecte cette séquence joue donc un rôle capital dans la perméabilité globale du réservoir. Cependant, il est possible de répertorier un certain nombre de facteurs qui interviennent en faveur ou en défaveur de la perméabilité de ce réservoir volcanique.

La tectonique cassante récente et actuelle, avec la contrainte principale σ_1 dans la direction verticale, permettent l'ouverture de nouvelles fractures et le rejeu des failles préexistantes. Elle permet aussi la juxtaposition de strates de perméabilités identiques ou différentes. Les mouvements verticaux entraînent le plus souvent une réouverture des fractures anciennes colmatées.

Par ailleurs, il est fréquent d'observer les effets de l'hydrothermalisme qui est d'autant plus important que la fracture est ancienne et inactivée. Il colmate les fractures partiellement ou complètement par la cristallisation des minéraux secondaires (calcite, zéolite, etc.). Les événements tectoniques qui s'accompagnent de volcanisme provoquent l'injection de produits volcaniques dans les fractures ouvertes (dykes). La perméabilité de la fracture dépendra alors du taux de fissuration par refroidissement de la lave. De même la stabilité de la formation géologique par rapport au niveau de base conduit à une altération importante de la roche.

4. Principaux résultats de terrain

Les basaltes du Dalha affleurent dans la dépression Afar qui est le résultat de la jonction triple (MC KENZIE *et al.*, 1970) constituée par les rifts de la mer Rouge, du golfe d'Aden et de l'Est Africain, fonctionnant depuis 25-30 Ma.

L'histoire tectonique complexe au cours de laquelle se sont succédées plusieurs phases de contraintes tectoniques (ARTHAUD et CHOUKROUNE, 1976; ARTHAUD *et al.*, 1980a,b; GAULIER, 1990) locales et régionales, est à l'origine du système de fissures observé. Il n'est pas toujours aisé d'affecter à une ou plusieurs familles de fractures un champ de contraintes tectoniques, donc une chronologie, étant donné qu'il faille tenir compte des rejeux de fractures préexistantes. De plus en raison du degré d'altération et d'érosion des basaltes du Dalha les observations microtectoniques, pour déterminer les contraintes tectoniques, sont rendues difficiles, excepté dans la zone 1 (ARTHAUD *et al.*, 1980b).

Pour identifier dans le champ de fractures global celles ayant un rôle dans la perméabilité du réservoir il s'avère nécessaire de rechercher les critères de failles actives ou réactivées à l'aide des photos aériennes au 1:30 000 et sur le terrain. Cette démarche est indispensable dans le cadre d'un programme concernant par exemple la localisation des forages ou intéressant l'évaluation du bilan hydrogéologique.

Les observations de terrain sur la fracturation des basaltes du Dalha sont multiples et pourront être décrites au travers de schémas explicatifs au cours de notre exposé.

Au NE de Dikhil (fig. 4) la morphologie d'un relief de faille complètement régularisé (a) montre une importante altération en boule des basaltes et le dépôt des éboulis provenant de l'érosion du relief. La réactivation de la faille (b) modifie la géomorphologie du site et à la place du relief émoussé apparaît un escarpement de basalte recouvert d'éboulis vifs.

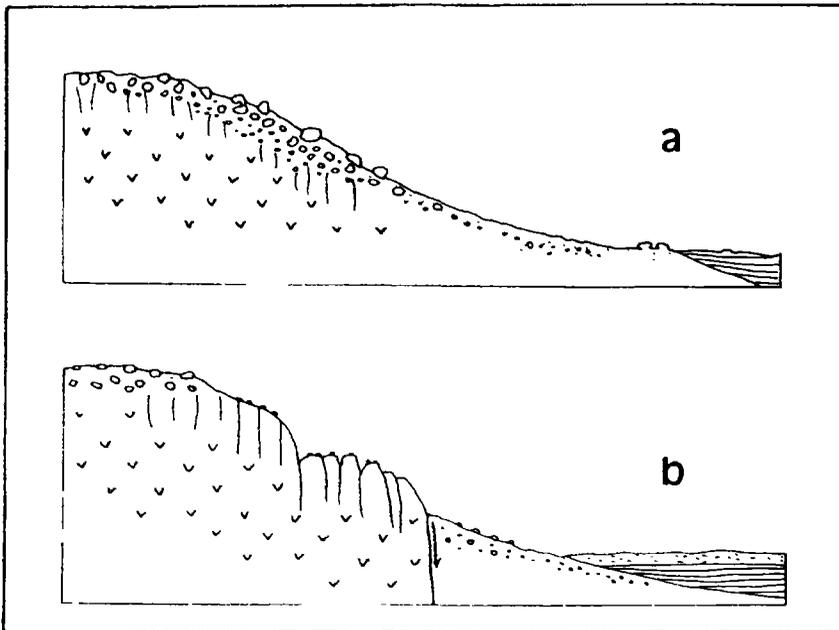


Figure 4. Réactivation de faille au NE de Dikhil; a) relief de faille totalement régularisé; b) réactivation de la faille et apparition d'un escarpement

La reprise d'une fracture antérieure peut être marquée à la base d'un relief par une série de facettes où affleure le basalte comme le long de l'oued Awrawsa (fig. 5). Le basalte se trouve recouvert en certains endroits par des éboulis récents qui se sont mis en place après le rejeu de la faille.

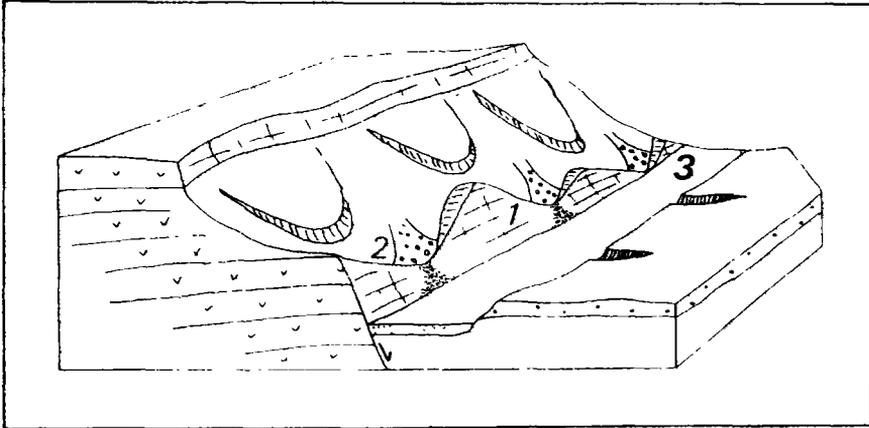


Figure 5. Réactivation de faille : oued Awrawsa; 1) facettes marquant l'escarpement de faille après sa réactivation; 2) reprise d'érosion récente postérieure à l'escarpement; 3) lit d'oued

Dans le secteur NE de la zone d'étude (fig. 6) on peut se rendre compte sur carte et en bloc diagramme que l'escarpement majeur (7) ne constitue que l'effet actif de l'érosion d'où les éboulis en volume conséquent à la base. L'escarpement de faille apparaît (6) au pied de la grande falaise sous forme de lambeaux, marqués par de petits reliefs à la base desquels se déposent les matériels fins (3) amenés par les petits cours d'eau créés récemment.

Les observations de terrain et sur images HRV des failles affectant le sédimentaire récent confirment la création et/ou la réactivation de certaines familles de fractures (cônes de déjection à l'ouest de Tadjourah, Daasbyo, région NE de la zone d'étude).

Le cas de perturbation du réseau hydrographique s'observe dans la région de Dadin où le jeu de la faille normale provoque un détournement du cours de l'oued (fig. 7). Celui-ci, qui s'écoulait en (2) est venu se rabattre contre la faille (3). La faille normale a par ailleurs été mise en évidence (fig. 8) dans le cadre d'un projet hydrogéologique (JALLUDIN *et al.*, 1990).

L'analyse de l'interférence de plusieurs familles de fractures peut aboutir à la chronologie relative de leur mise en place, lorsque le stade de fracturation est récent (fig. 9). Toutefois, dans un stade avancé d'érosion et d'altération cette analyse ne permet pas nécessairement de démontrer cette chronologie des différentes familles de fractures (fig. 10).

Dans le secteur de Oueah, sur le bord méridional de la dorsale du golfe de Tadjourah, des mouvements verticaux de grande ampleur sont mis en évidence par les alluvions perchées dans les vallées encaissées et les glissements de terrain indiquant une érosion rapide. Ces mouvements permettent la réactivation de fractures préexistantes repérées dans le paysage par le décalage des terrasses anciennes et les éboulis vifs par-dessus ceux de la phase antérieure (fig. 11).

Enfin, la reprise ou la nouvelle mise en place d'une famille de fractures peut s'accompagner d'une injection de matériel volcanique. Ainsi à Dabadère il est possible de noter en surface des alignements de cônes volcaniques de différentes dimensions le long et sur le croisement des

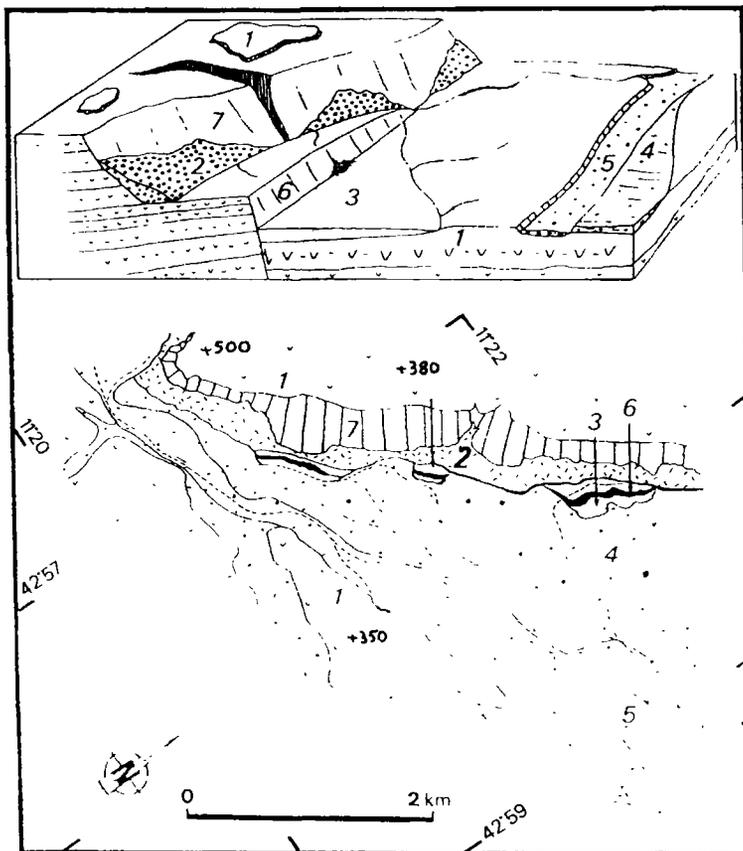


Figure 6. Réactivation de faille : Hindi; 1) basalte stratoïde; 2) éboulis dus à l'érosion active de la falaise; 3) dépôts fins au pied de l'escarpement de faille et amenés par les cours d'oueds récents; 4) terrasse alluviale ancienne; 5) oued principal; 6) escarpement de faille récent; 7) falaise constituée de basalte du Dalha

fractures. Localement ces fractures jouent plutôt le rôle de voiles étanches, à moins qu'une fissuration significative n'existe dans ces dykes, d'où l'intérêt de procéder aux travaux détaillés de terrain.

5. Conclusion

L'information fournie par les images HRV au 1:200 000 sur la fracturation des basaltes du Dalha est essentielle pour connaître le comportement et l'agencement de fractures en surface. Le document cartographique obtenu à partir de ces données de fracturation permet ainsi d'orienter la prospection hydrogéologique à plus grande échelle (ex. 1:30 000 et le terrain), et par conséquent, de vérifier la contribution de chaque famille de fractures dans l'hydrodynamique souterraine. Effectivement le rôle hydraulique des fractures est déterminé

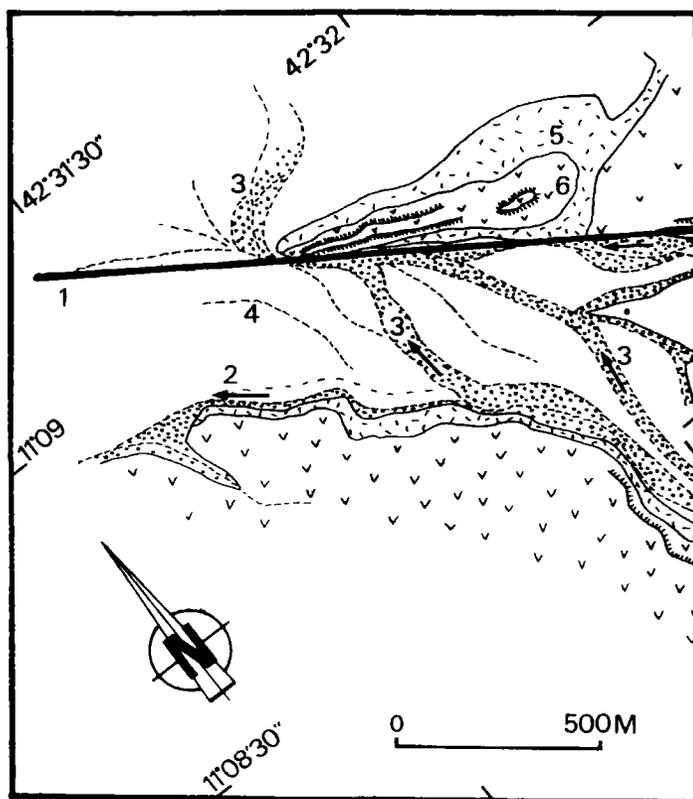


Figure 7. Perturbation du réseau hydrographique; 1) faille; 2) ancien lit d'oued; 3) nouveau lit d'oued; 4) rigoles de ruissellement; 5) éboulis; 6) affleurement de basalte

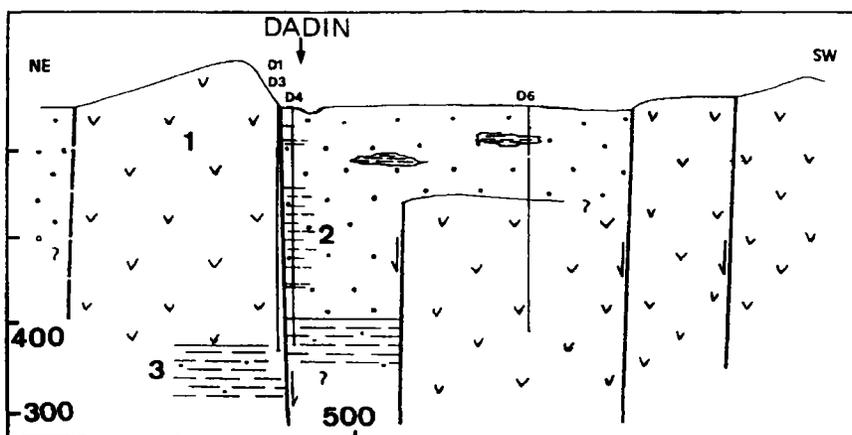


Figure 8. Coupe géologique d'après les forages de reconnaissance mettant en évidence la faille de la figure 7; 1) basalte du Dalha; 2) alluvions; 3) argiles

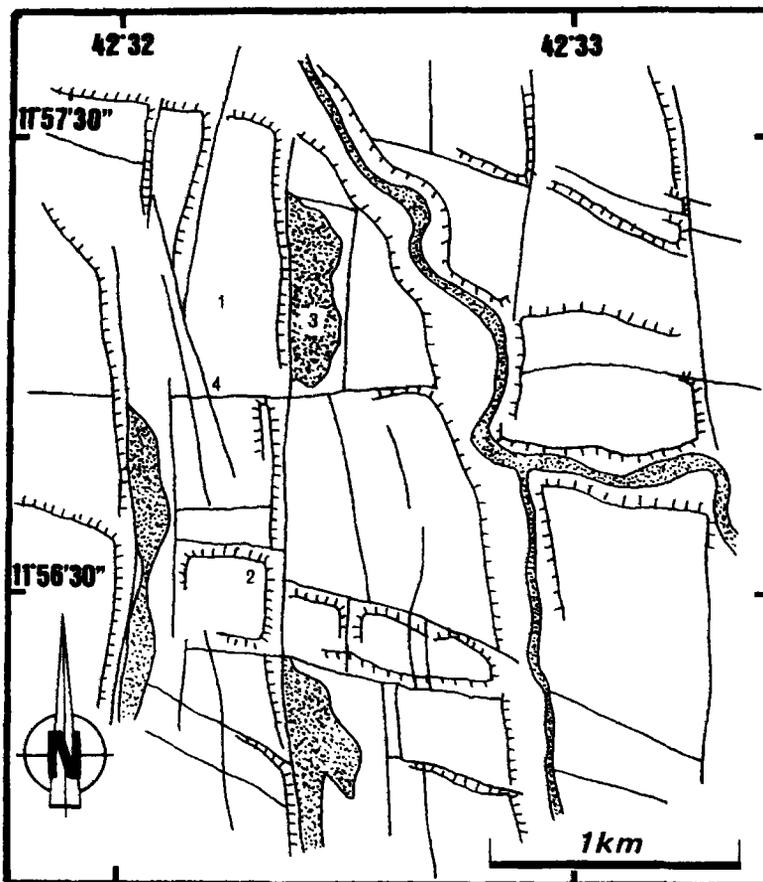


Figure 9. Makarassou; 1) basalte stratoïde; 2) falaise; 3) dépôt de sédiments fins récents; 4) fractures

par la tectonique, les mouvements verticaux, l'altération et l'hydrothermalisme, autant de facteurs qui ne peuvent être identifiés que par l'étude de terrain.

À ce stade de l'étude et dans une optique de modélisation de l'aquifère volcanique fissuré des basaltes du Dalha, il paraît utile de rechercher une éventuelle structure de la fracturation. Cette démarche sera rendue possible à l'aide des méthodes géostatistiques qui sont appliquées de plus en plus en sciences de la terre.

6. Remerciements

Les différentes missions en République de Djibouti et en France, ainsi que le programme de recherche sont financés par le Ministère de la coopération. Nous remercions tout particulièrement la Mission de coopération française à Djibouti pour la gestion du programme, et la Direction de l'ISERST pour tous les appuis logistiques mis à notre disposition.

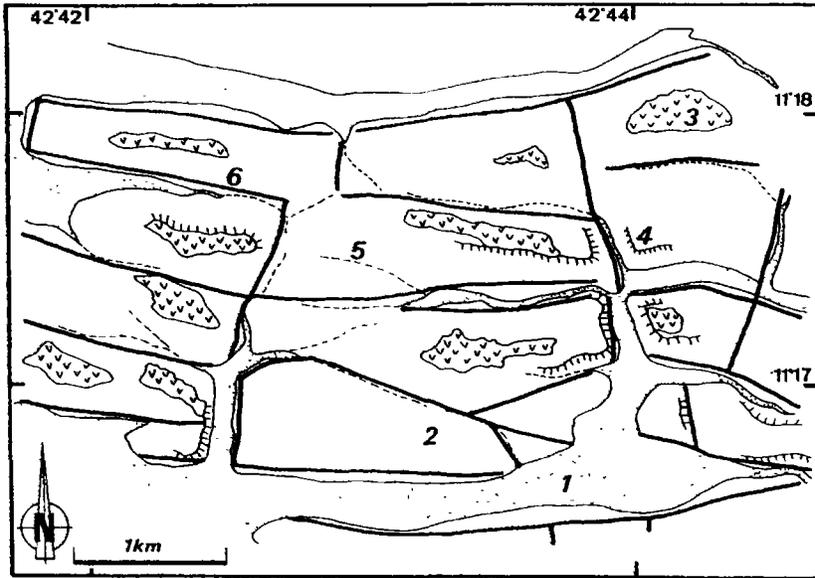


Figure 10. Sud du Petit Bara; 1) roches sédimentaires; 2) basalte du Dalha; 3) basalte stratoïde; 4) falaise; 5) cours d'eau; 6) fractures

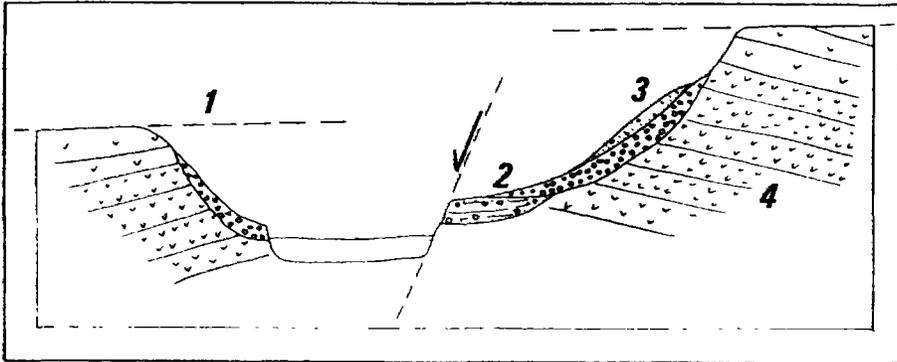


Figure 11. Mouvements verticaux : région de Oueah; 1) niveau de la surface d'érosion décalé; 2) éboulis anciens; 3) éboulis récents; 4) basalte du Dalha

7. Références

- ARTHAUD, F. et CHOUKROUNE, P. 1976. Mise en évidence d'une phase de compression à 3,5 Ma. séparant deux épisodes d'ouvertures du rift océanique de Tadjourah (TFAI). Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. 283, p.13-16.
- ARTHAUD, F., CHOUKROUNE, P. et ROBINEAU, B. 1980a. Tectonique, microtectonique et évolution structurale du golfe de Tadjourah et du sud de la dépression Afar (République de Djibouti). Bulletin de la Société géologique de France, t. XXII, n° 6, p. 901-908.

- ARTHAUD, F., CHOUKROUNE, P. et ROBINEAU, B. 1980b. Évolution structurale de la zone transformante d'Arta (République de Djibouti). Bulletin de la Société géologique de France, t. XXII, n° 6, p. 909-915.
- BANNERT, D. 1972. Plate drift in the Red Sea region analysed from space photograph. Proceedings of the seventh international symposium on remote sensing of environment, Michigan, 17-21 May 1971, p. 1261-1271.
- BARBERI, F., FERRARA, G., SANTACROCE, R. and VARET, J. 1974. Structural evolution of the Afar triple junction. Afar Depression of Ethiopia, Bad Bergzabern, Federal Republic of Germany, April 1-6 1974, Edition A. Pilger and A. Rösler, vol. 1, p. 38-54.
- BLACK, R., MORTON, W. H. and REX, D. C. 1974. Block tilting and volcanism within the Afar in the light of recent K/Ar age data. Afar Depression of Ethiopia, Bad Bergzabern, Federal Republic of Germany, April 1-6 1974, Edition A. Pilger and A. Rösler, vol. 1, p. 296-299.
- CHESSEX, R., DELALOYE, M., MULLER, M. and WEIDMANN, M. 1974. Evolution of the volcanic region of Ali-Sabieh (TFAI), in light of K/Ar age determination. Afar Depression of Ethiopia, Bad Bergzabern, Federal Republic of Germany, April 1-6 1974, Edition A. Pilger and A. Rösler, vol. 1, p. 228-231.
- GAULIER, J.-M. 1990. De l'extension intracontinentale à l'accrétion océanique : géodynamique de la mer Rouge. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 363 p.
- ISERT (Institut supérieur d'études et de recherches scientifiques et techniques) 1986. Carte géologique d'Ali-Sabieh, Notice géologique.
- JALLUDIN, M., ANIS, A., IDRIS, G., MOHAMED, I., SANJUAN, B., GAULIER, J.-M., ZOTSKINA, E., GAFFANEH, A. et HAGA, A. 1990. Alimentation en eau potable de la ville d'Ali-Sabieh. Sciences et techniques, n° 5, p. 13-21.
- KRONBERG, P., SCHONFELD, M., GUNTHER, R. and TSOMBOS, P. 1974. ERTS-1 data on the geology and tectonics of the Afar/Ethiopia and adjacent regions. Afar Depression of Ethiopia, Bad Bergzabern, Federal Republic of Germany, 1-6 April 1974, Edition A. Pilger and A. Rösler, vol. 1, p. 19-27.
- MCKENZIE, D. P., DAVIES, D. and MOLNAR, P. 1970. Plate tectonics of the Red Sea and East Africa. Nature, vol. 226, p. 243-248.
- RAZACK, M. 1984. Applications de méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie. Thèse de doctorat d'État, Université des sciences et techniques du Languedoc, 384 p.
- TAPPONIER, P., ARMIJO, R., MANIGHETTI, I. and COURTILOT, V. 1990. Bookshelf faulting and horizontal block rotations between overlapping rifts in southern Afar. Geophysical Research Letters, vol. 17, n° 1, p. 1-4.

8

Les facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso : l'exemple de Pobé-Mengao

SAMUEL NAKOLENDOUSSE*, ALAIN NINDAOUA SAVADOGO*
et A. ROULEAU**

**Laboratoire d'hydrogéologie, Faculté des sciences et techniques, B.P. 7021, Université de Ouagadougou, Burkina Faso; téléphone : (226) 307159; télécopie : (226) 307242*

***Centre d'études sur les substances minérales, Université du Québec à Chicoutimi, 555, boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, Canada, G7H 2B1; téléphone : (418) 545 5348; télécopie : (418) 545 5012*

Résumé

La sécheresse qui sévit depuis vingt ans au Sahel, la non-disponibilité permanente des eaux de surface, la nécessité de se référer aux eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable des villes ont rendu impérative la recherche sur les facteurs climatiques et hydrogéologiques conduisant à l'obtention de débits élevés (plus de 5 m³/heure) dans les formations cristallines du Burkina Faso. Grâce au soutien du Centre de recherches pour le développement international (C.R.D.I.), le Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou et l'Université du Québec à Chicoutimi ont étudié une vingtaine de sites sur lesquels existent déjà forage à gros débit et forage à faible débit afin d'identifier *post mortem* les conditions de succès ou d'échec de l'implantation de ces forages. Les méthodes suivantes ont été mises en oeuvre : 1) la téledétection, pour la cartographie des linéaments assimilables aux failles affectant le substratum; 2) la géologie, la géophysique et la chimie des eaux (analyses isotopiques), qui ont porté respectivement sur la pétrographie et la tectonique, la localisation précise des failles et la quantité et le renouvellement des eaux souterraines. L'étude du site de Pobé-Mengao que nous prenons comme exemple ici ainsi que les résultats acquis sur les autres sites ont permis de retenir comme facteurs de productivité les éléments suivants : l'hétérogénéité du faciès

granitique, la longueur plurikilométrique de la faille exploitée, son injection par des filons de quartz ou de pegmatites, l'existence de nombreux filons relais sub-horizontaux, l'importante épaisseur de la frange fissurée du substratum et la réalimentation artificielle de la nappe par les eaux des mares aux caïmans.

1. Introduction

La sécheresse qui sévit au Sahel depuis les années 1970 et les conditions géomorphologiques et hydrogéologiques défavorables y ont rendu complexes les problèmes d'alimentation en eau potable des villages et des villes situés dans les régions cristallines du Burkina Faso. Pour les villes en particulier, les forages sollicités pour les adductions d'eau doivent avoir des débits supérieurs à 5 m³/heure. Le mode de gisement des eaux souterraines dans les formations de socle de l'Afrique de l'Ouest est maintenant bien connu (MATHIEZ et HUOT, 1968; ENGALENC, 1978-1979; SAVADOGO, 1984). Il s'agit souvent de poches discontinues d'extension variable liées aux fractures et à l'altération affectant le substratum cristallin. Les débits moyens obtenus dans ces formations se situent entre 1 et 2,5 m³/heure. Dans ces conditions, quels sont les facteurs climatiques, géomorphologiques et hydrogéologiques qui président à l'obtention de débits unitaires élevés dans les formations cristallines du socle qui occupent les quatre cinquième du territoire burkinabè? Telle est la question à laquelle nous tenterons de répondre ici à travers l'étude du site de Pobé-Mengao et en nous appuyant aussi sur les résultats acquis sur vingt autres sites étudiés dans le cadre du projet de recherche intitulé «Étude des facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso». Ce projet de recherche a été financé par le C.R.D.I. et exécuté par le Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou et l'Université du Québec à Chicoutimi.

2. Méthodologie et résultats

Nous avons choisi d'appréhender le problème en étudiant *a posteriori* sur le même site deux forages en production dont l'un à haut rendement et l'autre à faible débit ou négatif c'est-à-dire sec. Les méthodes mises en oeuvre étaient : la télédétection, la géologie, la géophysique et enfin la chimie des eaux.

2.1. La télédétection

Tous les sites étudiés sont situés sur le môle granitomigmatique de Ouagadougou, partie nord de la dorsale de Man. Quand au site de Pobé-Mengao choisi comme exemple, il est situé au nord du Burkina Faso sur l'axe Ouahigouya-Djibo et à 25 km au sud de cette dernière localité. Il est donc en pleine zone sahélienne et ne reçoit que 500 mm de pluie par an. Le site est couvert par l'image satellitaire TM de Landsat 195-51 du 21 janvier 1987 (fig. 1). Cette dernière figure montre également l'ensemble des images et sous-images utilisées dans le cadre du projet.

L'analyse en télédétection a essentiellement consisté à tracer d'abord les linéaments d'importance régionale sur l'image satellitaire sur support papier photographique (canaux 7, 4 et 2).

Les images numériques des mêmes scènes, comportant l'ensemble des canaux TM (1 à 7), ont ensuite été utilisées pour réaliser des compositions multibandes (tab. I).

En sus de l'analyse par compositions multibandes standard et adaptées, plusieurs traitements ont été testés afin de cerner celui qui procurerait la meilleure accentuation des linéaments

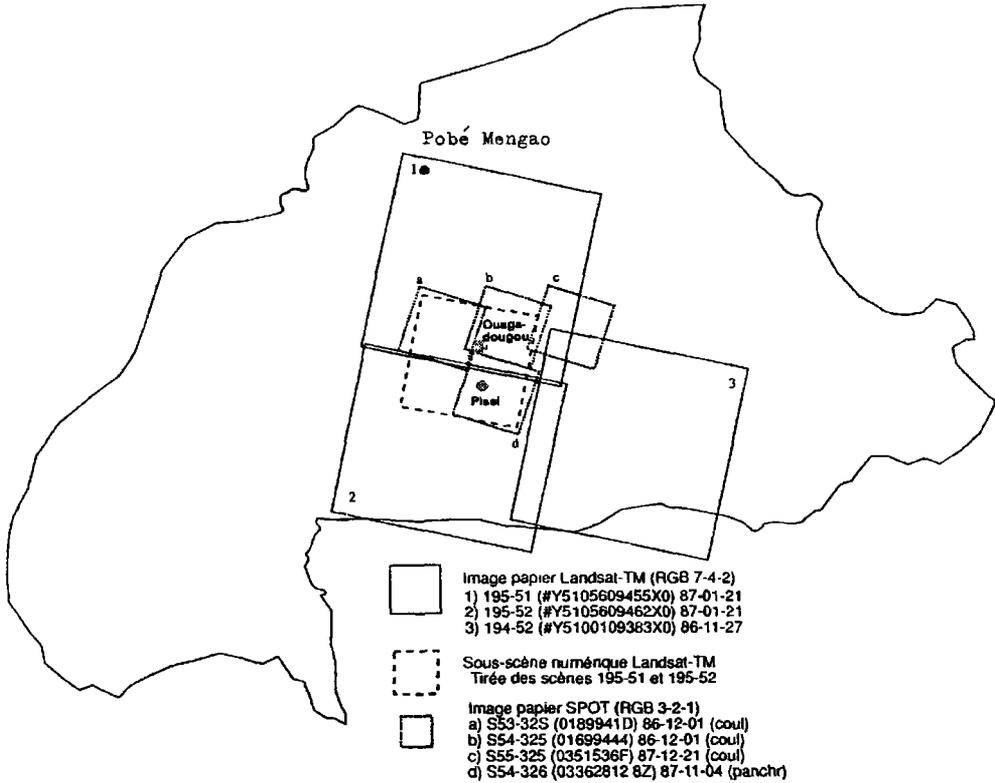


Figure 1. Localisation des images satellitaires acquises pour le projet «Productivité des aquifères du socle au Burkina Faso»

Tableau I. Les produits numériques interprétés

Les compositions multibandes (bandes TM en rouge, vert et bleu)
Composition couleurs conventionnelles 3-2-1
Composition fausses couleurs 4-3-2
Composition conventionnelle de végétation 5-4-3
Composition conventionnelle de végétation 5-3-4
Les algorithmes mathématiques en monochrome
Indice géologique Seuthé <i>et al.</i> (1985) 7/5
Analyse en composantes principales CP2
Les images filtrées en monochrome (filtres appliqués sur la composante principale # 2 (CP2))
CP2 + filtre passe-bas de moyenne (PBM)
CP2 + PBM + filtre directionnel EO
CP2 + PBM + filtre directionnel NS
CP2 + PBM + filtre directionnel NO-SE
CP2 + PBM + filtre directionnel NE-SO

(tab. I). À l'instar de MOORE et WALTZ (1983), nous avons privilégié dans cette étude la technique de rehaussement qui fait appel à une série d'opérations successives à partir d'un néo-canal généré par analyse en composantes principales. Cette analyse en composantes principales utilisant l'ensemble des bandes donne des résultats intéressants sur la deuxième composante (CP2) qui représente à peine 5% de l'information fournie par le capteur TM. La première composante principale a été éliminée en raison de l'information redondante avec celle procurée par les bandes brutes sur lesquelles l'effet des feux de brousse est important. La composante principale numéro 2 (CP2) a donc été retenue comme donnée de base à laquelle nous avons appliqué un filtre passe-bas de moyenne servant de bande d'entrée dans la composition de filtres directionnels de type Sobel (tab. II).

Tableau II. Les filtres directionnels de type Sobel et leurs poids respectifs

Filtre directionnel E-O	1	2	1
	0	0	0
	-1	-2	-1
Filtre directionnel N-S	1	0	-1
	2	0	-2
	1	0	-1
Filtre directionnel NO-SE	0	1	2
	-1	0	1
	-2	-1	0
Filtre directionnel NE-SO	2	1	0
	0	-1	1
	-1	-2	0

Chacune des quatre images filtrées (tirées des 4 directions azimutales) a ensuite été additionnée à la composante principale numéro 2 moyennée pour être interprétée manuellement. Les poids retenus dans la composition du filtre directionnel de type Sobel sont ceux suggérés par Showengerdt, et cotés comme étant les plus performants par YÉSOU *et al.* (1990), auxquels nous avons attribué des orientations adaptées des filtres directionnels de MOORE et WALTZ (1983).

Du point de vue résultats, les compositions multibandes les plus pertinentes demeurent la composition conventionnelle TM5, TM4 et TM3 et la composition infrarouge fausses couleurs TM4, TM3 et TM2 tandis que les traitements qui procurent les meilleurs résultats se révèlent être la deuxième composante principale sur laquelle un filtre passe-bas de moyenne est appliqué.

Le seul rapport de bandes utilisé pour rehausser les contrastes fut celui TM7/TM5. Il a apporté une information intéressante proche de celle fournie par la deuxième composante principale.

L'information résultante de la CP2 tire sa composition surtout des bandes TM7, TM4 et TM6 et permet de voir de nombreux éléments linéaires. Dans l'ensemble, la CP2 avec filtre passe-bas fournit les meilleurs résultats visuels bien que plusieurs linéaments lui échappent et puissent être repérés à l'aide des diverses compositions multibandes. C'est pourquoi nous avons envisagé l'interprétation des linéaments sous l'angle de la complémentarité des résultats des différents produits. En effet, un linéament peut être non apparent sur une image et être complètement révélé sur une autre qui s'avère très pauvre en quantité d'informations.

À des fins de comparaison, les résultats de l'interprétation numérique ont été confrontés à ceux de l'interprétation analogique des photographies panchromatiques afin d'évaluer les avantages mais aussi les limites.

Les linéaments sur les photographies aériennes sont nettement plus denses que ceux tracés sur l'image satellitaire qui eux sont beaucoup plus importants en longueur; mais on note une bonne superposition entre certains linéaments des images satellitaires et ceux des photographies aériennes (fig. 2). Ces linéaments apparaissent selon deux directions principales : N70-N80° et N120-N130° (fig. 3). Sur les photographies aériennes s'observent également des structures annulaires centrées pratiquement sur le village de Pobé-Mengao et dont la signification géologique reste à préciser. La télédétection a donc permis la mise en évidence et la cartographie des mégafractures d'importance régionale ou sectorielle.

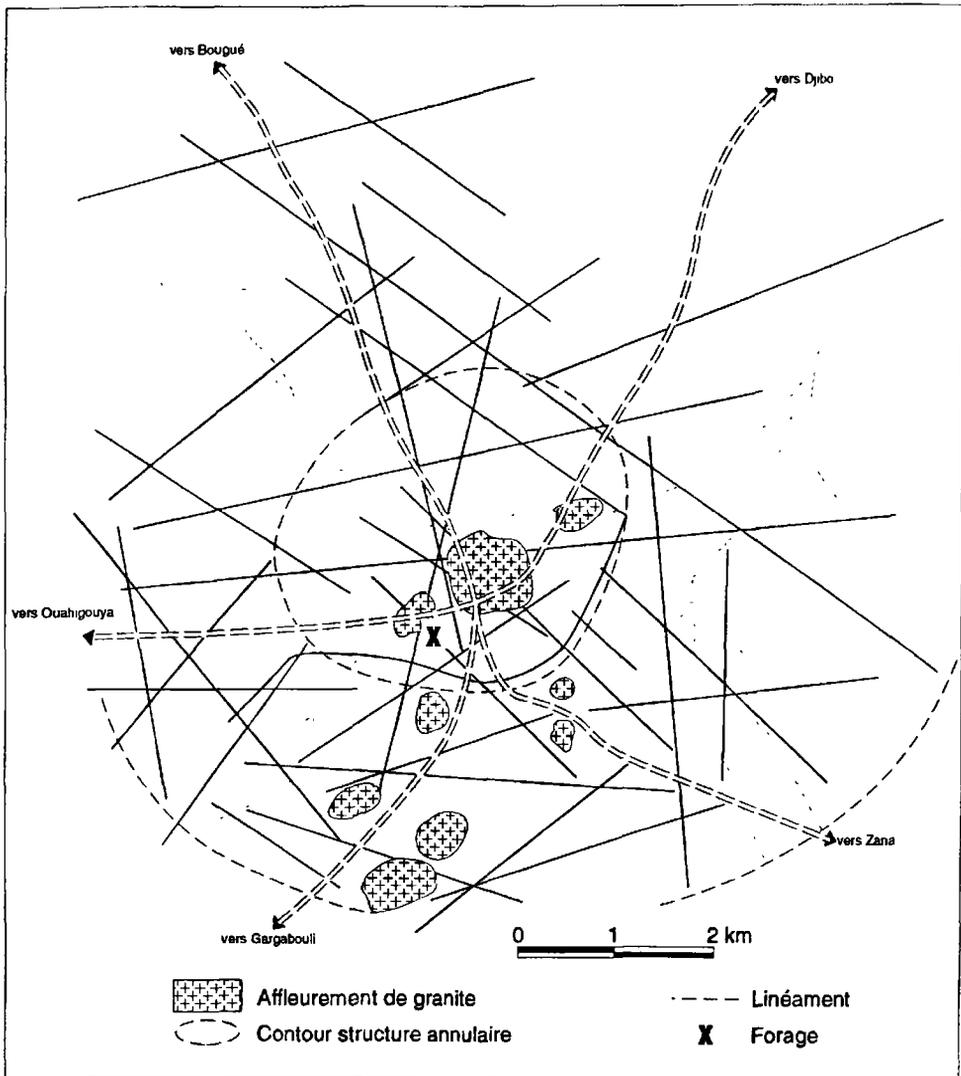


Figure 2. Carte hydrogéologique et tectonique du site de Pobé Mengao

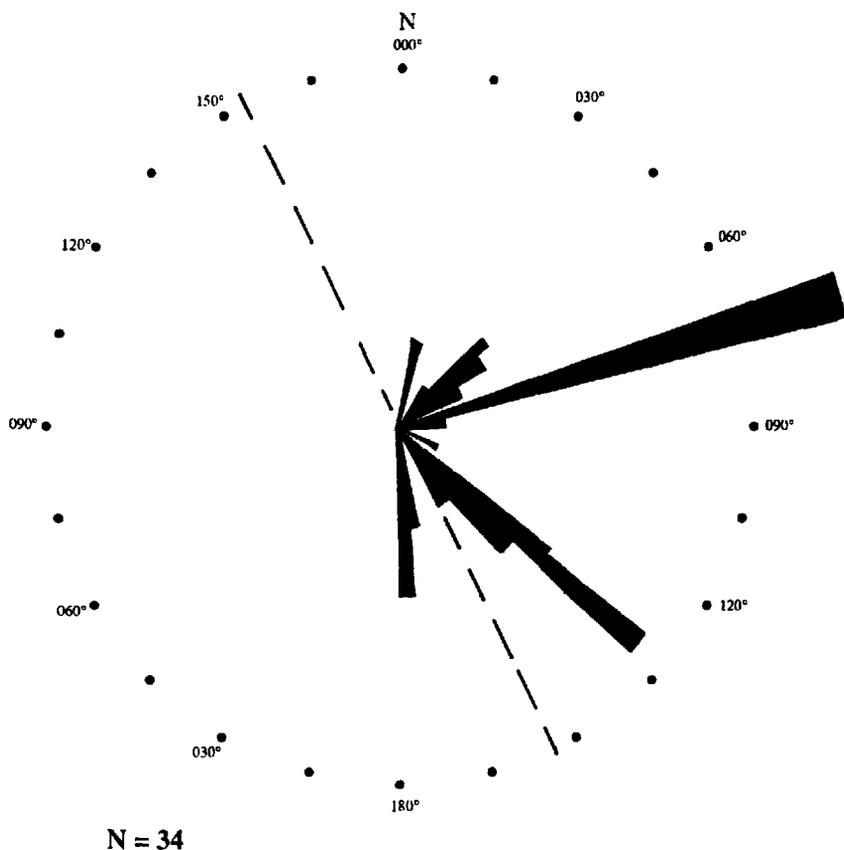


Figure 3. Diagramme de distribution des linéaments

2.2. La géologie et l'hydrogéologie

Le site de Pobé-Mengao appartient au domaine des granites et migmatites libériens décrits par DUCCELLIER et DEFOSSEZ (1949-1950; 1953-1954) comme étant des granites syntectoniques à biotite. Les affleurements sont particulièrement abondants à Pobé-Mengao et permettent de distinguer au nord du village des granites migmatitiques passant vers le sud à des granites plus homogènes à l'intérieur desquels on note, à l'affleurement est du forage très productif que nous avons étudié, des panneaux de migmatite non digérés.

L'étude microtectonique réalisée sur les affleurements indique une prédominance des fractures N60-N70° (fig. 4). Quant aux filons, ils s'injectent souvent selon la direction des failles N140-N160° et plus rarement selon la direction N50-N60° (fig. 5).

Une comparaison des données des images satellitaires et des photographies aériennes avec celles des affleurements laisse apparaître que les fractures les plus fréquentes sur les premières ne le sont pas sur les secondes. De plus, les filons de quartz et de pegmatites n'injectent ni l'une ni l'autre des directions prédominantes sus-mentionnées. On connaît l'importance de l'injection des failles par les filons pour la productivité hydraulique des ouvrages de captage dans les formations de socle cristallin du Burkina Faso (SAVADOGO, 1984).

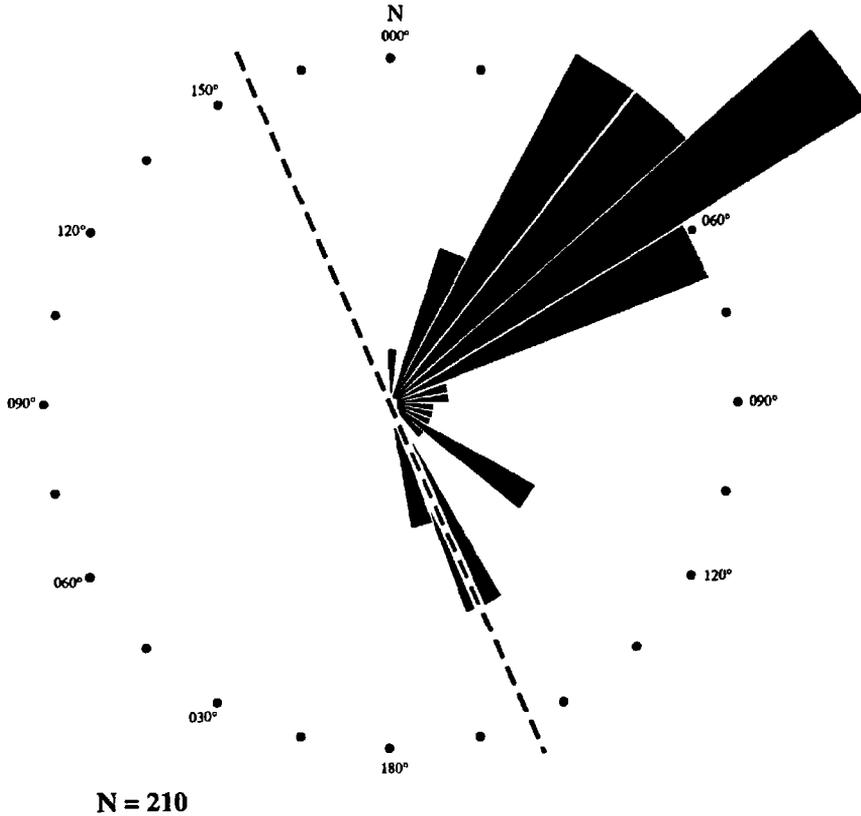


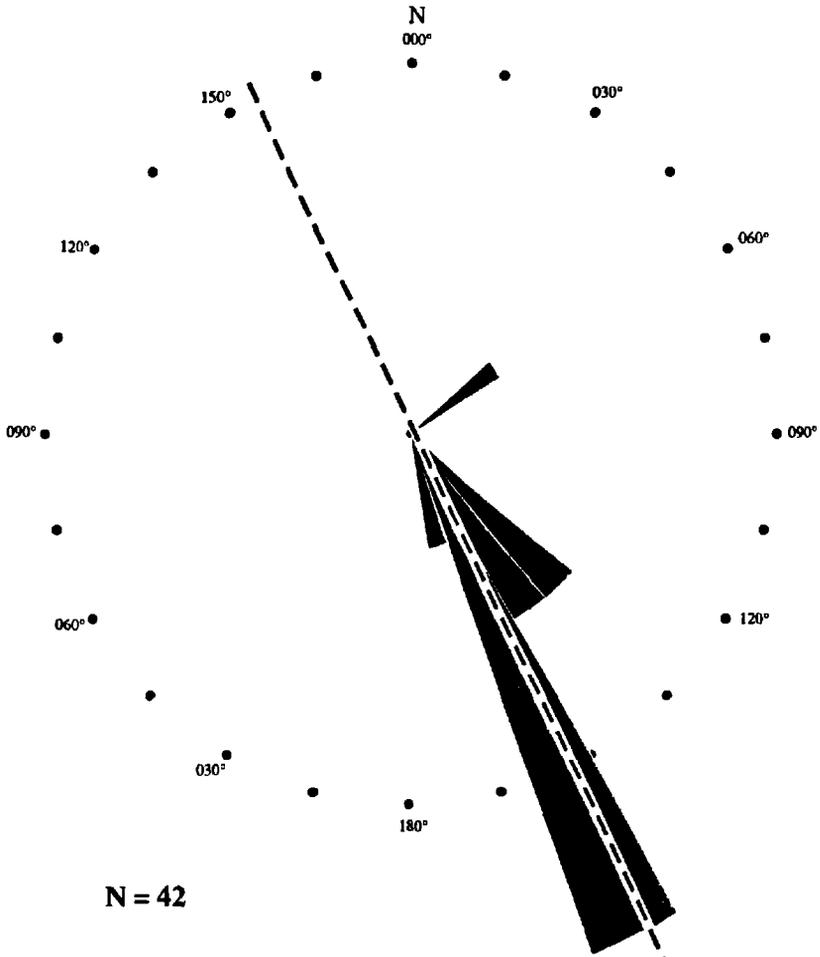
Figure 4. Diagramme de distribution des fractures relevées sur affleurements

Un autre élément hydrogéologique remarquable sur le site de Pobé-Mengao est la présence de filons de quartz sub-horizontaux dans tous les affleurements ainsi que dans tous trous de carrière devenus des mares peuplées de caïmans.

Le site de Pobé-Mengao correspond à une zone de sub-affleurement généralisé comme en attestent l'abondance des affleurements et la présence des sols très sableux. Mais l'exemple de Pobé-Mengao comme celui des nombreux autres sites (Zorgho, Dakaye, Koupéla, Tenkodogo, etc.) montre que si, la grande épaisseur des altérites noyées contribue à accroître les réserves exploitables à long terme voire les débits unitaires (le débit ne dépend-il pas de la transmissivité donc de l'épaisseur de l'aquifère? : $Q = KSi = KLHi = TLi$ avec $Q =$ débit en m^3/s ; $K =$ perméabilité en m/s ; $S =$ section en m^2 ; $L =$ longueur de la section; $H =$ hauteur de la section; $i =$ gradient et $T =$ transmissivité), des débits élevés peuvent très bien se rencontrer dans des zones où le substratum est peu profond. Tout dépend de la présence de drain important lié à l'épaisseur de la frange fissurée du socle induite par les failles.

2.3. La géophysique

Nous avons réalisé en matière de prospection géophysique, des profils de traînée et des sondages électriques et électromagnétiques. Les deux méthodes avaient pour objet de



localiser avec précision les mégafractures vues en télédétection et de permettre l'évaluation de leur extension longitudinale et latérale ainsi que l'épaisseur de la frange fissurée induite. La carte de résistivités apparentes (fig. 6), obtenue avec des longueurs de ligne $AB = 200$ m, $MN = 20$ m, et la carte des pourcentages de champ (fig. 7), réalisée avec une séparation de bobines émetteur-récepteur de 50 m et un pas de 10 m, mettent en évidence deux directions d'anomalie conductrices correspondant aux failles. La première est d'orientation $N50^\circ$ et la seconde $N150^\circ$. La première anomalie conductrice qui n'apparaît pas sur la carte électromagnétique peut être considérée comme secondaire alors que la seconde repérée par les deux méthodes correspond à la direction d'allongement des filons de quartz et de pegmatites. Les mesures rotatoires du champ électromagnétique confirment et précisent cette direction de la faille principale (fig. 8). Cette faille principale a été recoupée par des profils électriques et électromagnétiques sur 3 km et elle présente une extension latérale souvent supérieure à 50 m.

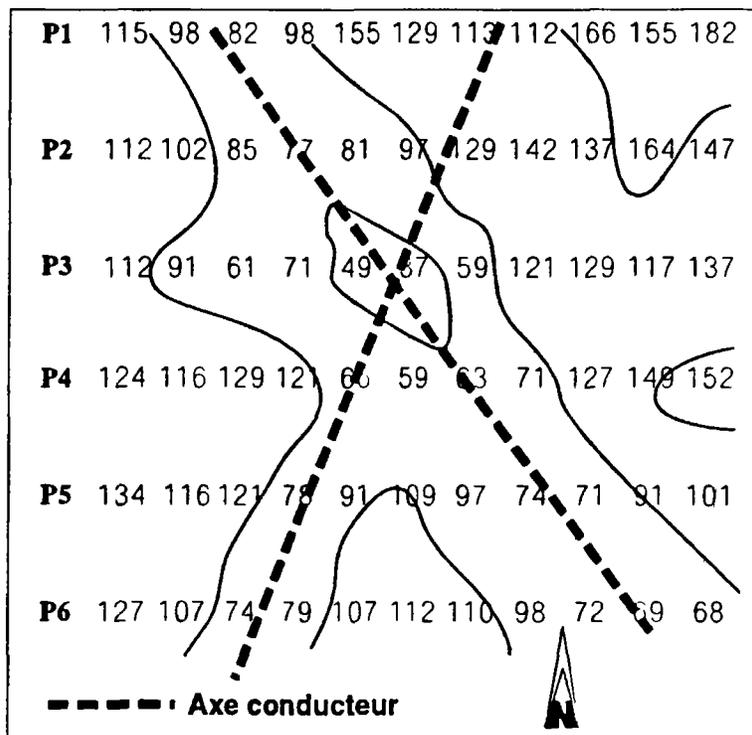


Figure 6. Carte de résistivités apparentes du site de Pobé-Mengao

Les sondages électriques qui donnent des courbes pseudo-trois terrains (fig. 9) (les courbes types rencontrées dans les régions de socle cristallin de l'Afrique de l'Ouest sont des courbes trois terrains en fond de bateau; ici le premier terrain résistant est à peine marqué sur la courbe) indiquent l'existence d'une épaisse frange de roche fissurée, premier facteur de haute productivité hydraulique se traduisant par une remontée finale traînante (SAVADOGO, 1978).

2.4. La chimie des eaux

Les analyses chimiques des eaux indiquent pour Pobé-Mengao une teneur en arsenic de 39,4 ppb (tab. III) et la présence de nitrates qui montre que la nappe qu'exploite le forage est polluée par les eaux des mares aux caïmans qui participent à sa réalimentation. Les teneurs en arsenic ne sont pas négligeables même si elles sont inférieures à celles rencontrées dans quatre des onze eaux de forage analysées. Il y a donc lieu, dans les analyses usuelles des eaux de forage, de doser systématiquement l'arsenic, eu égard à la toxicité de cette substance.

Les teneurs en tritium (tab. IV) montrent que les eaux du forage de Pobé-Mengao malgré la situation géographique du site sont les plus tritiées. Ce qui indique que les eaux souterraines qu'exploite le forage productif de Pobé-Mengao connaissent un bon renouvellement à partir des eaux de pluie.

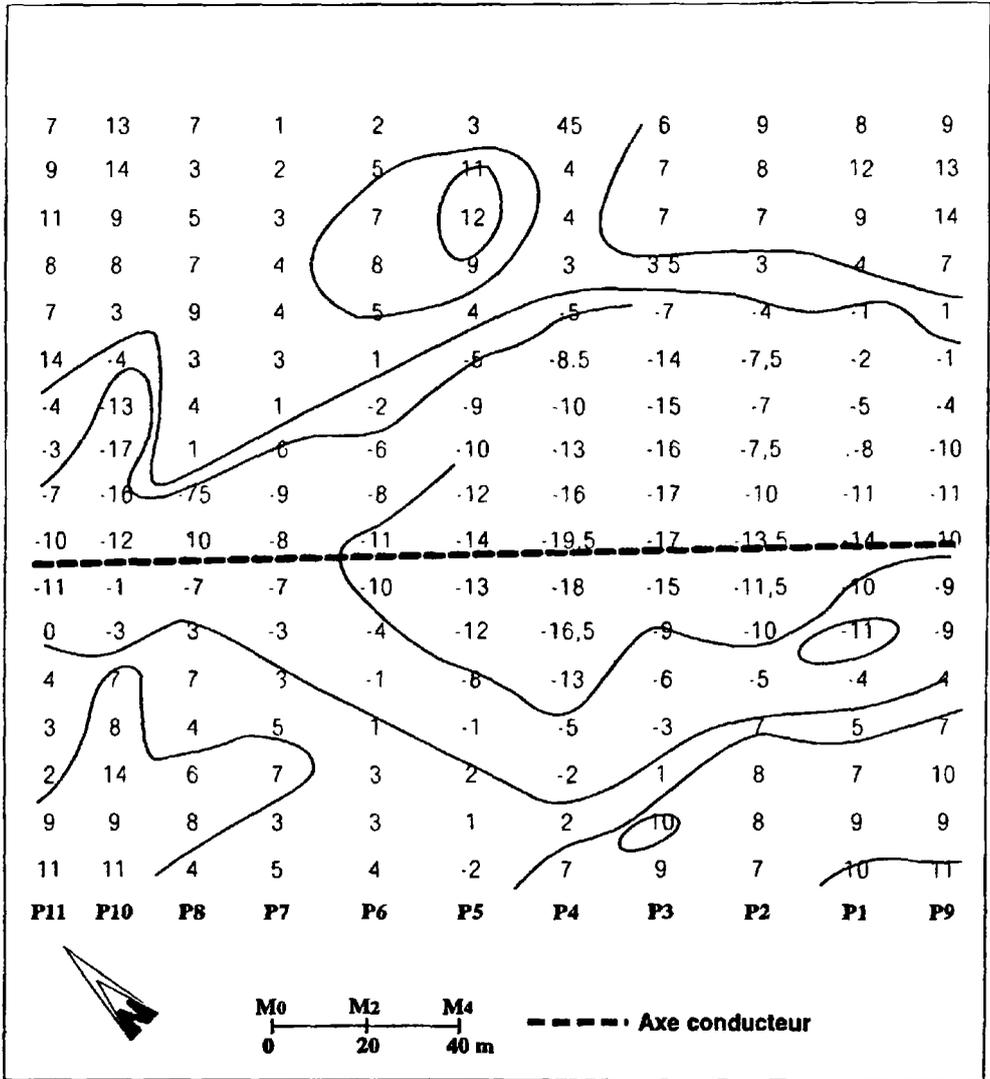


Figure 7. Carte de pourcentage de champ électromagnétique du site de Pobé-Mengao

3. Conclusion

L'étude du site de Pobé-Mengao, comme celles réalisées dans d'autres sites de plusieurs régions du socle cristallin du Burkina Faso, nous permet de dégager, après la mise en oeuvre de la télédétection, de la géologie, de la géophysique et de la chimie des eaux, les facteurs de productivité hydraulique suivants :

- la longueur plurikilométrique (3 km au moins dans le cas de Pobé-Mengao) de la faille sur laquelle est implanté le forage, le recoupement de cette mégafaille par une autre faille au point d'implantation (il s'agit donc d'une intersection de fractures dont une au moins est majeure);

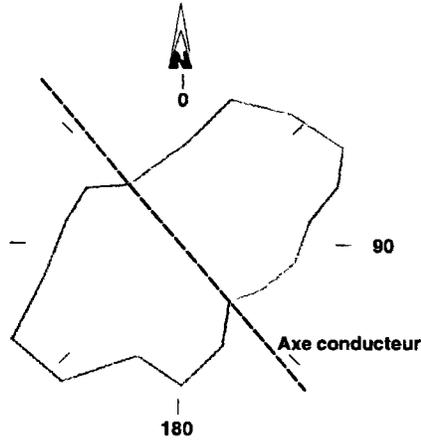


Figure 8. Diagramme de mesures rotatoire du champ avec bobines horizontales

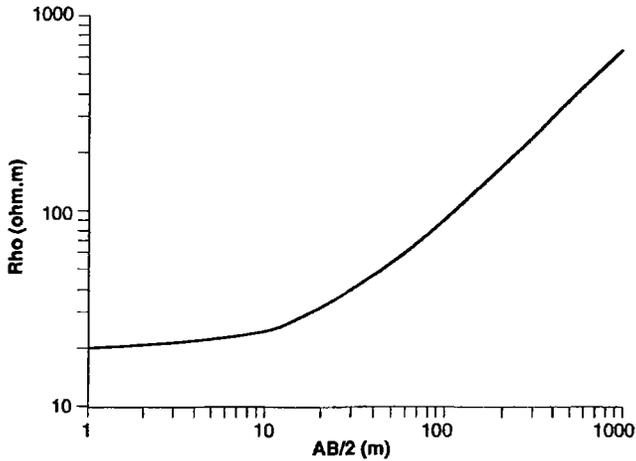


Figure 9. Courbe de sondage électrique

- l'injection de la mégafracture par des filons de quartz ou de pegmatite;
- l'existence de filons de quartz relais sub-horizontaux assurant l'interconnexion entre les failles verticales ou obliques;
- la présence d'une épaisse couche de roche fissurée, premier facteur de productivité hydraulique donnant à la remontée finale de la courbe de sondage électrique une allure traînante;
- latéralement, cette zone broyée s'étend sur 50 m au moins à Pobé-Mengao;
- la réalimentation exceptionnelle de la nappe à travers les sols sableux et les mares entourant le forage. Ailleurs, cette condition est remplie pour des forages situés aux abords des marigots ou plus généralement dans les zones de bas-fonds.

Il importe de souligner que dans notre contexte d'étude, le substratum rocheux est généralement enfoui sous des altérites épaisses de 10 à 50 m. Cependant, les seules réserves d'eau souterraine qu'on y rencontre sont constituées par des poches d'extension variable liées aux fractures affectant le socle. Or la cartographie de ces fractures est impossible à réaliser

Tableau III. Quelques résultats d'analyse de l'arsenic (mesures effectuées par spectrométrie de masse, source au plasma)

Échantillon	Concentration (mesurée en ppb)
Rectorat	19,3
ISP	18,0
Lay1	21,6
Lay2	33,6
Pobé-Mengao	39,4
Guilungou	4,1
Ziniaré	50,2
Rakaye	48,0
Pissi	49,5
Doulougou	43,3
Sambin	36,9

Tableau IV. Quelques résultats d'analyse du tritium

Échantillon	Unités de ^3H	Écart type
Rectorat	9,8	2,8
ISP	11,2	2,8
Lay1	<6	
Lay2	12,9	2,8
Pobé-Mengao	16,9	2,8
Guilongou	<6	
Rakaye	<6	
Pissi	7,6	2,7
Sambin	<6	
Bangrin	<6	
EIER	8,6	2,6

à partir d'observations directes de terrain. En autorisant une vision synoptique des régions étudiées, la télédétection nous a permis de cartographier les linéaments que nous assimilons aux failles. Le seul problème est que si la plupart des failles se traduisent par des linéaments, tous les linéaments ne sont pas des failles. C'est pourquoi nous avons fait intervenir la géophysique pour préciser la nature et la localisation des linéaments.

Il apparaît donc que la télédétection qui permet de s'affranchir de la couche épaisse des altérites est un outil incontournable lorsqu'on veut cartographier les mégafractures sur lesquelles on doit implanter les forages à débit unitaire élevé. Mais des études sont à mener afin de différencier ceux des linéaments qui ont une signification hydrogéologique.

4. Références

- DUCELLIER, J. et DEFOSSEZ, M. 1949-1950, 1953-1954. Notice de la carte géologique de reconnaissance de la Haute-Volta. Feuilles ND-30 SE et ND-30 NE (partie Haute-Volta) dressées et publiées par le Bureau de recherches géologiques et minières (B.R.G.M.), 1961
- ENGALENC, M. 1978-1979. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Mémoire du CIEH, volume 1 et 2.
- MATHIEZ et HUOT 1968. Prospection géophysique et recherche d'eau souterraine, Exemples d'application en Afrique de l'Ouest. Mémoire du CIEH.
- MOORE, G. and WALTZ, F. 1983. Objective Procedures for Lineament Enhancement and Extraction. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 49, n° 5, p. 641-647.
- SAVADOGO, N. A. 1978. La géophysique appliquée à la recherche d'eau dans les formations cristallines de Haute-Volta. Bulletin de liaison du CIEH, n° 35.
- SAVADOGO, N. A. 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta, Étude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de doctorat d'État, Université Grenoble I, 350 p.
- SEUTHÉ, C. *et al.* 1985. Études géologiques par interprétation d'images Landsat accentuées. *in* Bernier, M., Lessard, G. et Gagnon, P. (éd.). Télédétection et gestion des ressources : l'aspect opérationnel, L'Association québécoise de télédétection, p. 295-308.
- YÉSOU, H., SAINT-JEAN, R., PION, J.-C. et BESNUS, Y. 1990. Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical : exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo, Afrique Occidentale). *in* Dubois, J.-M. M. et Blasco, F. (éd.) Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Les Presses de l'Université du Québec, p. 253-269

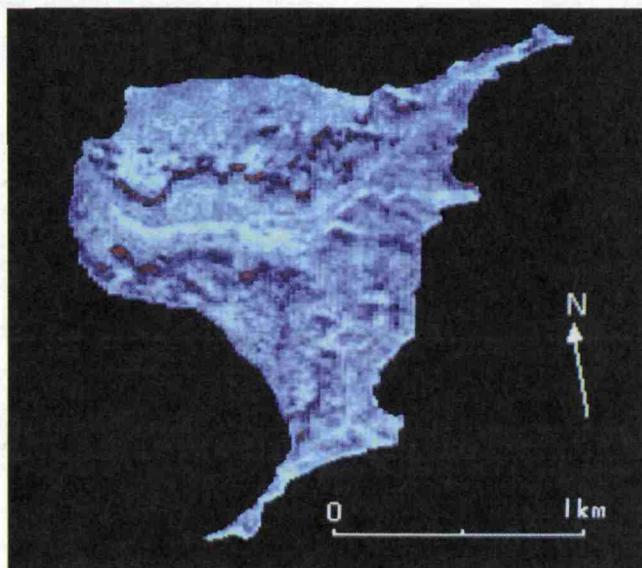


Figure 1-3. Composition colorée de XS1, XS2 et XS3; image enregistrée par SPOT 1 le 14 mai 1989 à 10 h 19 min 47 s heure locale; azimut solaire : 34,5°; hauteur solaire : 41°; les plantations de cocotiers et d'arbres fruitiers sur les terrains plats sont représentées en rouge; les graminées sur les versants apparaissent en vert (© CNES-SPT)

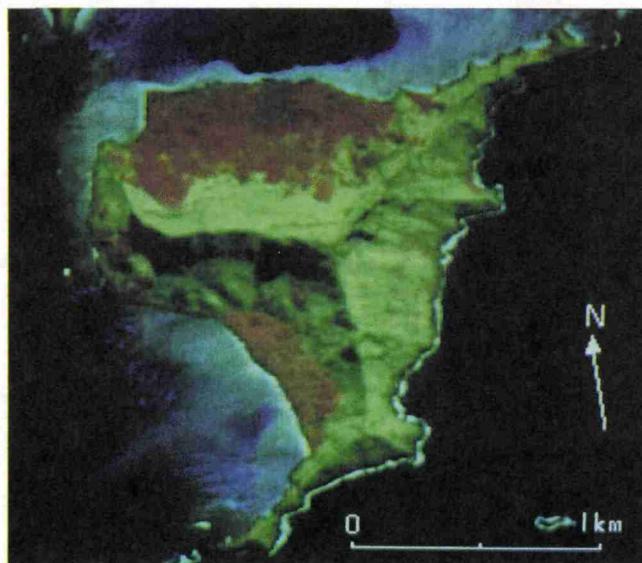


Figure 1-12. Image obtenue à l'issue du traitement; les zones de végétation humide ressortent en rouge sur un dégradé de bleus correspondant aux zones non classées

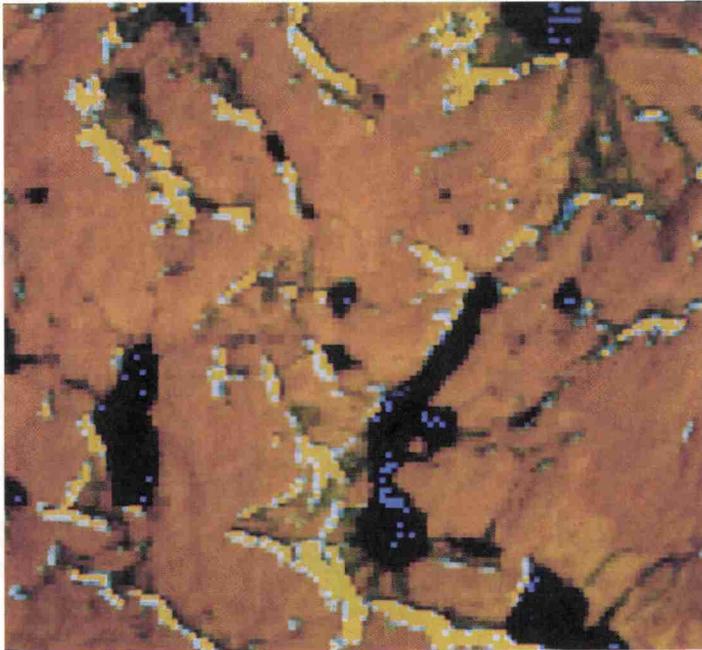
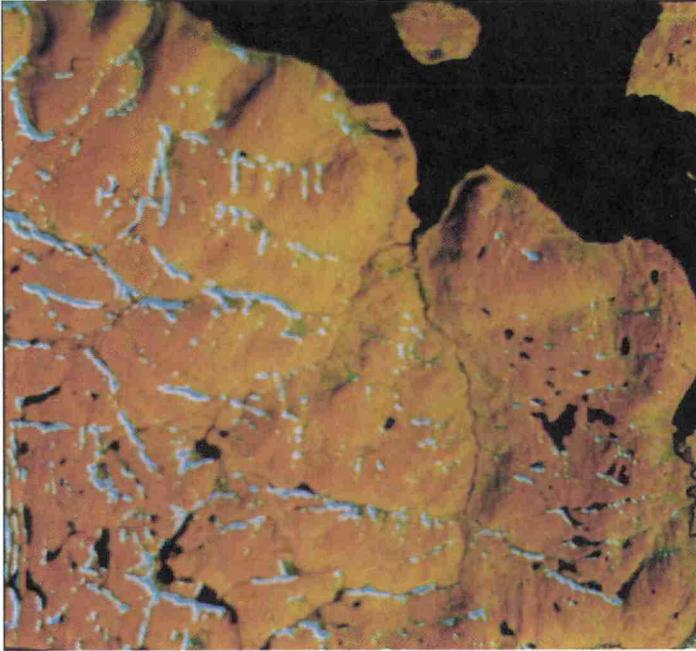


Figure 3-5. Sous-scènes de l'image TM d'Ungava : a) bandes TM2, 4 et 5 rehaussées en bleu, vert et rouge; b) seuillage en jaune de la neige

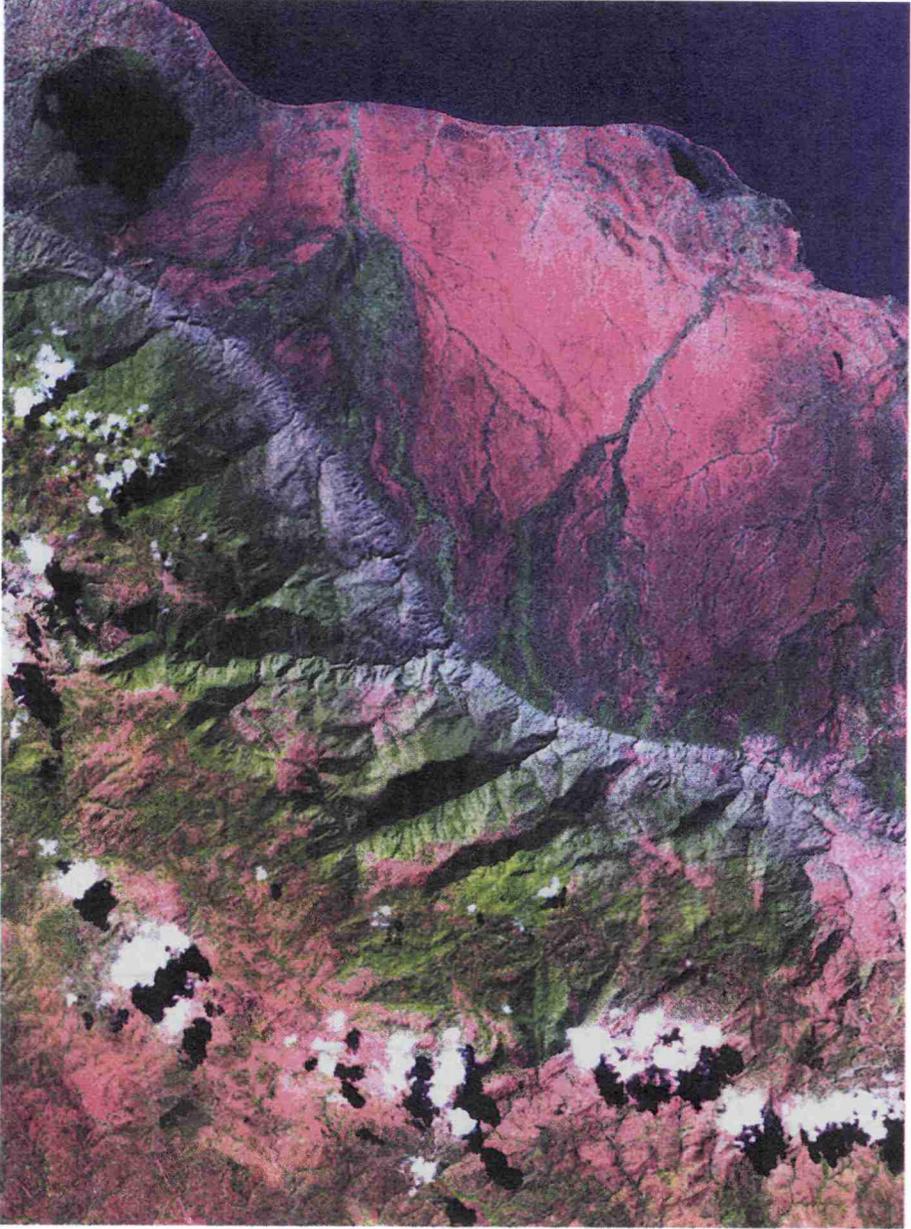


Figure 4-2. Composition colorée TM5-TM4-TM1 en rouge, vert et bleu de la zone de l'escarpement et de la plaine Kasenyi

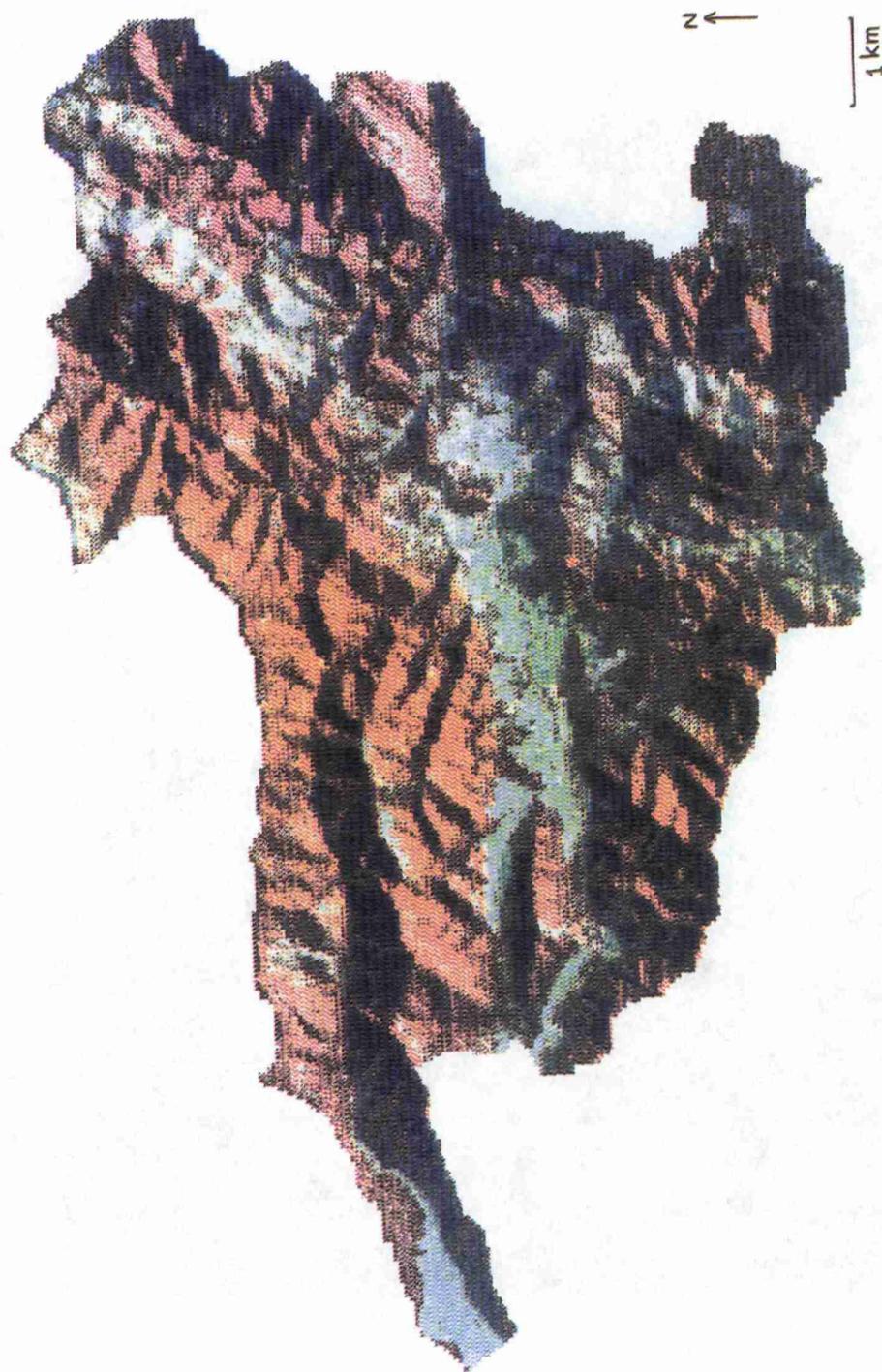


Figure 6-3. Image brute HRV de SPOT-1 du 24 janvier 1989 du bassin versant du Réal Collobrier avec une perception sensible du relief



Figure 6-4. Image corrigée HRV de SPOT-1 du 24 janvier 1989 du bassin versant du Réal Collobrier avec une atténuation de la perception du relief

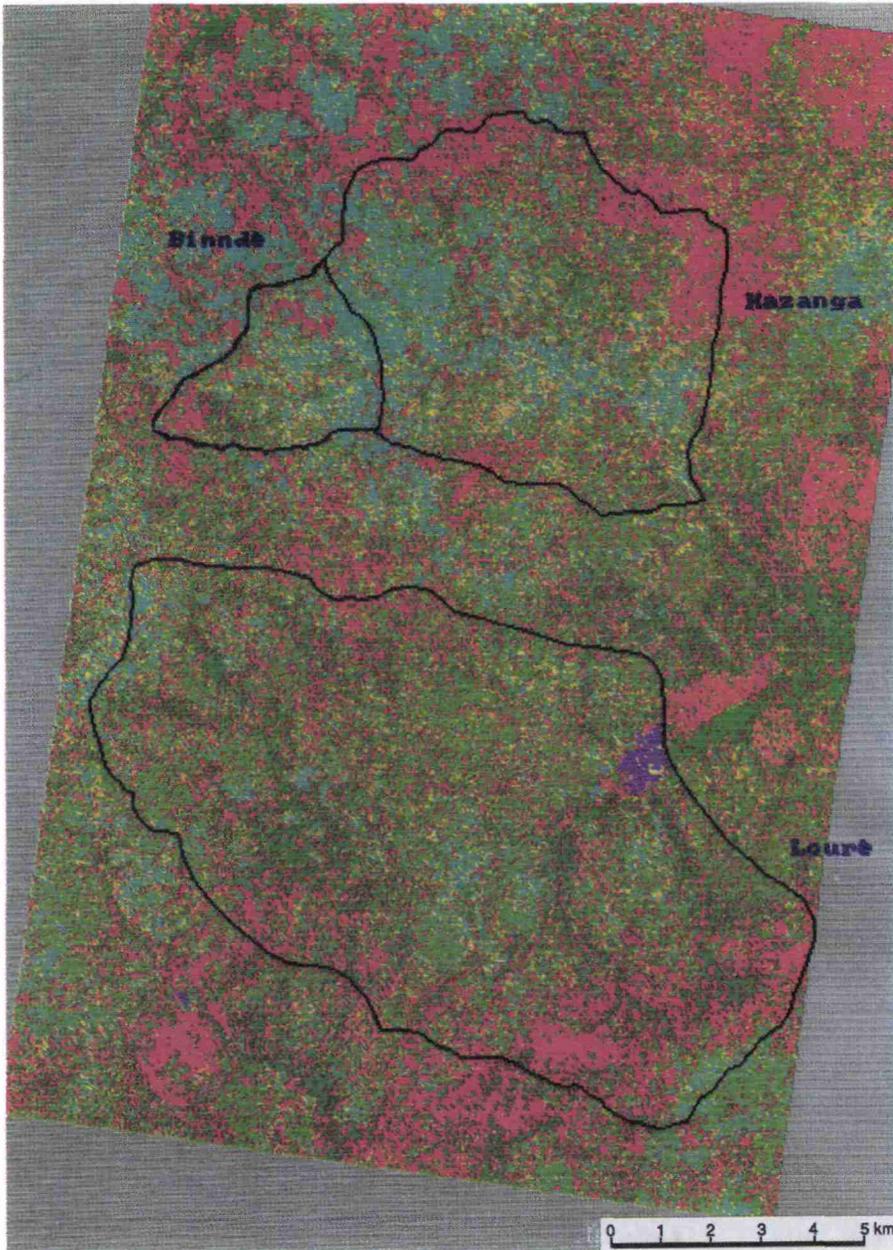


Figure 9-5. Image des classes d'états de surface

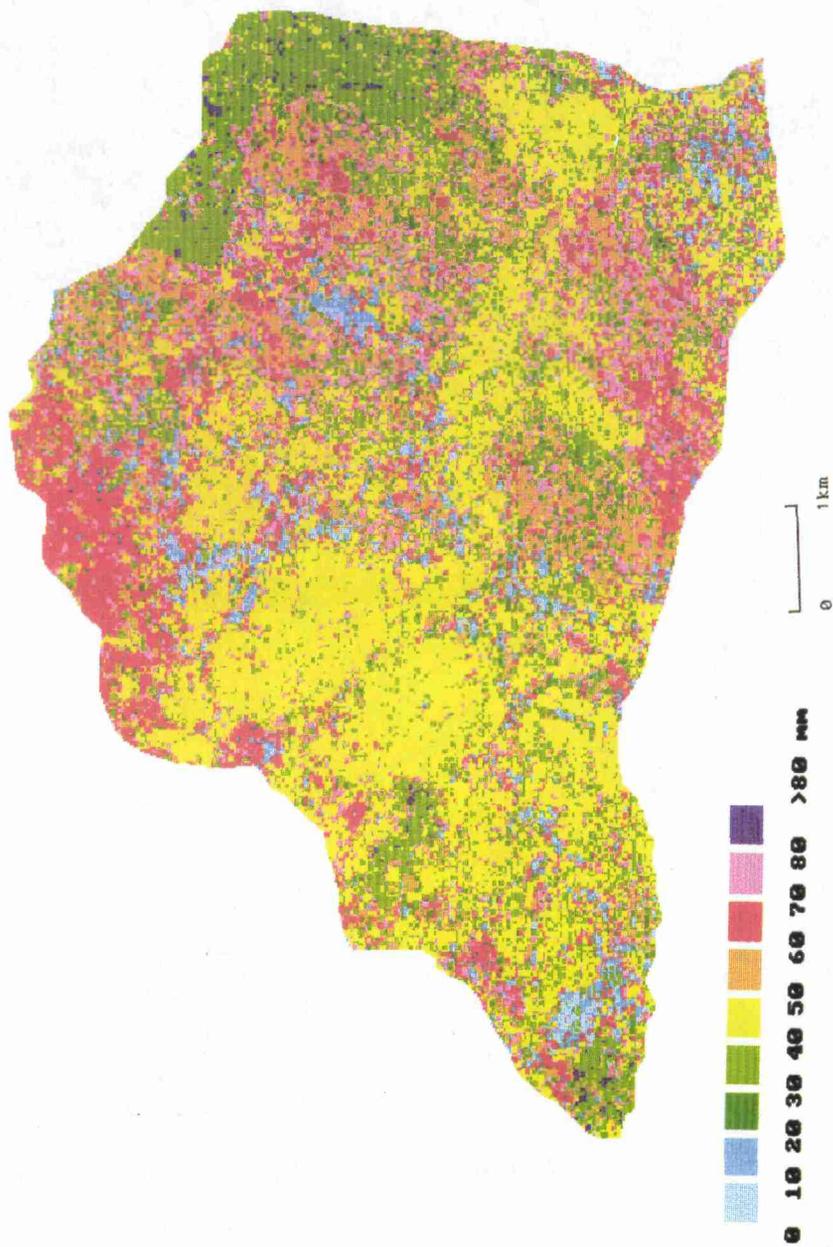


Figure 9-6. Image des lames ruisselées

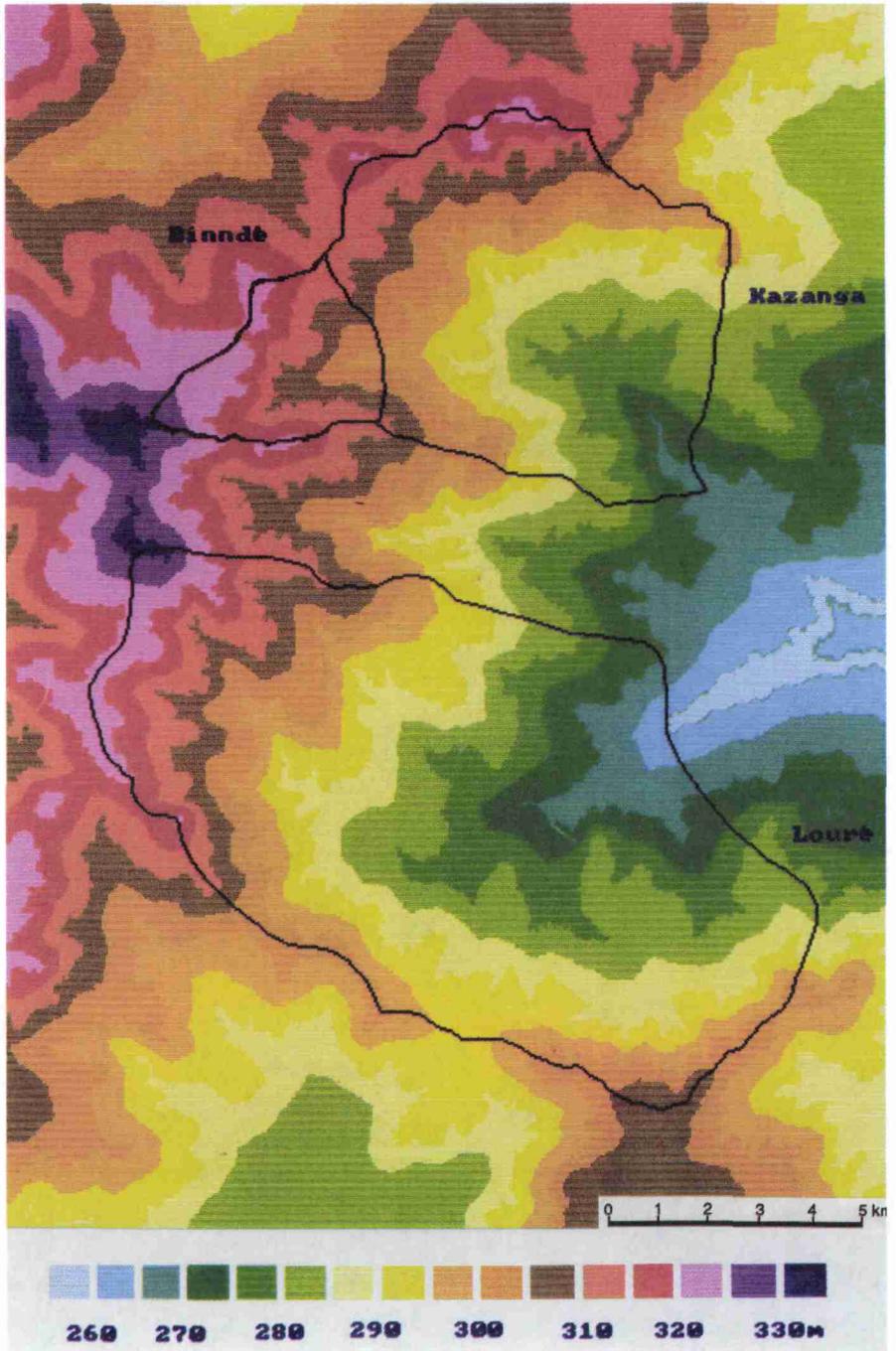


Figure 9-9. Modèle numérique de terrain

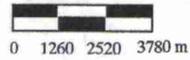
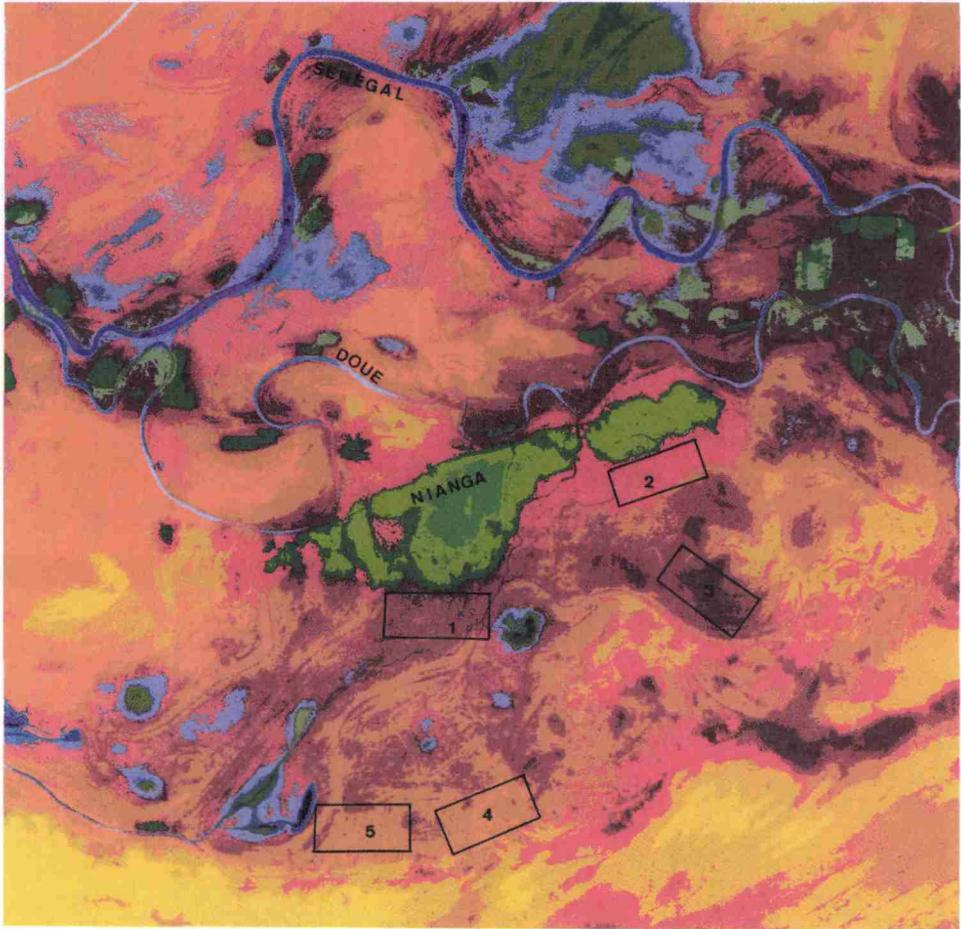
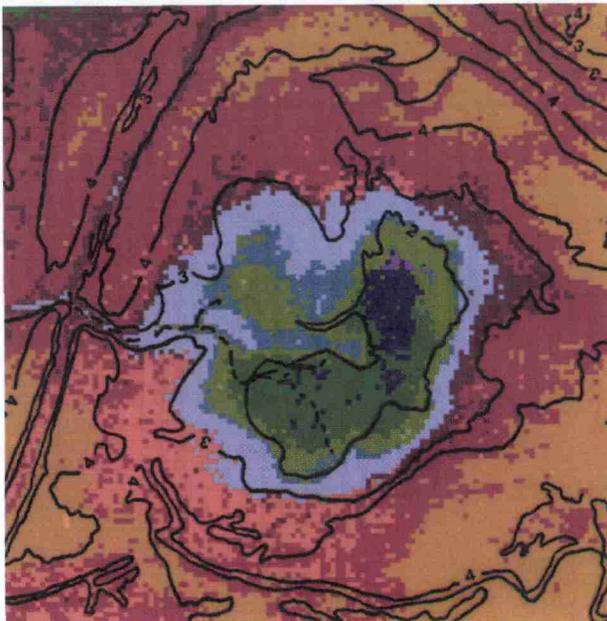
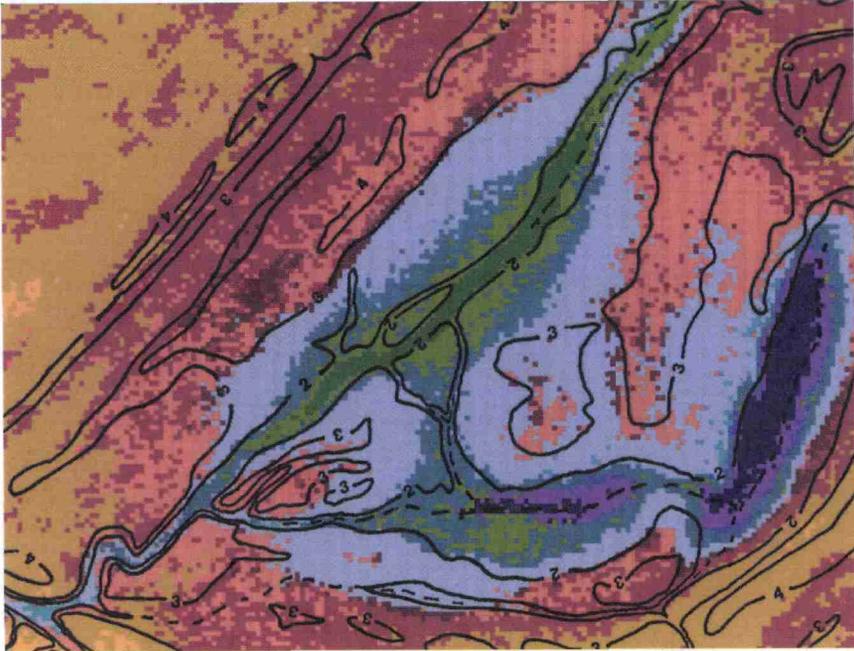


Figure 10-3. Image classifiée



0 310 620 930 m

Figure 10-5. Détails de l'image classifiée sur les zones inondées (altimétrie en m surimposée)

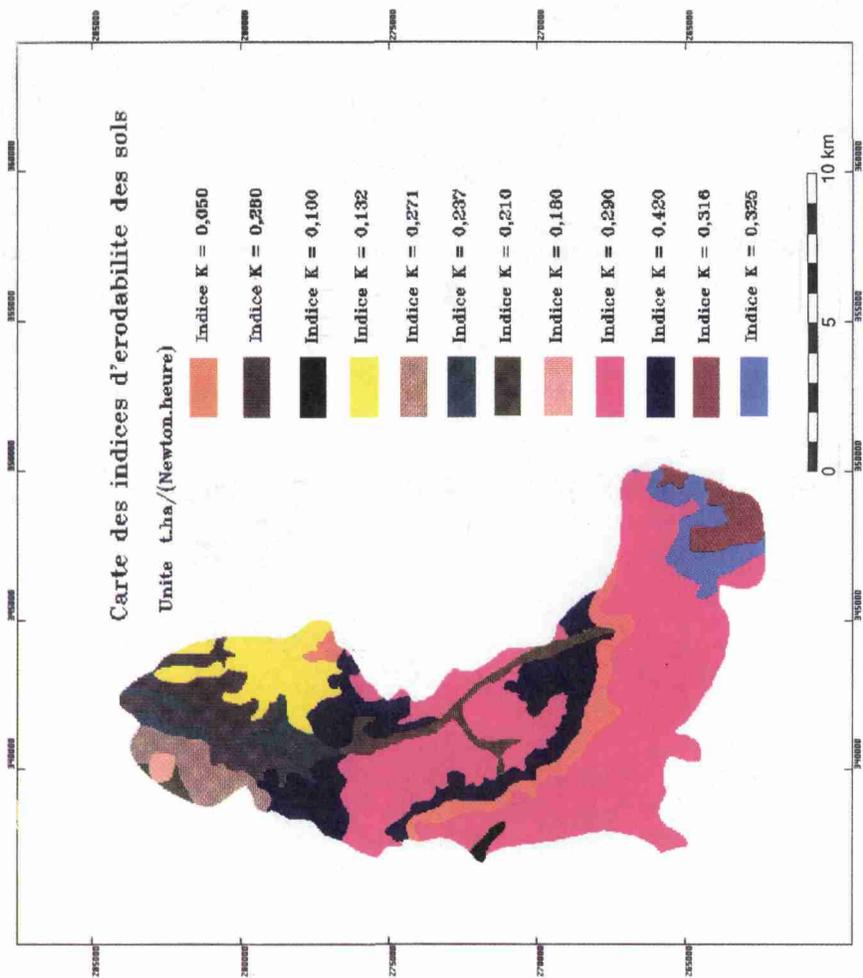


Figure 11-1. Carte des indices d'érodabilité des sols

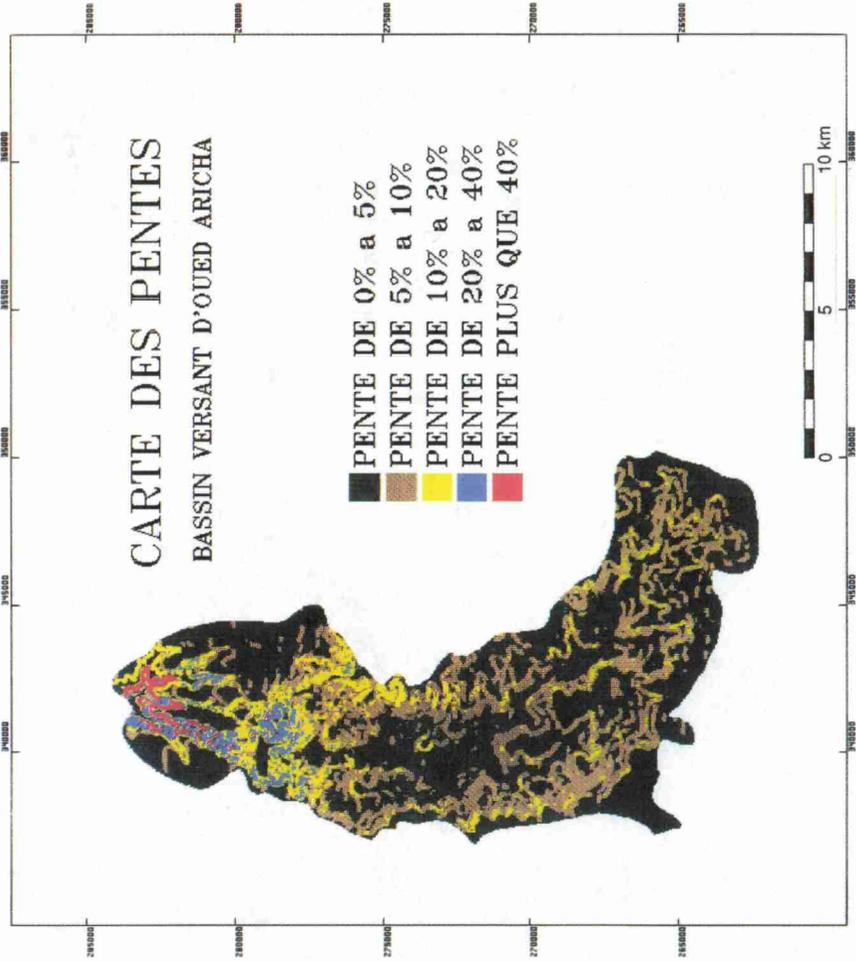


Figure 11-2. Carte des pentes

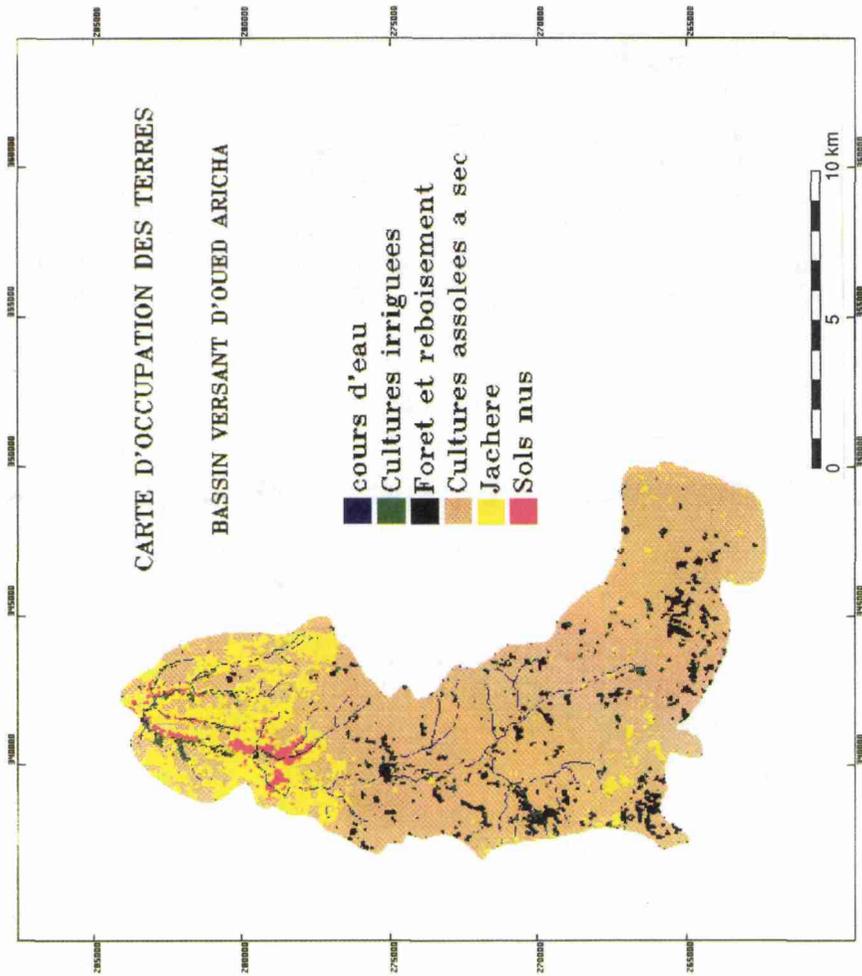


Figure 11-4. Carte d'occupation des terres

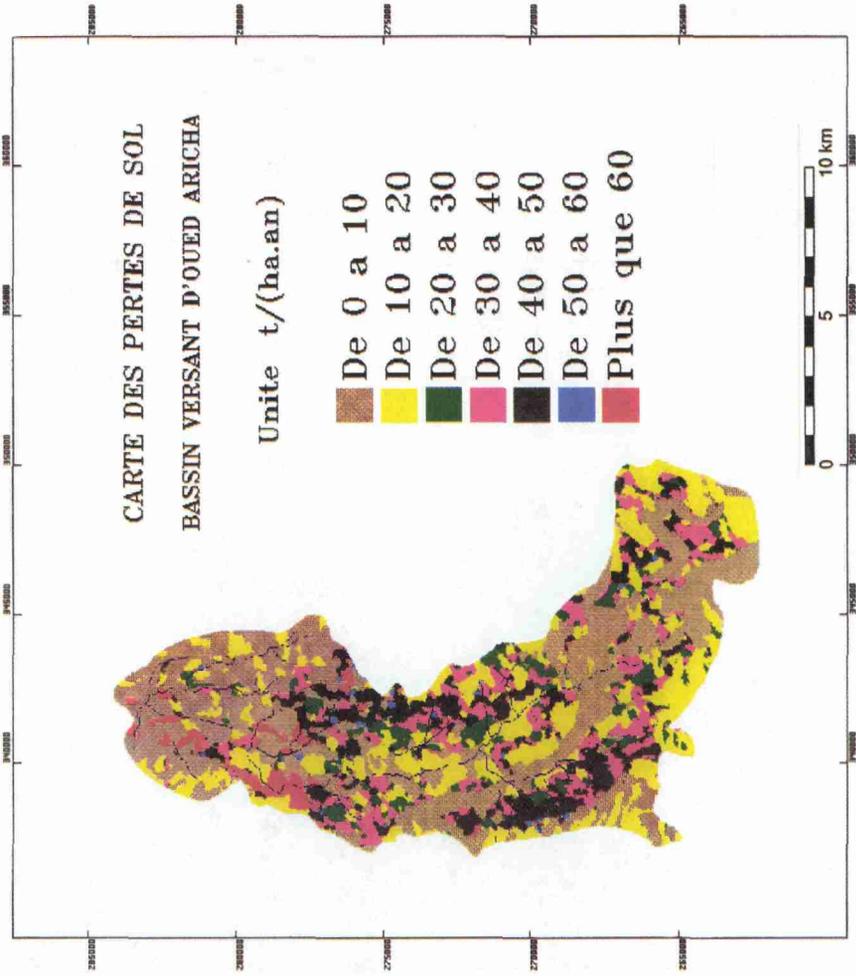


Figure 11-5. Carte des pertes de sols

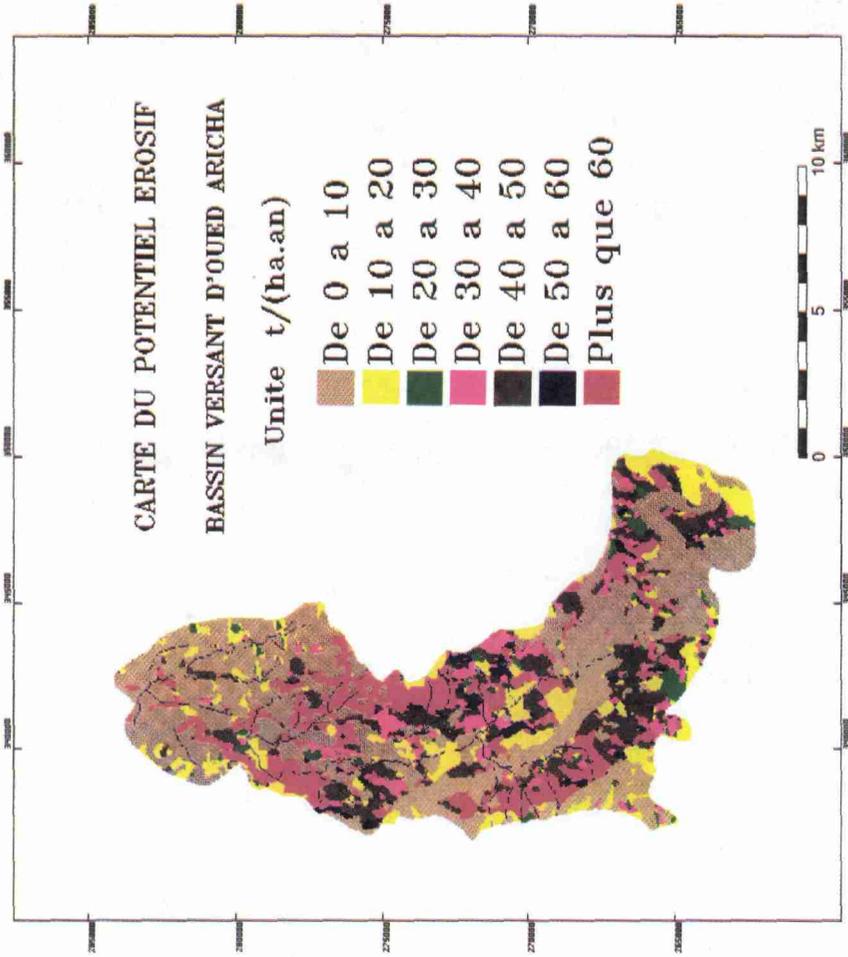


Figure 11-6. Carte du potentiel érosif

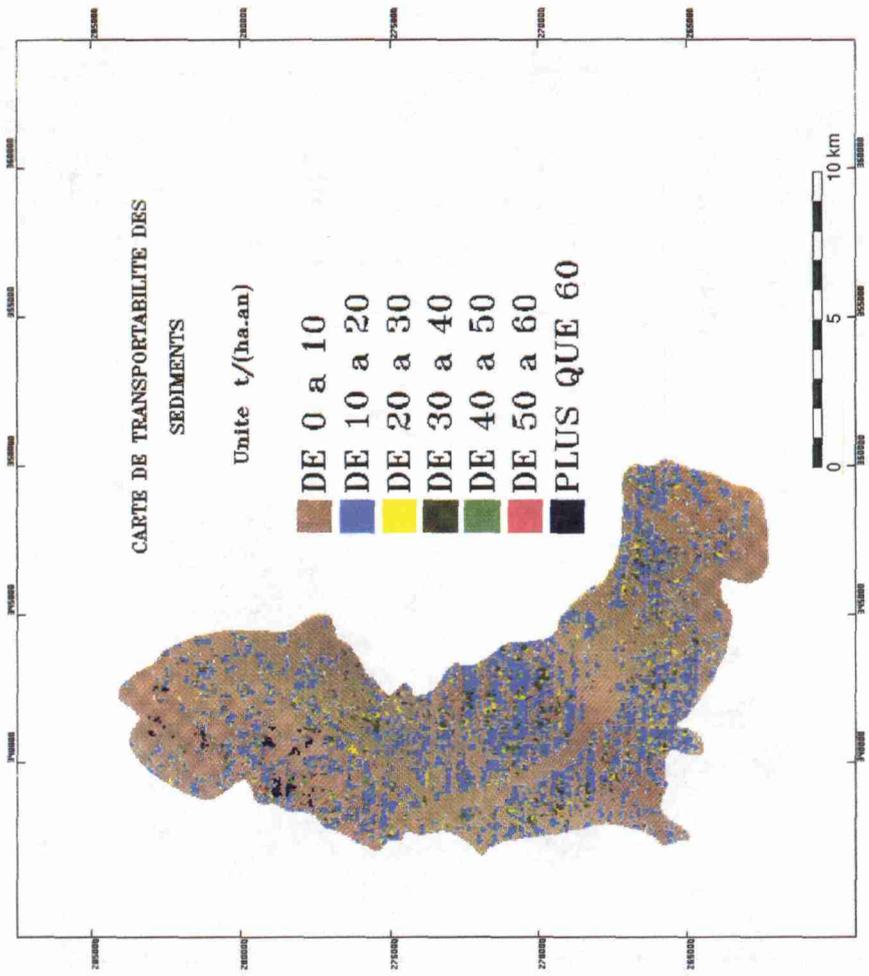


Figure 11-7. Carte de transportabilité des sédiments

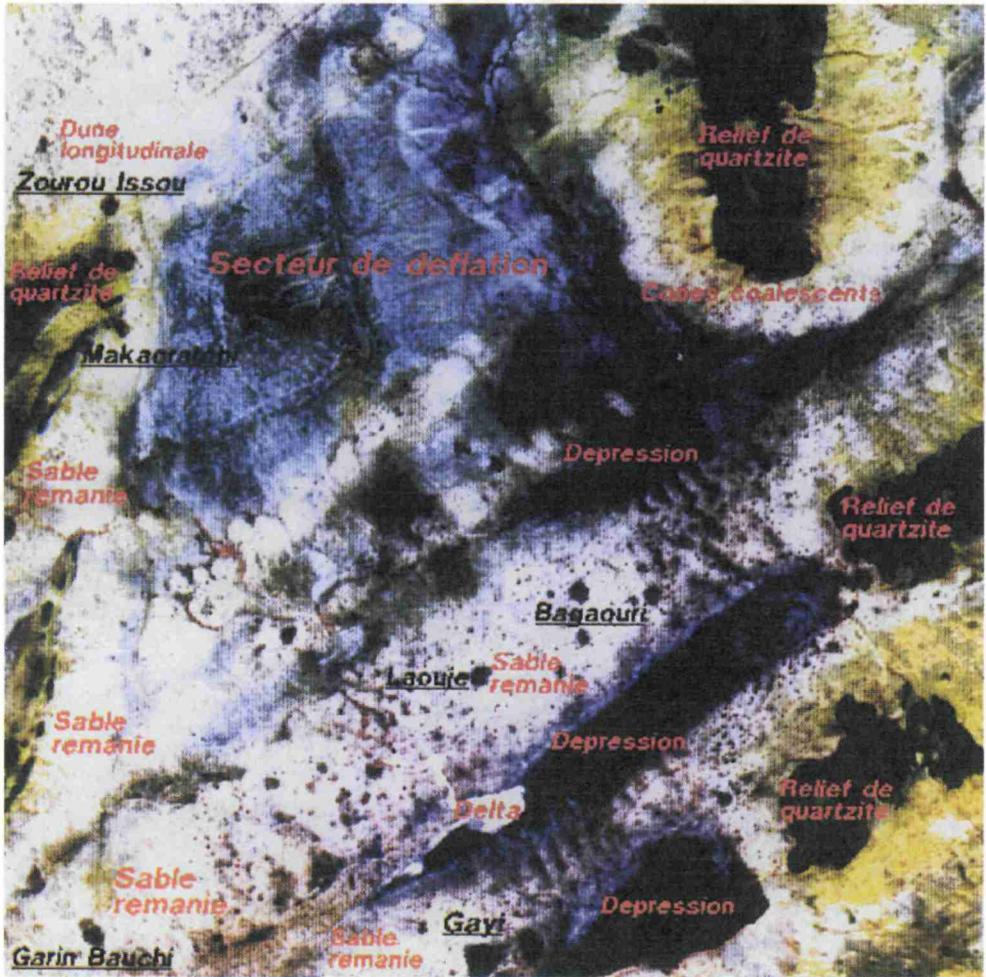


Figure 12-4. Composition colorée de la zone d'intérêt (image HRV de SPOT du 22 novembre 1987)

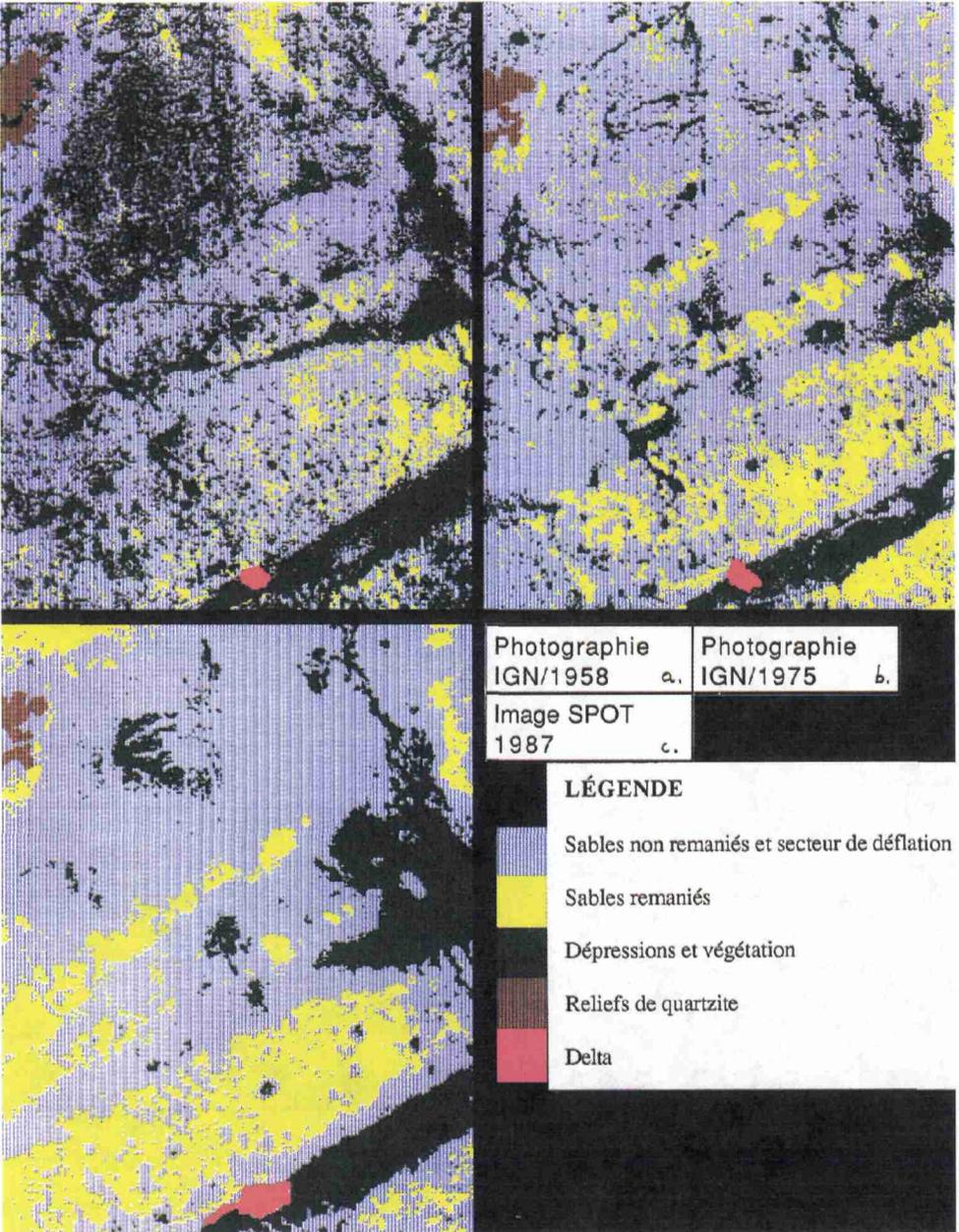


Figure 12-5. Évolution du secteur de Makaoratchi entre 1958 et 1987



Figure 12-6. Anémomorphisme des arbustes dans les zones situées sous le vent des reliefs résiduels (sud de Makaoratchi)

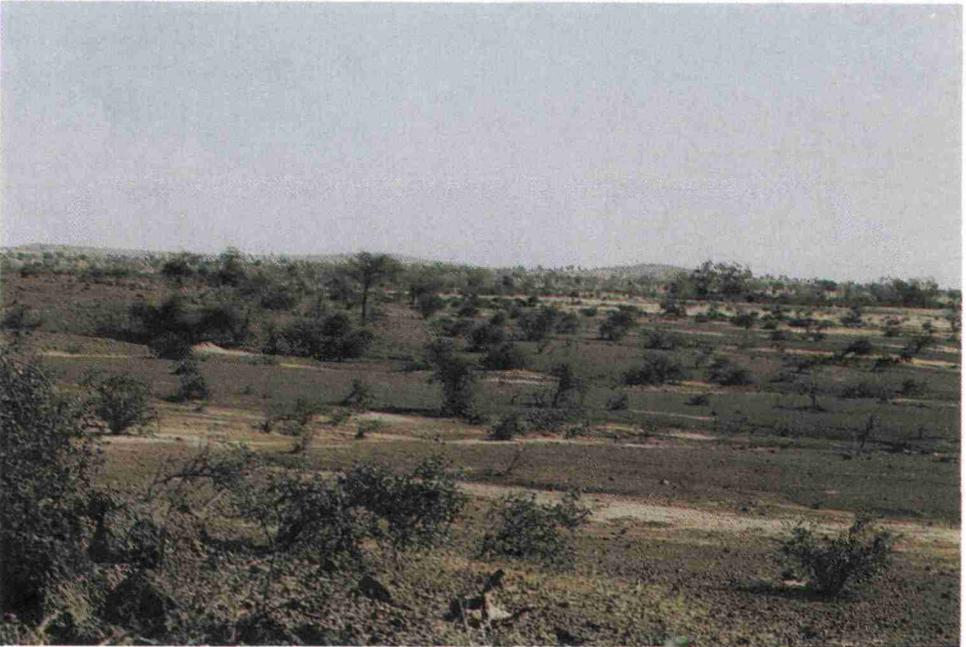


Figure 12-7. Épandage dénudé de grenailles latéritiques (sud de Makaoratchi)



Figure 12-8. Remise en mouvement des sables sur le sommet d'une dune ancienne (ouest de Zinder)



Figure 12-9. Caoudeyre creusé par le vent près d'une haie plantée pour fixer les sables (sud de Wacha)



Figure 13-2. Morphologie du cirque de Dioso; aspect de la paroi bordière et des arêtes centrales

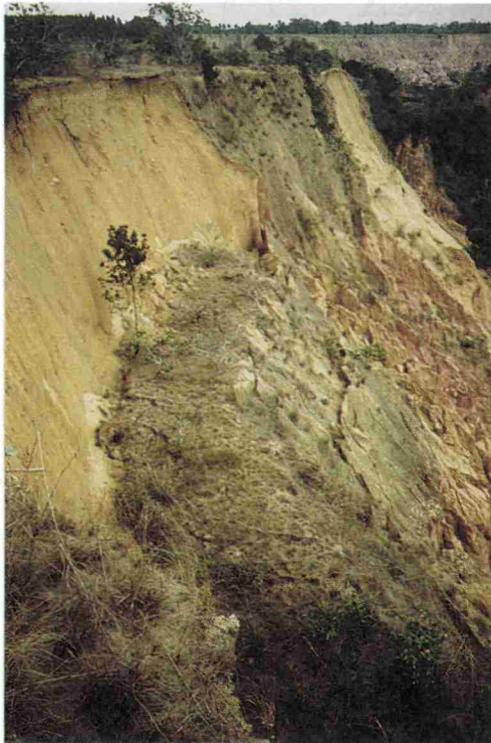


Figure 13-5. La dynamique du cirque de Dioso; les affaissements brusques et massifs sont les processus les plus répandus des mécanismes érosifs sur la paroi bordière



Figure 13-6. Le glissement de terrain sur le flan d'une arête centrale à la faveur d'une action combinée d'un sapement à la base par le ruisseau et de la destruction de la forêt par l'homme

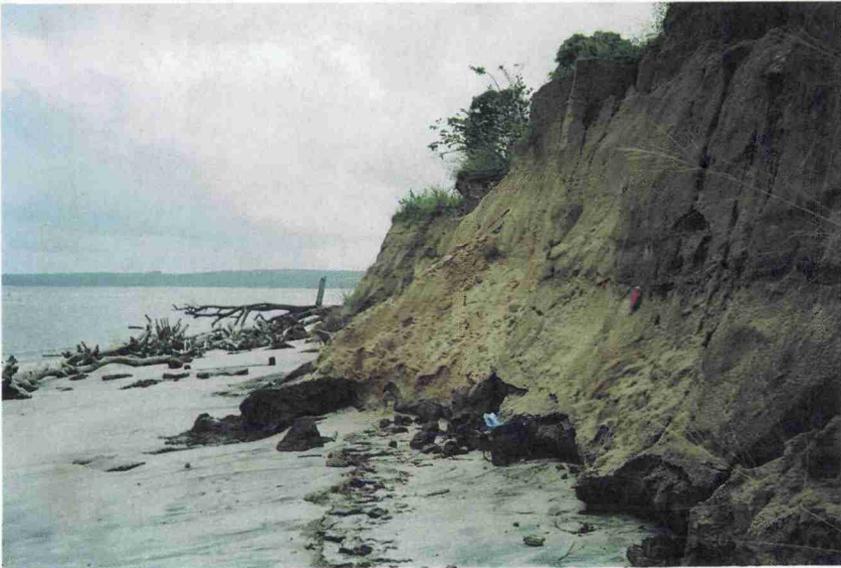


Figure 13-11. Une forte érosion du trait de côte à l'exutoire du cirque de Diosso (baie de Loango)

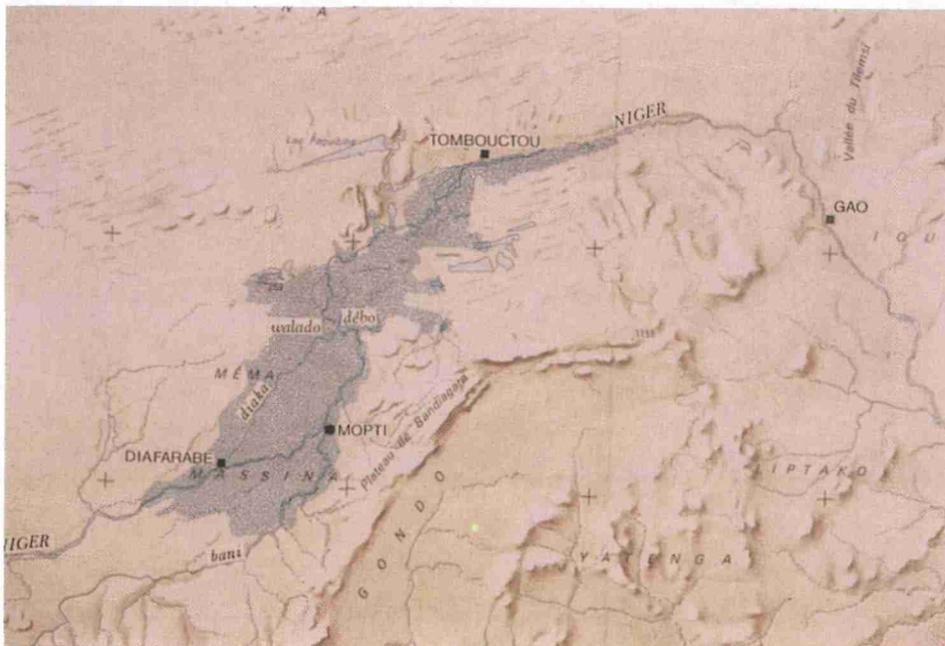


Figure 16-1. Carte de situation du Delta Central du Niger au Mali



Figure 16-2. Les formations végétales aquatiques du delta Central



0 1 2 km

Figure 16-3. Cartographie de l'indice de Verdeur (NDGI); image du 3 janvier 1989



0 1 2 km

Figure 16-4. Cartographie de l'indice de Verdeur (NDGI); image du 7 janvier 1990

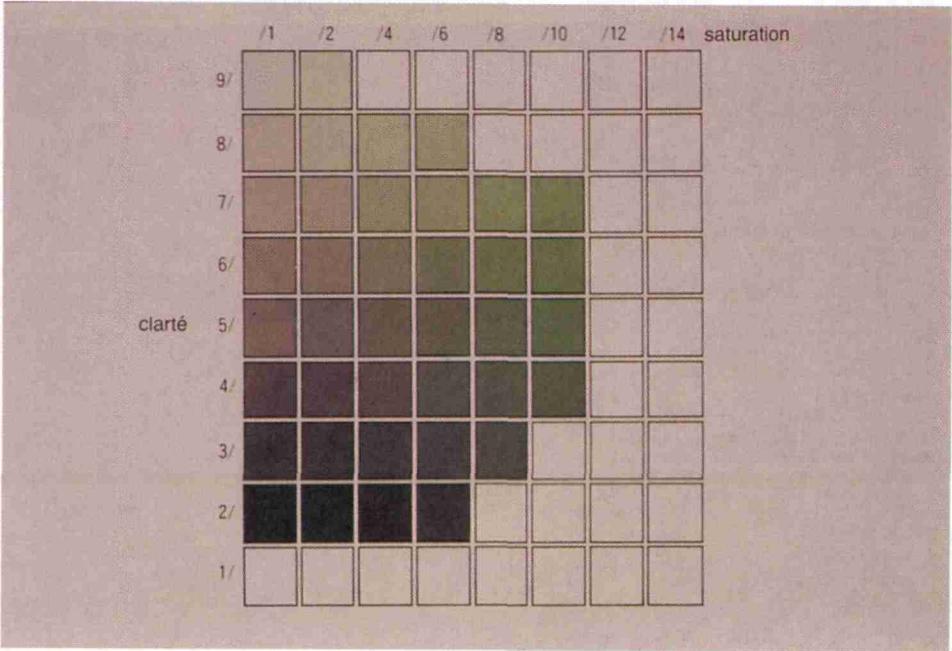


Figure 16-5. Grille de clarté et saturation du vert dans la charte des couleurs Munsell

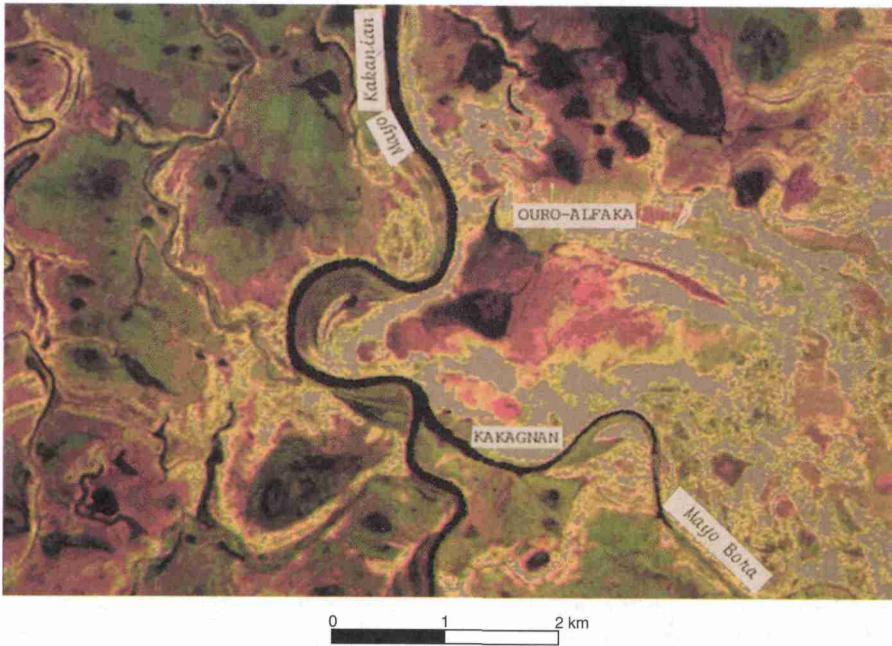


Figure 16-7. Superposition des images de 1989 (en rouge) et 1990 (en vert)

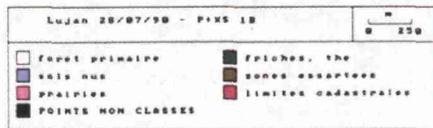
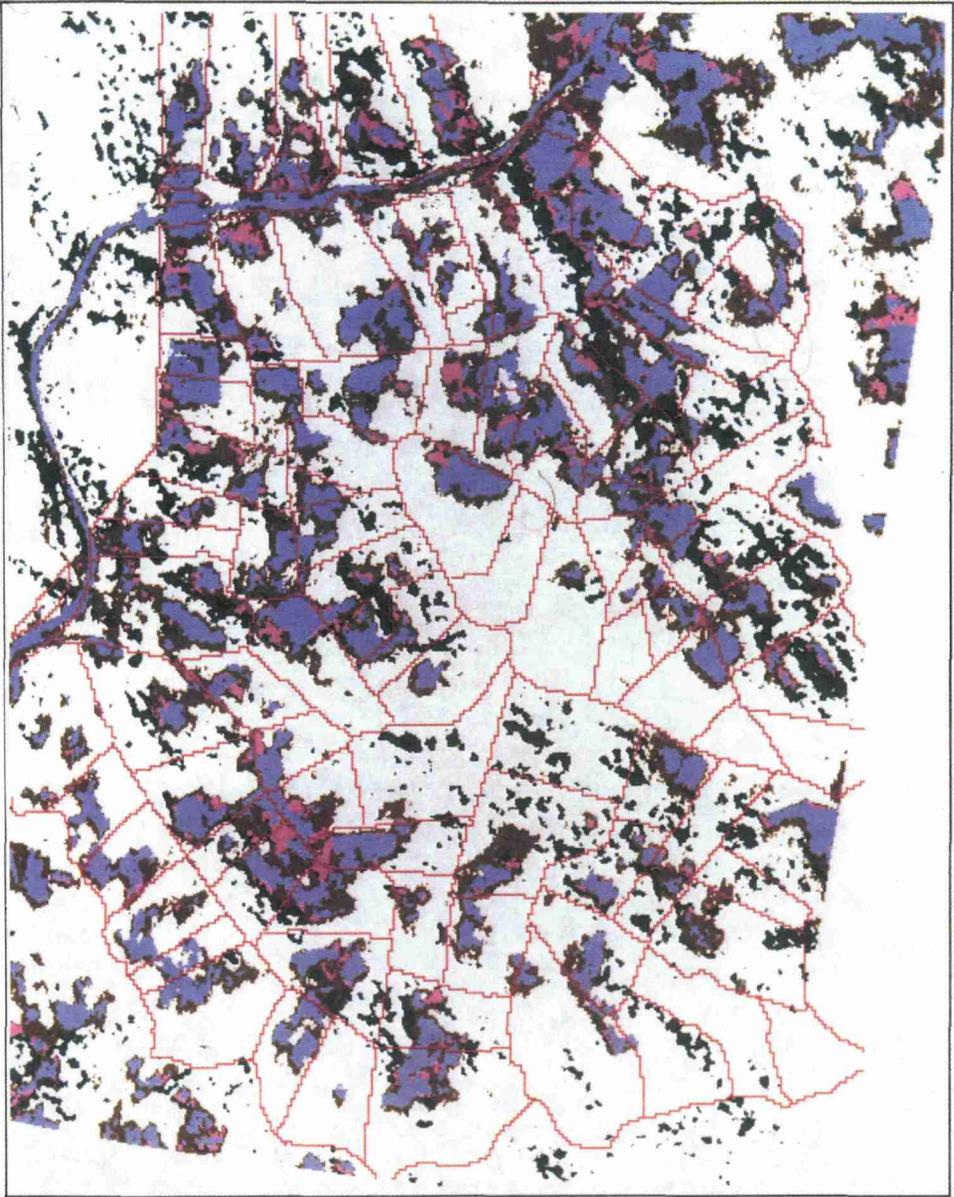


Figure 17-6. Cartographie de l'occupation du sol par analyse des images HRV de SPOT; les éléments de la légende sont, de haut en bas et de gauche à droite, 1) forêt primaire, 2) sols nus, 3) prairies, 4) points non classés, 5) friches, thé, 6) zones essartées, 7) limites cadastrales

Domaine sahélien

Secteur sahélien strict

- Steppe arbustive ou herbeuse des dunes et ensablements

Secteur sub-sahélien

- Steppe (ou savane) arbustive des glacis gravillonnaires associés aux cuirasses; culture en vallées
- Steppe (ou savane) à fourré des glacis gravillonnaires
- Steppe herbeuse ou arbustive des glacis de dénudation et des affleurements rocheux
- Steppe (ou savane) arbustive de complexes sablo-limoneux
- Steppe (ou savane) arbustive associée aux reliefs; culture en vallées
- Formation mixte des vallées associée aux cultures

Domaine soudanien

Secteur nord-soudanien

- Savane arbustive ou arborée des complexes et des glacis gravillonnaires; cultures associées
- Formation mixte des vallées associée aux cultures; savane-parc

Potentialité ligneuse



Occupation humaine

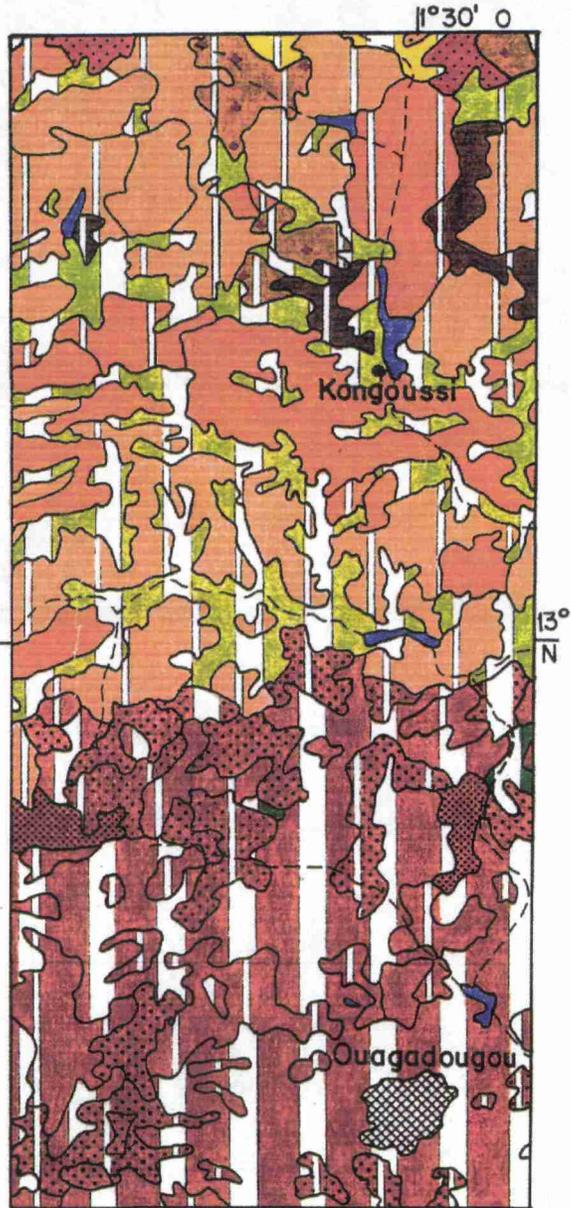


Figure 18-4. Extrait de la carte nationale de la végétation du Burkina Faso



Figure 22-2. Image en couleurs composites sur canaux TM avec intégration du panchromatique (TMP4 en cyan, TMP2 en magenta et TMP1 en jaune)

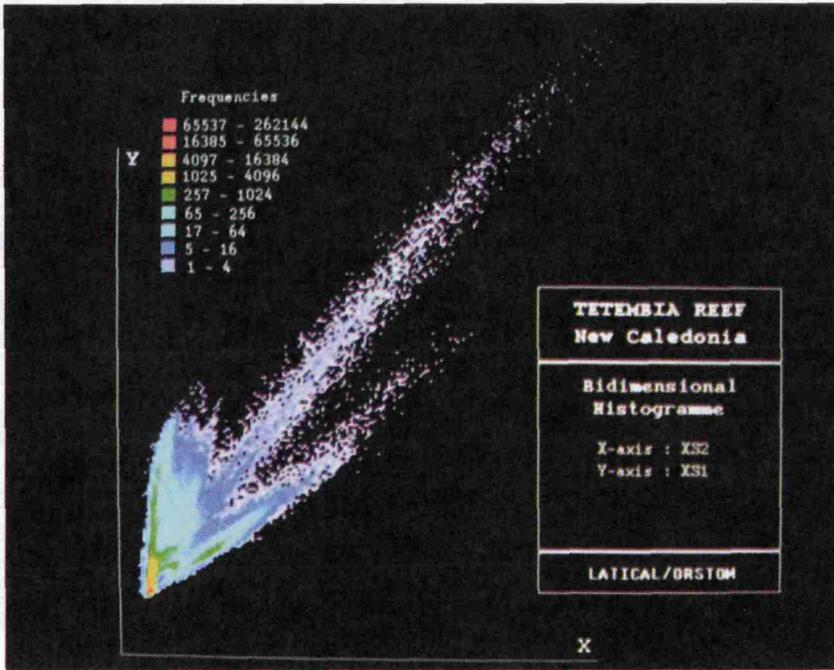


Figure 24-2. Récif Tétémbia, histogramme bidimensionnel XS1-XS2

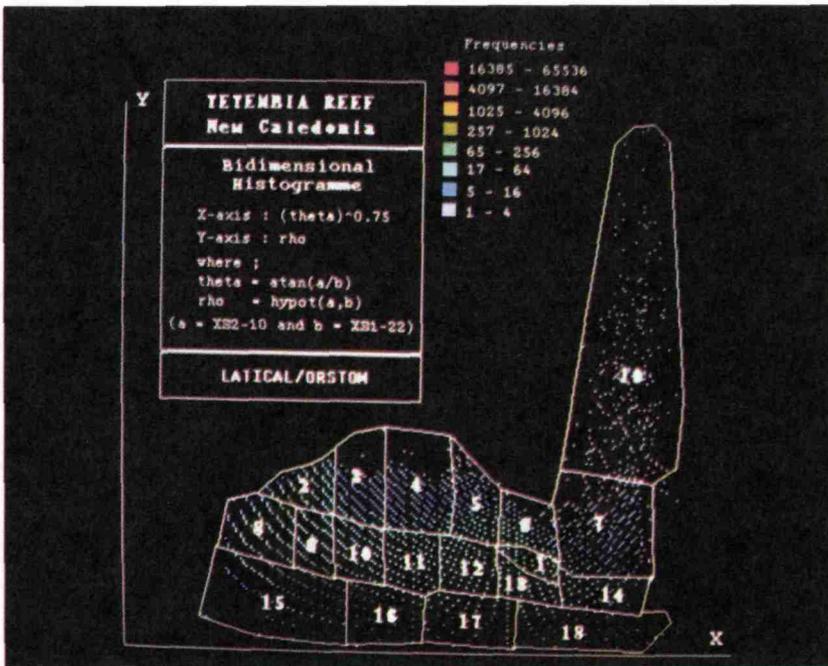


Figure 24-3. Récif Tétémbia, histogramme bidimensionnel $\rho - \theta$, classification incluse

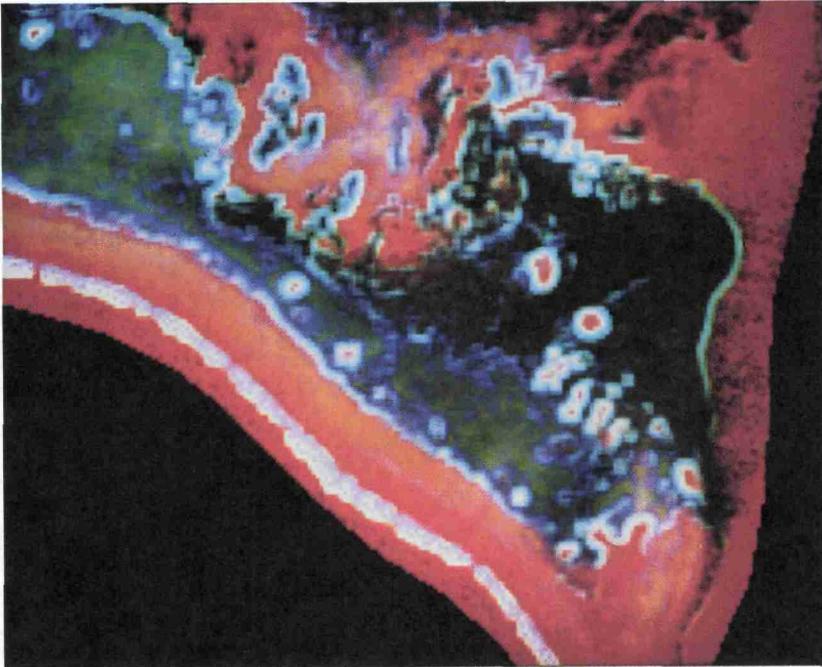


Figure 24-4. Composition colorée des composantes principales tirées des canaux ρ , θ et $\tau_{(2)}$ (rouge pour la première composante principale, vert pour la deuxième, et bleu pour la troisième)

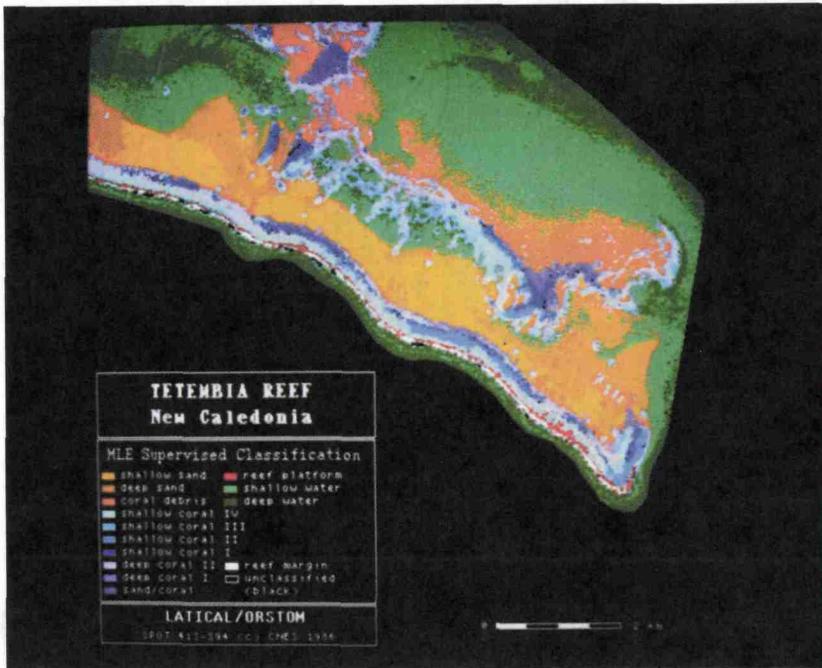


Figure 24-5. Carte thématique du récif Tétémbia

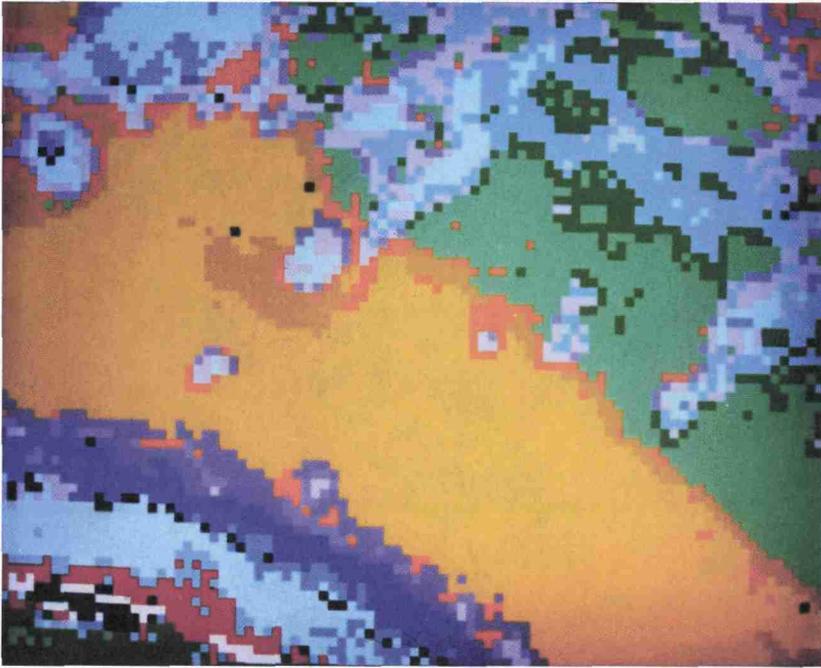


Figure 24-6. Carte thématique du récif Tétembia montrant les détails du récif interne et des pâtés coralliens

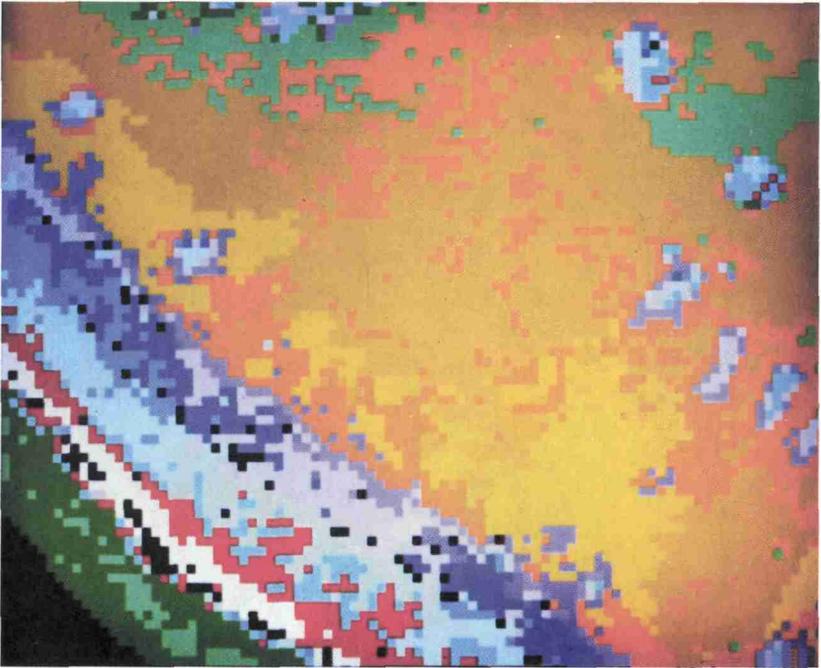


Figure 24-7. Carte thématique du récif Tétembia montrant les détails du platier récifal externe

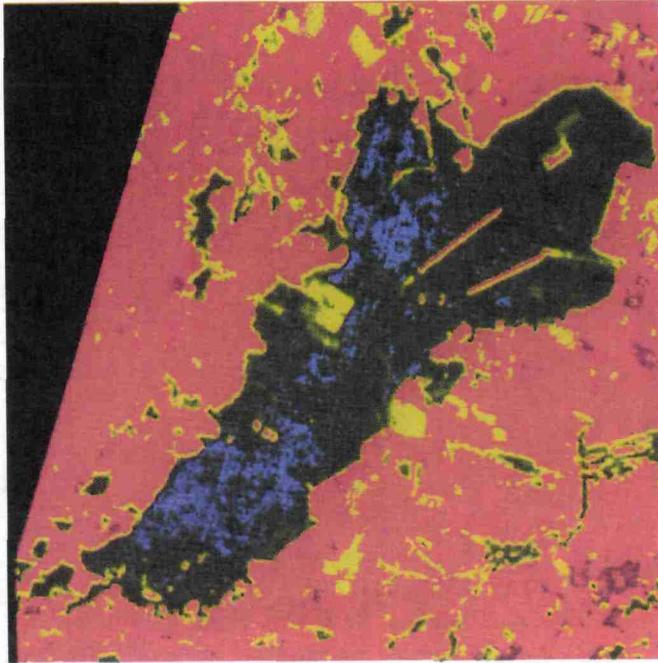


Figure 26-7. Forêt de Bouconne (canal 2 de HRV de SPOT, septembre 1988)

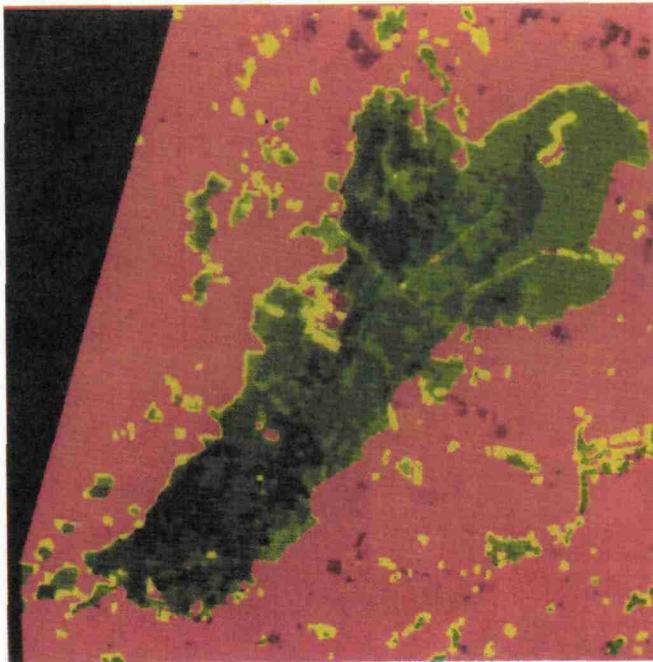


Figure 26-8. Image traitée : 3 itérations

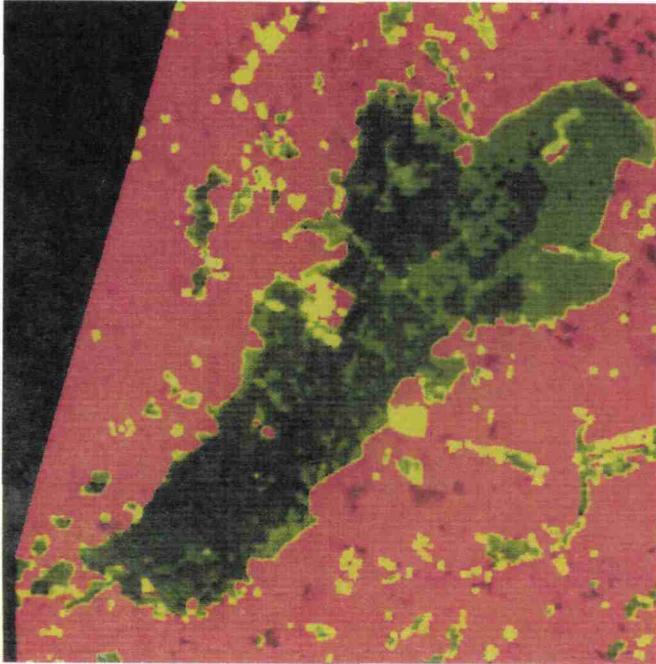


Figure 26-9. Image traitée : 5 itérations

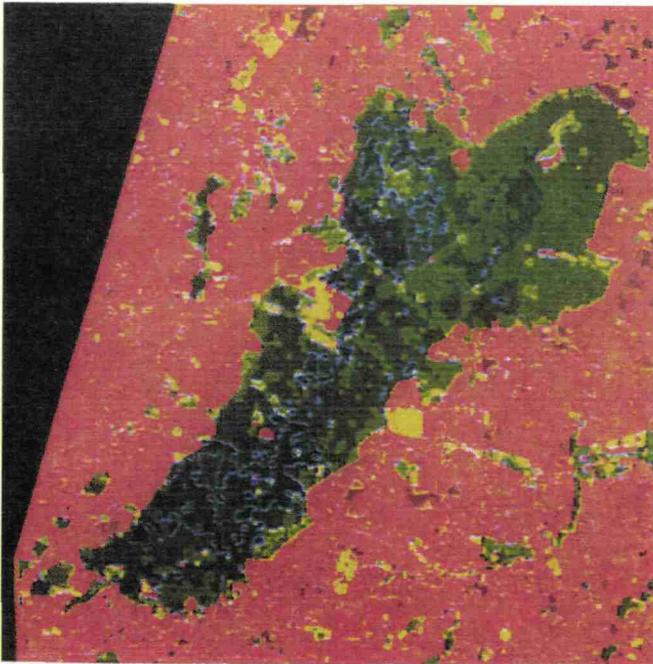


Figure 26-10. Image traitée : 5 itérations et application du Laplacien

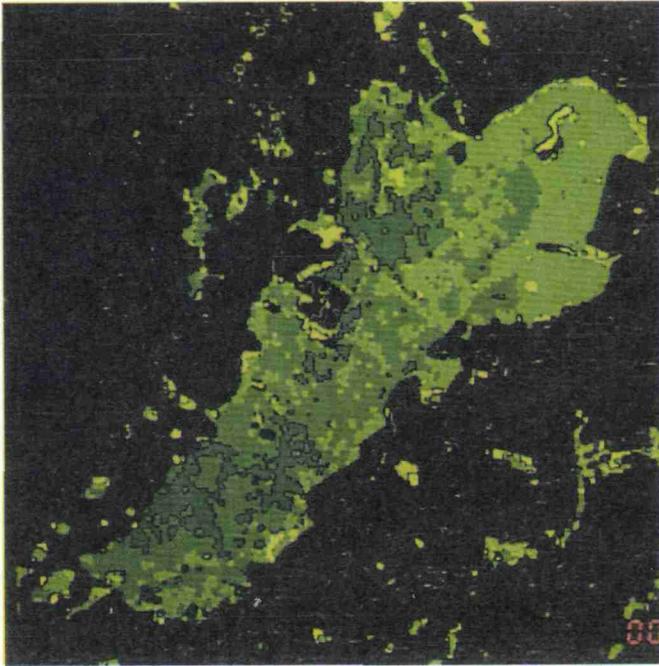


Figure 26-11. Image traitée : 10 itérations et application du Laplacien

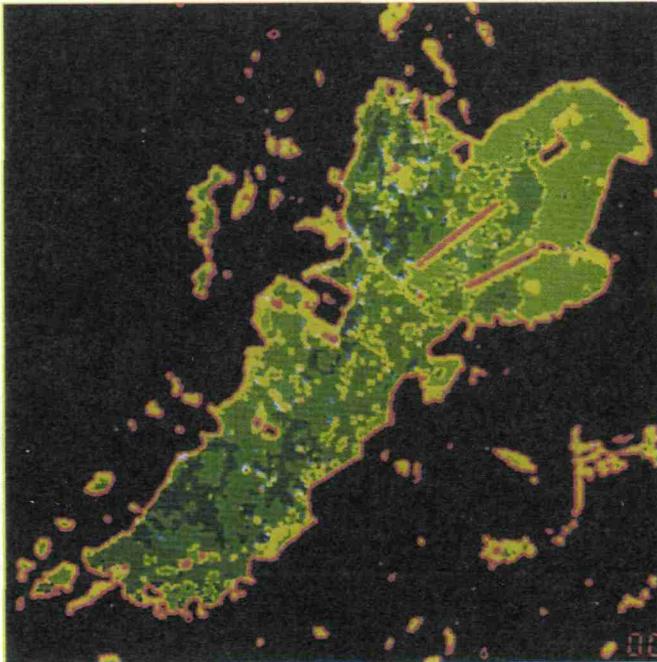


Figure 26-12. Image traitée : extraction de l'entité forêt, 3 itérations et application du Laplacien

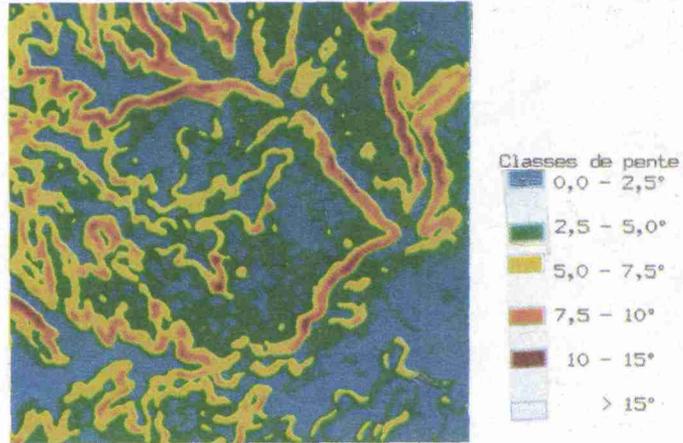


Figure 30-4. Dépression d'Aubel : les gradients de pente tirés du M.N.T.

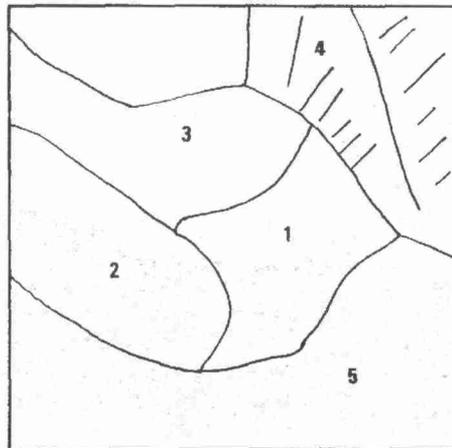
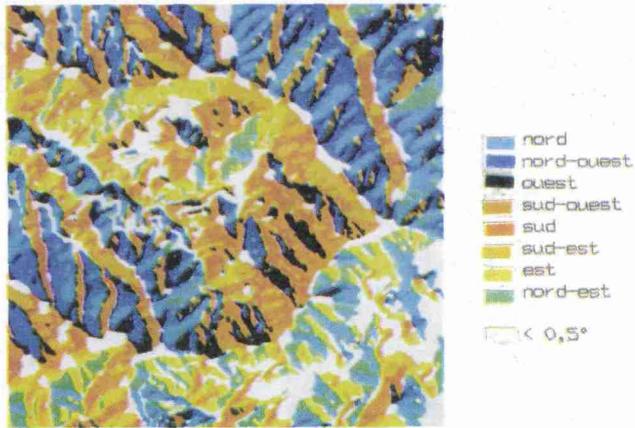


Figure 30-5. Dépression d'Aubel : a) les orientations de pente tirées du M.N.T.; b) secteurs de même orientation et linéaments

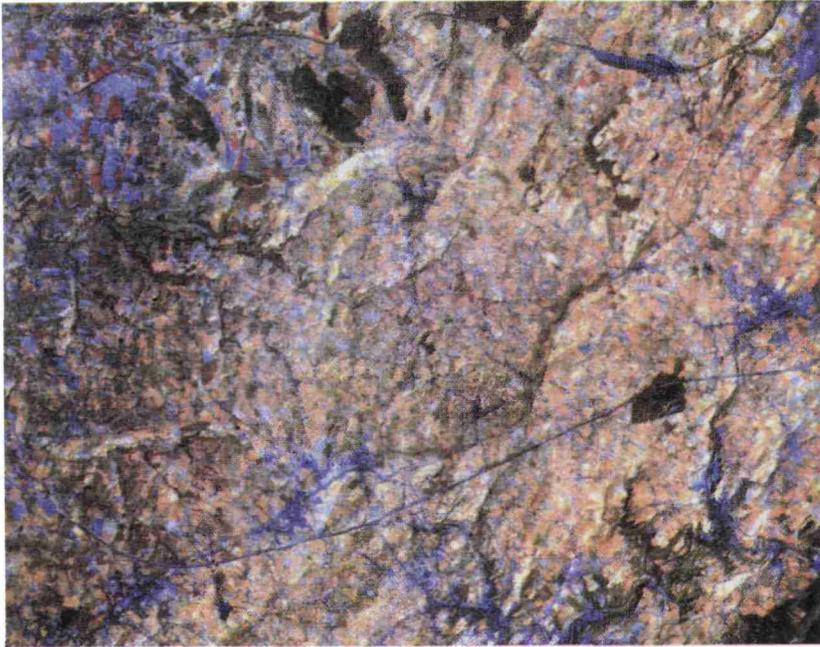


Figure 30-6. Composition colorée au départ des canaux TM 4, 5 et 7 sur une image TM de Landsat-5 du 10-09-1985

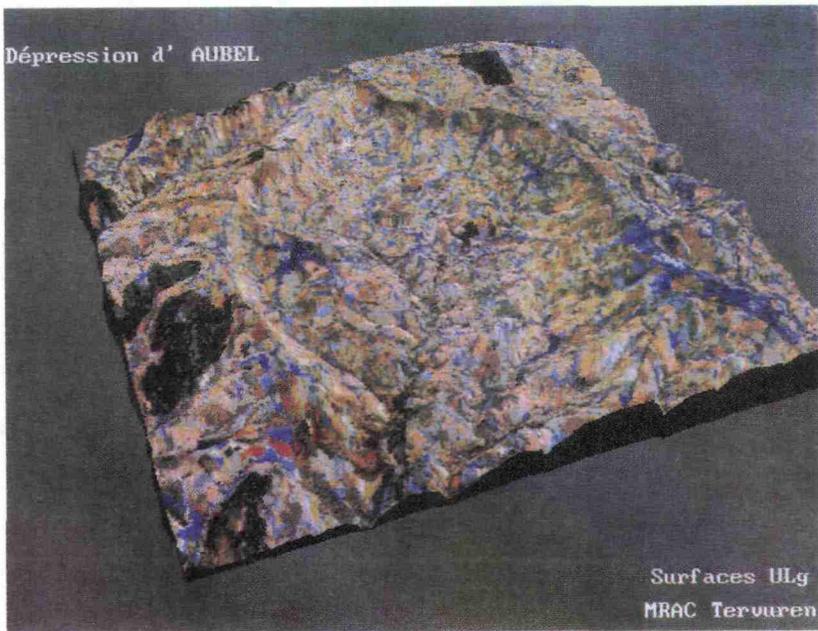


Figure 30-7. Composition colorée associée au bloc-diagramme tiré du M.N.T.; vue du nord-ouest

9

Téledétection et aptitude au ruissellement des bassins versants en Afrique soudano-sahélienne

CHRISTIAN PUECH et OLIVIER DELAHAYE

Laboratoire commun de téledétection du Centre national du machinisme agricole du génie rural des eaux et forêts (CEMAGREF) et de l'École nationale du génie rural des eaux et forêts (ENGREF), B.P. 5095, 34033 Montpellier cedex 01, France; téléphone : (33) 67 04 63 00; télécopieur : (33) 67 63 57 95; télex : 490 990 F

Résumé

Les méthodes classiques de détermination des débits de crue sur les petits bassins versants du Sahel sont très imprécises et il est reconnu que c'est la mauvaise connaissance de l'aptitude des bassins au ruissellement qui est responsable de cette imprécision. L'objectif de ce travail est de préciser l'apport de la téledétection dans cette connaissance et dans la détermination du ruissellement. Le choix de la référence pour la liaison type de sol / ruissellement a été celui du catalogue des états de surface du Sahel de CASENAVE et VALENTIN (1989), récemment paru, catalogue qui synthétise les résultats du mini simulateur de pluie sur une dizaine d'années dans la région. Les étapes de la démarche sont les suivantes : 1) détermination des plans élémentaires «densité de végétation», «type de sol», et «culture/non culture» à partir d'images TM de Landsat de saison sèche (12-1988) et de mesures de terrain par transect; 2) reconnaissance sur le terrain des différents états de surface type, par mesures de terrain précises, dites «lignes»; 3) passage des plans élémentaires à la cartographie des états de surface type par corrélations entre les deux résultats précédents; 4) obtention d'une équation de lame ruisselée pour chaque pixel, donnant par exemple la lame ruisselée décennale. Au-delà de cette cartographie des lames ruisselées nous avons tenté une modélisation des écoulements sur les bassins versants de Manga (10,5 et 98 km²) au Burkina Faso, en nous servant du cheminement des eaux dicté par le modèle numérique de terrain. Les résultats obtenus sont encourageants.

Nous nous penchons particulièrement dans cet article sur les raisons qui permettent de penser qu'au Sahel le contexte est favorable pour l'utilisation de la télédétection à ce problème, mais aussi sur tous les écueils de la méthode proposée qui ne sont pas tous entièrement résolus.

1. Introduction

Les méthodes classiques de détermination des écoulements sur les petits bassins versants sahéliens se heurtent à une difficulté d'appréciation de l'aptitude au ruissellement. Les méthodes d'estimation élaborées pour la détermination des crues (RODIER et AUVRAY, 1965; PUECH et CHABI-GONNI, 1983) et pour celle des apports (RODIER, 1975, 1976), considèrent le bassin versant de façon globale. Or, la détermination des paramètres de description des bassins étant relativement subjective, la précision globale peut être médiocre, les résultats étant fortement dépendants de l'incertitude sur l'estimation des paramètres, notamment en ce qui concerne le terme de perméabilité. De plus, la détermination correcte du terme de perméabilité dépend grandement de l'expérience de l'hydrologue, et l'ingénieur de projet peut se sentir démuni face au problème de leur estimation. Il y a aussi des cas où la répartition des zones perméables et imperméables sur le bassin versant est inversée par rapport aux bassins ayant servis de base à l'élaboration des méthodes. Ainsi, on peut dire que c'est de la mauvaise connaissance de l'aptitude au ruissellement que viennent la plupart des difficultés d'estimation des débits sur ces bassins versants.

Nous nous sommes posés la question de savoir en quoi la télédétection et les techniques de description spatiale associées pouvaient aider pour une connaissance plus correcte de ces bassins, plus indépendante de l'opérateur et, partant, pour une meilleure détermination des critères de ruissellement.

Nous décrivons ici l'état actuel de notre recherche en ce sens.

2. Une zone *a priori* favorable à l'utilisation de la télédétection

Ce projet d'utilisation de la télédétection part d'un certain nombre de constatations faisant *a priori* du Sahel une zone où les informations satellitaires peuvent être facilement valorisées dans le contexte de la connaissance des ruissellements. Ces constatations sont les suivantes :

- grandes étendues sans données précises;
- écoulement souterrain négligeable devant le ruissellement au cours des crues;
- ruissellement essentiellement fonction de facteurs de surface;
- éléments de surface décryptés facilement sur les images satellitaires du fait de l'alternance des saisons sèche et pluvieuse et de la faible couverture arborée;
- précision très médiocre des méthodes de calcul des débits de crue sur petits bassins.

Dans ce projet nous tentons d'utiliser cette conjonction d'éléments favorables pour permettre une approche nouvelle de l'estimation du ruissellement.

Notre effort s'est porté sur plusieurs niveaux de recherche, autant de maillons permettant d'aller des données-images jusqu'aux valeurs de débits.

3. Niveau global

Une première utilisation possible de la télédétection pour la connaissance des débits pour ces bassins du Sahel a été exposée lors des Journées techniques de l'AUEP-UREF à Ouagadougou en mars 1990 (PUECH, 1990). Elle consiste à utiliser les images satellitaires pour définir les états de surface de la zone d'étude et de relier chacun de ces états à un critère de perméabilité. La connaissance de la répartition spatiale des états de surface sur les bassins à étudier permet alors de déterminer un paramètre global de perméabilité sur l'ensemble du bassin, au prorata de la répartition des divers états de surface rencontrés. On peut opérer de la même façon pour la connaissance d'un facteur pente à partir d'une série de photos aériennes ou d'un modèle numérique de terrain si l'on a les éléments pour le calculer. Dès lors, il devient possible d'utiliser ces renseignements dans une détermination des débits qui utilise les méthodes classiques.

Dans cette méthodologie, la télédétection est utilisée comme aide à l'estimation des paramètres, elle se place en quelque sorte comme un garde-fou d'estimation à opposer aux estimations plus ou moins subjectives habituelles.

Les résultats obtenus par cette méthode, appliquée sur le bassin versant du Baongo près de Titao au Burkina Faso, ont été validés à deux niveaux :

- validation de la carte des états de surface obtenus à partir de l'image HRV XS de SPOT du 21-10-1988 par comparaison à des photos aériennes basse altitude concomitantes à la fois aux observations de terrain et à l'image satellitaire;

- validation des débits estimés, en les comparant au débit observé sur le terrain lors d'une crue pratiquement décennale. Le débit observé (52,5 m³/s) est très proche des estimations effectuées à l'aide des méthodes classiques dans lesquelles on a injecté les paramètres estimés comme indiqué ci-dessus (respectivement 47,8 et 60 m³/s). Mais il est difficile de conclure sur une seule observation.

Au cours de cette première étude ont été abordés les problèmes de méthodologie de terrain et de décodage des images dans un contexte de «paysage ouvert» où les entités à décrypter au sol ne correspondent pas à un critère unique et précis (tel que «blé», «maïs», etc.), mais à une juxtaposition sur le terrain d'entités différentes en pourcentages variables : sols nus, savanes, cultures, habitations, arbres divers, composant à l'intérieur même d'un pixel HRV XS (20 X 20 m) un amalgame souvent complexe.

4. Niveau spatialisé

Nous abordons dans cet article une deuxième approche possible de l'utilisation des images satellitaires, visant cette fois une connaissance spatialisée de l'aptitude au ruissellement de ces bassins.

L'hypothèse de base est d'essayer de récupérer les informations sur les transformations élémentaires pluie - débit fournies par l'appareil dit «mini simulateur de pluie» que l'ORSTOM utilise dans le Sahel depuis une bonne dizaine d'années. Il se trouve en effet qu'une synthèse sur les états de surface du Sahel donnant pour chacun d'entre eux une équation de lame ruisselée en fonction de la pluie a été réalisée par l'ORSTOM récemment (CASENAVE et VALENTIN, 1989). Malgré tous les défauts de cette connaissance, dus essentiellement à la taille de la mesure effectuée (seulement 1 m² !), il est apparu intéressant d'essayer de coupler ce type de renseignement à ceux issus de la télédétection.

La méthodologie a consisté à déterminer à l'aide d'images satellitaires la composition en «états de surface types» représentative de chaque pixel. À partir de cette connaissance il est possible de connaître pour chaque pixel élémentaire la fonction de production associée à une pluie donnée, ce qui conduit à une cartographie des possibilités de ruissellement du bassin versant.

Au-delà de ce but simplement cartographique, il est intéressant de voir dans quelle mesure il est possible de passer à la connaissance des débits sur l'ensemble du bassin versant avec tous les problèmes, liés au changement d'échelle, qui en découlent.

4.1. Mini simulateur de pluie et états de surface

Le mini simulateur de pluies de l'ORSTOM est un appareil qui simule une pluie sur un carré élémentaire de 1 m². Les essais sont menés de façon à pouvoir relier la lame ruisselée aux valeurs de pluie P et à l'indice de pluie antérieure I_p caractérisant l'état d'humidité du sol. Un protocole précis de pluie en fonction du temps est appliqué.

Les résultats de ces simulations permettent, en théorie, d'associer à chaque type de surface de taille 1 m², une équation hydrologique reliant la pluie, l'indice des pluies antérieures et la lame ruisselée, de la forme suivante :

$$L_r = a \cdot P + b \cdot I_k + c \cdot P \cdot I_k + d \quad (1)$$

dans laquelle :

L_r = valeur moyenne de la lame ruisselée pour le type modal (mm);

P = pluie journalière de récurrence annuelle ou décennale (mm);

a, b, c et d = coefficients dépendants du sol;

I_k = indice des précipitations antérieures (de Kohler), fonction de la pluie et de l'indice de la veille. L'indice du jour n est calculé à partir de l'indice du jour n-1 par :

$$I_{k_n} = (I_{k_{n-1}} + P_{n-1}) e^{-x} \quad (2)$$

avec t = le temps en jours;

x = coefficient d'ajustement, généralement pris égal à 0,5.

Le mini simulateur a été utilisé sur de nombreux états de surface du Sahel, à tel point qu'une synthèse a pu être présentée (VALENTIN et CASENAVE, 1989).

Cette synthèse fait ressortir les points connus précédemment, à savoir que la présence d'une croûte de battance sur le sol modifie grandement les conditions du ruissellement. Plusieurs types de croûtes ayant été définis, chacun avec sa propre réponse, il apparaît important de pouvoir les distinguer convenablement.

Le catalogue présenté a l'avantage de proposer une base de référence homogène et stable sur la zone en question, et il semble donc *a priori* intéressant de chercher à s'y ramener (tab. I).

On trouve le premier écueil de la méthode quand on se préoccupe de savoir quelles observations sont nécessaires pour définir sans ambiguïté ces états de surface types. On s'aperçoit alors que la détermination des différents types de croûtes observables nécessite la connaissance de paramètres tels que culture/non culture c'est-à-dire des éléments *a priori* détectables sur image satellitaire, mais aussi une série d'autres observations qui sont au contraire d'une finesse trop grande pour être déterminées à partir des images : par exemple le nombre de micro horizons, la présence de termites, etc. (fig. 1).

Il en ressort que les images satellitaires ne pourront pas nous donner directement les renseignements voulus mais qu'il faudra opérer par étapes successives.

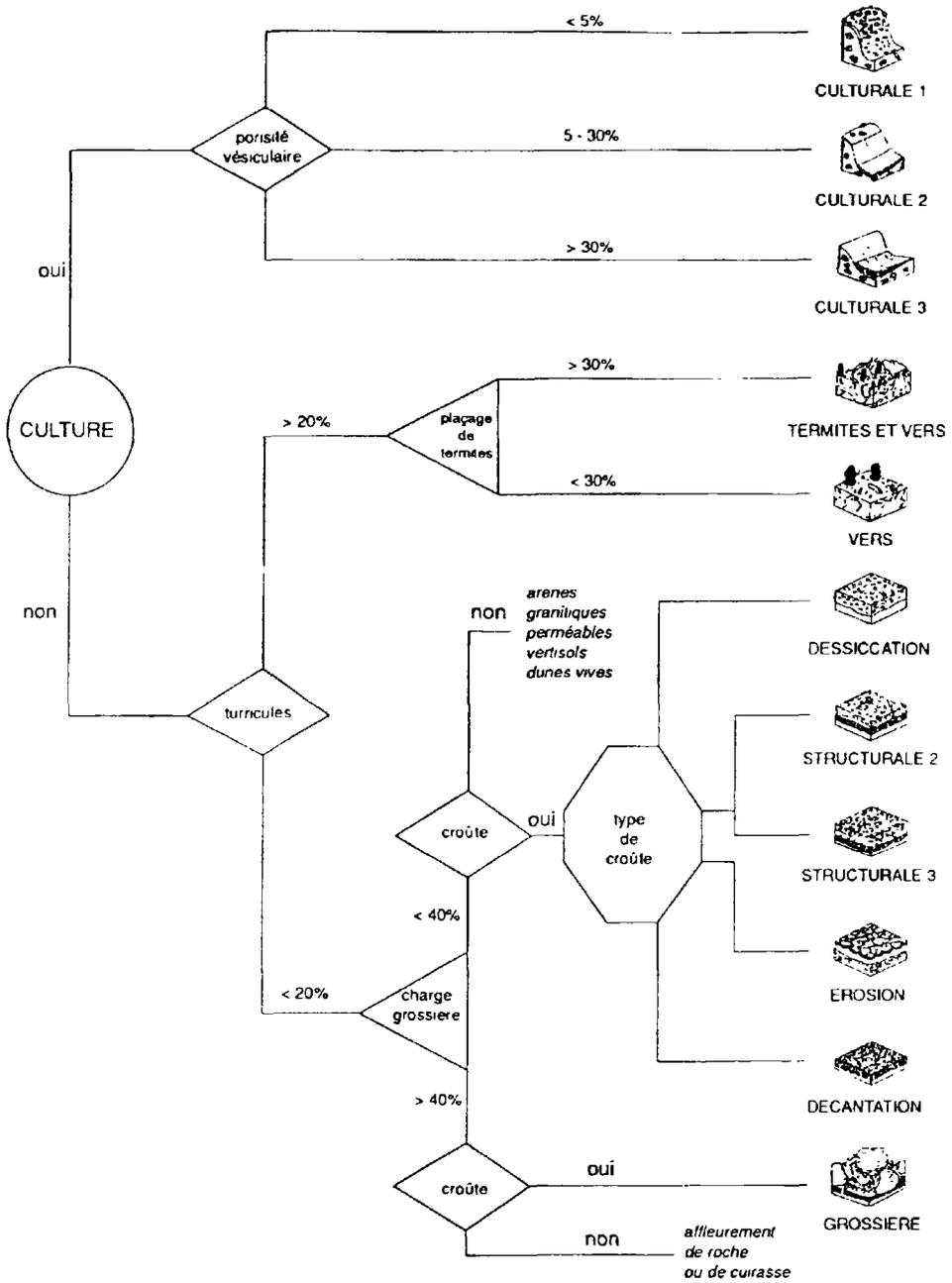


Figure 1. Clef de détermination des types de surfaces

Tableau I. Classes des états de surface types

Code	Désignation
C1	Cultures 1
C2	Cultures 2
C3	Cultures 3
TER	Termites et vers
VER	Vers
DES	Croûte de dessiccation
ST1	Croûte structurale à 1 horizon
ST2	Croûte structurale à 2 horizons
ST3	Croûte structurale à 3 horizons
ERO	Croûte d'érosion
DEC	Croûte de decantation
GRO	Croûte grossière
RUI	Croûte de ruissellement
EOL	Croûte de dépôts éoliens

4.2. Télédétection et résultats cartographiques associés

4.2.1. Zone d'étude

La zone d'étude concerne l'Afrique sahélienne et soudano-sahélienne et nous avons privilégié deux axes pour nos calculs de faisabilité.

Un premier axe nord-sud au Burkina Faso qui concerne une dizaine de bassins versants de 10 à 400 km² sous une pluviométrie annuelle moyenne allant de 400 mm à 1200 mm (fig. 2 et tab. II). Les données satellitaires correspondant à tous les bassins de cet axe ont été traitées, et nous présentons ici les résultats du groupe de Manga, contenant trois bassins très proches dont deux emboîtés : les bassins de Louré, de Kazanga et de Binndé (voir le tableau III pour leurs caractéristiques).

Un deuxième axe de support d'étude est en cours : il concerne quatre groupes de bassins du Sénégal au Burkina Faso, et doit nous aider à voir les limites dans le cas de variations des types de sols. Dans ce deuxième groupe, nous avons gardé les bassins de Manga, présentés ici, afin de pouvoir relier les résultats de cette série à ceux de la série précédente.

4.2.2. Images satellitaires utilisées

Dans cette approche, nous avons privilégié les images TM aux images HRV, pour les raisons qui suivent.

Le changement de résolution en passant de HRV XS (20 m) à TM (30 m) ne nous a pas semblé fondamentalement gênant dans ces paysages « ouverts » sahéliens combinant plusieurs entités distinctes superposées. La détection parfaite de toutes les composantes individuelles au sol demanderait en fait une résolution compatible avec chaque arbre individualisé, ce qui n'est, ni possible avec les satellites civils d'observation de la terre actuellement en service, ni peut être souhaitable quand on s'intéresse à la caractérisation de bassins versants de dizaines voire de centaines de kilomètres carrés.

Tableau II. Bassins versants étudiés au Burkina Faso

Bassins	Surface (km ²)	Surface cultivée	Latitude	Pluie annuelle (mm)
Boukouma	430	30,3 %	14° 10'	550
Sian	750	38,7 %	13° 06'	700
Gha	30	27,0 %	13° 13'	700
Zeguedeguen	490	42,9 %	12° 57'	700
Yitenga	100	25,9 %	12° 11'	800
Nagbangre	450	38,1 %	12° 12'	800
Ouedbila	150	35,0 %	12° 00'	850
Louré-Manga	98	55,9 %	11° 40'	900
Tiebele	30	55,6 %	11° 07'	1150

Tableau III. Caractères physiques et morphologiques des bassins de la région de Manga

Caractères	Louré	Kazanga	Binndé
Superficie en km ²	98,0	54,8	9,7
Périmètre en km	42,0	32,0	13,8
Indice de compacité	1,19	1,21	1,24
Longueur du rectangle équivalent en km	14,0	11,0	4,93
Largeur du rectangle équivalent en km	7,0	5,0	1,97
Cote minimum en m	260	269	299
Cote maximum en m	330	330	330
Cote 95% de surface	316,6	319,1	324,5
Cote 5% de surface	270,1	274,5	300,5
Indice global de pente en m/km	3,32	4,09	4,87

L'apport de TM nous a paru par contre intéressant par la gamme plus complète de longueurs d'onde et la possibilité de décoder des informations plus nombreuses à partir d'une seule image.

Enfin, un des critères de choix et non des moindres, est la possibilité d'avoir sur la même image, à la même date, des bassins versants contigus ou emboîtés, et donc de pouvoir couvrir l'ensemble de la zone d'étude avec une seule et même classification d'images.

La date d'image retenue est le début de la saison sèche, car elle permet à la fois de bien caractériser les sols, élément essentiel de notre quête, et de différencier culture/non culture ce qui est aussi nécessaire pour utiliser la grille d'états de surface types.

Pour les bassins versants de Manga qui vont servir d'exemples à notre démarche, l'image utilisée est l'image TM 195-52 du 18-12-1988.

4.2.3. Méthodologie de terrain mise en oeuvre

La méthodologie de terrain (partie I du schéma général, fig. 3) s'inspire à la fois de ce que nous avons mis au point dans l'étude globale précitée, et des nécessités nouvelles imposées par la grille de connaissance des états de surface types. Dans la pratique nous avons réalisé une double mesure de terrain.

Une première série de mesures était destinée à décoder les images de téledétection en plans élémentaires physiques tels que «végétation», «sols», «occupation du sol». Étant donné les difficultés de positionnement sur le terrain, il est exclu de vouloir faire des observations de terrain avec la précision d'un pixel et nous avons dû nous résoudre à faire des mesures sur des zones homogènes ayant une taille de plusieurs pixels contigus. C'est pourquoi nous avons opéré par «transects» avec des blocs d'observation ayant une échelle compatible avec la taille des pixels utilisés : on a retenu des carrés de 100 X 100 m le long de parcours de 2000 m. Ont été relevés de façon aussi précise que possible les éléments de type et densité de végétation, de type, couleur et occupation du sol, chacun en pourcentage sur le carré de mesure. Le nombre de transects étudiés a varié de 10 à 20 selon la superficie des groupes de bassins versants étudiés (de 30 à 400 km²).

Par exemple sur le bassin versant de Louré-Manga (98 km²), 12 transects d'une longueur totale de 18 000 m ont été étudiés (fig. 4). Ceci correspond donc à une «surface enquêtée» de 1,8 km² pour une superficie de 30 km² (soit un taux d'échantillonnage de $1,8/30 = 5\%$).

Une deuxième série de mesures, sur une échelle plus fine et un nombre de paramètres plus grand, a aussi été faite conjointement afin de connaître, localement, la liaison entre les paramètres visibles sur images satellitaires et ceux nécessaires à l'utilisation de la grille des états de surface types.

Ces mesures ont été faites par «lignes» de 250 m de long, et l'on a associé une «ligne» à chaque «transect» défini plus haut.

Un grand problème s'est révélé lors des premières manipulations : le positionnement exact des transects dans l'image s'est révélé être très délicat par l'absence de points de repère précis dans ces zones, et l'absence de cartes topographiques adaptées, et ceci malgré l'utilisation conjointe de photographies aériennes.

Dans certains cas, le positionnement du transect par l'équipe de terrain s'est révélé avoir dérivé de 1000 à 1500 m par rapport à la position exacte (insuffisance de points de repère, ou déplacement de pistes entre la date de réalisation des divers documents et celle du terrain).

La solution, très satisfaisante, mise ensuite en pratique a été l'utilisation systématique d'un appareil de positionnement par satellite (GPS : Global Positioning System), qui, utilisé en relatif nous a donné des positions avec une précision de l'ordre de 30 m, c'est-à-dire une mesure totalement compatible avec la taille du pixel satellitaire.

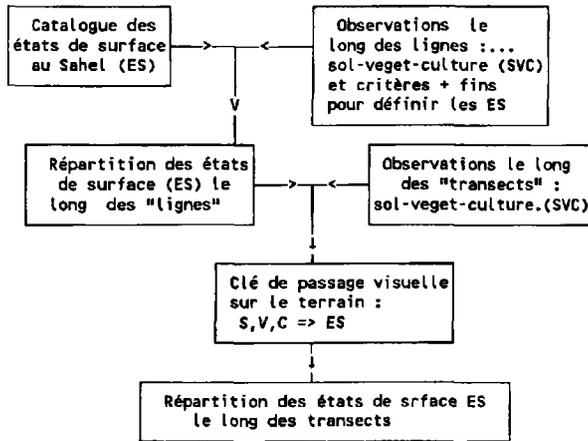
4.2.4. Dépouillement des images

Les classifications d'images ont été faites sur un mode dirigé, sur logiciel Multiscopie en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance, et l'on a cherché à définir une série de classifications différentes donnant des plans physiques d'explication élémentaires (partie II du schéma général, fig. 3).

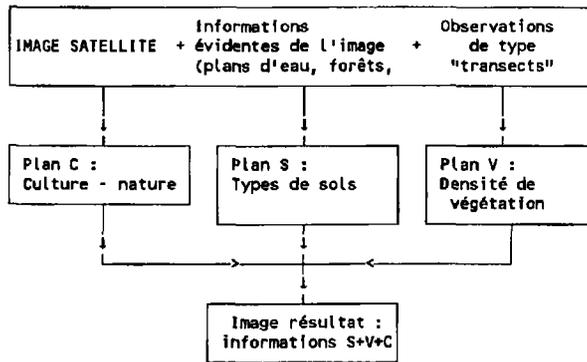
L'apprentissage a été fait essentiellement à partir des mesures de terrain par transects, en nous basant sur la portion de relevés présentant une stabilité du critère étudié sur un ensemble d'au moins trois carrés consécutifs (300 m). Il a été complété à partir d'éléments évidents de l'image : eau, village, cuirasses latéritiques, marigots, etc.

Un premier plan dit «végétation» a été élaboré sur la base de cinq classes de densité de végétation séparées par les seuils 2%, 5%, 15% et 40%. La précision géographique a été

1. TRAVAIL DE TERRAIN



2. TELEDETECTION



3. PASSAGE AUX LAMES RUISSELEES

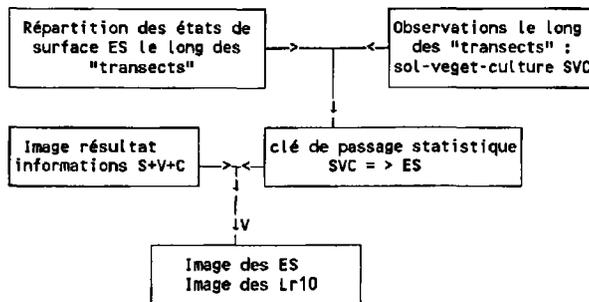


Figure 3. Schéma de la méthode utilisée pour décoder les images

évaluée sur parcelles de contrôle. Par exemple sur le bassin de Louré-Manga elle est de 71%, 90%, 31%, 30% et 69% pour les cinq classes de végétation et 92% pour l'eau.

De même a été défini le plan «occupation du sol» cherchant à séparer les zones de culture, jachère et «nature». Après regroupement de classes, on arrive à une précision géographique de 71% pour la classe culture majoritaire et 70% pour celle de nature majoritaire.

Enfin, le plan «types de sols» a différencié les zones suivantes : affleurements rocheux et cuirasses, blocs et graviers, gravillons, sables grossiers, sables fins, limons. La précision géographique par classe varie de 54% à 90%.

Les confusions auxquelles on arrive sont tout à fait acceptables surtout si l'on se place dans le contexte de prise d'information de cette zone. En effet les matrices de confusion dont nous venons de donner quelques résultats ci-dessus, ne sont pas adaptées à la détermination de la qualité de décodage de l'image satellitaire avec ce type de paysage et des parcelles d'apprentissage de cette taille.

Prenons un contre-exemple simple : supposons une parcelle d'apprentissage (100 X 300 m) à laquelle nous avons attribué une densité de végétation moyenne de classe 3 (5% à 15%). Dans la réalité cette parcelle peut être composée d'un mélange de pixels de classes 2, 3 et 4 dont la densité moyenne est comprise entre 5 et 15%. La classification, au contraire, individualise chacun des pixels et les range dans la classe correspondante. Aussi, quand on comptabilise à la fin du calcul les pixels bien classés, même si le calcul est parfait, on doit observer sur la matrice de confusion une dérive de pixels vers les zones voisines : classe 3 vers classes 2 et 4 dans l'exemple ci-dessus.

C'est en fait ce que l'on a observé sur les matrices calculées et ceci nous permet de dire que la qualité de décodage de l'image est peut être bien meilleure que celle indiquée par les chiffres ci-dessus. La seule façon de trancher sera de faire des validations autres de ces résultats.

4.2.5. Obtention des cartes d'états de surface et de l'aptitude au ruissellement

Arrivés à cette étape, nous connaissons pour chaque pixel de l'image l'état de sa surface par le triplet SVC, S pour sol, V pour végétation, et C pour le plan culture/non culture qui est un dérivé de l'occupation du sol (fig. 9-5, voir cahier couleur).

Pour l'obtention des cartes d'états de surface (partie III du schéma général, fig. 3) nous faisons intervenir la deuxième série de mesures de terrain, qui nous donne pour le bassin versant étudié, des statistiques sur l'apparition simultanée des critères «grossiers» (SVC) déjà cartographiés et de ceux plus fins nécessaires à l'utilisation de la grille de détermination.

Nous partons de l'hypothèse que, localement, la présence ou l'absence de micro horizons, termites et autre critères «fins» est associée à la description grossière des paysages. Et que si, localement, on a pu déterminer la combinaison d'états de surface types associée à tel triplet SVC, on suppose que dans toute l'image on retrouvera la même association.

Il suffit donc de trouver localement une règle statistique de passage entre les triplets SVC et les combinaisons d'états de surface.

On peut, si le bassin versant est grand et la stabilité statistique non assurée, travailler en parties d'images segmentées.

Ainsi à tout triplet SVC, donc à tout pixel est associée une équation de lame ruisselée de forme :

$$Lr = a \cdot P + b \cdot P \cdot Ip + c \cdot Ip + d$$

où a, b, c et d sont des coefficients fonction du triplet, donc dépendants du type d'état de surface.

Le passage à une carte des valeurs de ruissellement ne pose alors plus de problème puisqu'il suffit de faire l'hypothèse d'une pluie donnée et d'un indice de pluies antérieures donné pour avoir la cartographie de la production élémentaire au niveau du pixel.

La figure 9-6 (voir cahier couleur) est un exemple d'un tel résultat pour les bassins de Manga, avec une pluie de 120 mm et un indice de pluies antérieures de 20 mm.

4.3. Essai d'utilisation de cette carte dans une connaissance globale des débits sur le bassin versant

L'extrapolation de ces résultats élémentaires à une surface hétérogène plus grande, comme le bassin versant, pose de grands problèmes.

4.3.1. Détermination du volume de crue

La méthode la plus simple consiste à faire cette extrapolation par la somme des équations des lames élémentaires, pondérées au prorata de leurs étendues respectives.

$$Lrc = \sum_i (Lri * s) / S \text{ (lame ruisselée calculée)}$$

$$Krc = \sum_i (Lri * s) / S / P10 \text{ (coefficient de ruissellement calculé)}$$

où Lri est la lame ruisselée produite par le pixel i ,

S la surface du bassin, s la surface du pixel,

$P10$ est la pluie décennale pour un événement.

Or, on sait bien que le ruissellement global d'un bassin n'est pas la somme des ruissellements partiels. Une dérive certaine se produit, que l'on peut appeler «effet d'échelle», ou de globalisation, et qui vient du comportement différent de parcelles juxtaposées, ce qui fait que, théoriquement, on n'a pas le droit de faire cet amalgame.

Ce problème d'échelle est, pour l'instant, le point le plus obscur de la démarche qui atteint ici ses limites : un tel passage, de 1 m² à la taille d'un petit bassin de l'ordre de 10 à 100 km², correspond à un facteur d'échelle de 10⁷ à 10⁸ ! Or, il est déjà évident que le comportement hydrologique d'un mètre carré est très différent de celui d'un champ ou d'un versant. Que dire alors quand on passe au bassin en entier ?

De plus cette méthodologie ne tient pas compte :

- des pentes : heureusement celles-ci sont généralement faibles dans le Sahel et leur influence sur le ruissellement moins importante que celle des états de surface;

- de la modification des infiltrations due au ruissellement provenant de l'amont du carré de mesure;

- de la succession des perméabilités lors du cheminement des eaux : la présence d'une zone sableuse n'a pas le même effet en haut de versant et en bas de pente.

C'est pourtant la solution que l'on retrouve habituellement dans les documents de l'ORSTOM, qui contourne par l'aval la difficulté en utilisant un «coefficient de calage» : rapport entre valeurs calculées et valeurs observées, qui rattrape ou cache tous les défauts de la méthode. Ce coefficient est établi à partir de mesures hydrologiques (débits) qui sont comparées aux résultats calculés par mini simulation de pluie étendue au bassin versant.

Ce coefficient de calage nécessaire pour raccorder cette estimation à la réalité peut s'exprimer sous forme d'une régression linéaire :

$$(Lr \text{ observée}) = A * (Lr \text{ calculée}) + B \quad (3)$$

La validité de la méthode n'est donc pas résolue puisque ce coefficient de calage est une «boîte noire» déterminée *a posteriori* et qui englobe tout ce que ce modèle ne sait pas encore quantifier, comme en particulier la hiérarchisation des états de surface au sein du bassin versant, les effets de pentes, etc. De plus, ces coefficients de calage sont non seulement variables dans l'espace (d'un bassin à l'autre), mais aussi dans le temps (d'une année à l'autre sur le même bassin).

Malgré ces graves inconvénients, on garde l'espoir de parvenir directement de la mesure locale, à l'estimation de la lame ruisselée à l'échelle du bassin versant (ALBERGEL, 1987).

Sur les trois bassins de Manga, nous avons établi cette fonction de calage en comparant les résultats bruts de lames ruisselées donnés par notre détermination et les observations hydrologiques effectuées sur le terrain en 1963-1965 et 1983-1985 par les équipes de l'ORSTOM. On a obtenu :

Bassin de Louré : $Lro = 0,90 Lrc + 1,5$ ($r=0,81$ et $n=23$) (voir fig. 7);

Bassin de Kazanga : $Lro = 0,53 Lrc + 0,2$ ($r=0,64$ et $n=72$);

Bassin de Binndé : $Lro = 0,53 Lrc - 0,56$ ($r=0,86$ et $n=106$).

Appliquant ces résultats à l'averse décennale, il est alors possible de trouver les valeurs de ruissellement décennales de chaque bassin.

Ce que l'on a synthétisé sur le tableau IV et la figure 8, où l'on peut comparer les résultats (Kr10 calculé) à ceux obtenus par l'ORSTOM sur le terrain (SIRCOULON et KLEIN, 1964; KLEIN 1964 et 1967; ALBERGEL, 1987).

4.3.2. Détermination de l'hydrogramme de crue

Pour passer du volume de crue au débit maximal de la crue, il est nécessaire d'avoir des informations sur la forme de l'hydrogramme, soit par des coefficients types de passage du débit moyen au débit maximal, soit mieux, si c'est possible, par reconstitution de l'hydrogramme de crue.

Nous présentons ici une ébauche de modélisation de l'hydrogramme, effectuée surtout dans le souci de montrer qu'à partir d'une connaissance pixel à pixel des facteurs de ruissellements et d'une fonction de transfert déterminée elle aussi pixel à pixel il était possible d'aller jusqu'au bout du calcul. Et que, grâce aux outils spatialisés que nous en offrent la télédétection et les modèles numériques de terrain, il était possible de construire une chaîne entièrement automatisée pour produire le débit de crue du bassin.

La modélisation présentée part des hypothèses déjà énoncées pour la partie volume de crue à savoir que la lame ruisselée calculée sur chaque pixel à l'étape précédente est un bon index de la partie de ruissellement qui va effectivement arriver jusqu'à l'exutoire.

Elle utilise aussi de nouvelles hypothèses basées sur l'utilisation d'un modèle numérique de terrain pour la détermination de la fonction de transfert associée à chaque pixel.

À partir du modèle numérique de terrain (MNT, fig. 9-9, voir cahier couleur), on peut en effet calculer pour chaque pixel la distance qui le relie à l'exutoire compte tenu du cheminement hydraulique le long des pentes. Si l'on suppose, en première approximation, que la vitesse de propagation des eaux est constante dans tout le bassin dès que l'eau est arrivée dans des chenaux de drainage, il est possible de déterminer le temps mis par une goutte d'eau pour aller d'un point quelconque à l'exutoire.

Nous pouvons résumer les hypothèses utilisées de la façon suivante :

1) la pluie est homogène dans le temps et dans l'espace pendant l'épisode pluvieux étudié (cette hypothèse n'est pas impérative mais si on l'utilise, cela limite l'emploi du modèle à des bassins de taille inférieure à 120 km²);

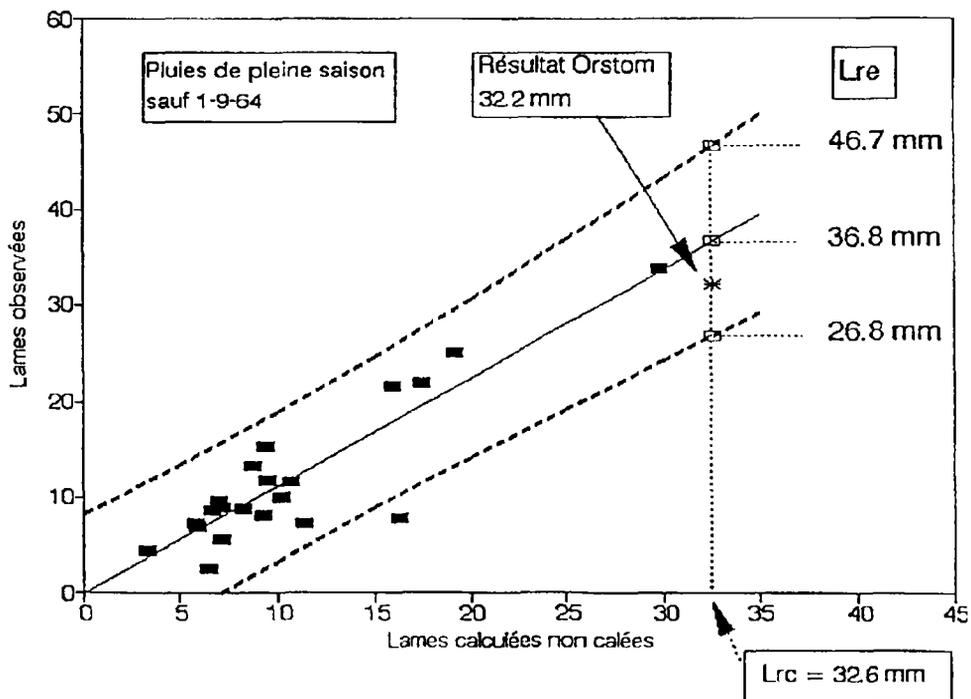


Figure 7. Fonction de calage sur Louré-Manga; intervalle de confiance à 95%

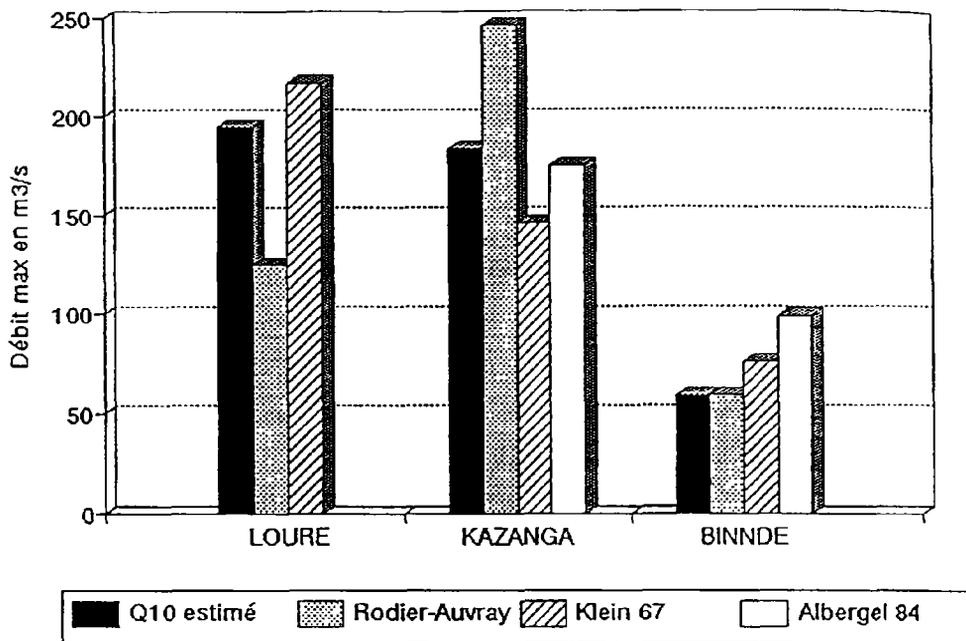


Figure 8. Comparaison des évaluations du débit de crue décennale; bassin de Manga

Tableau IV. Comparaison des coefficients de ruissellement pour une averse décennale selon différentes méthodes

Bassin	Louré	Kazanga	Binndé
Télédéttection			
Pluie décennale ponctuelle	101	101	101
P10 sur le bassin	79,8	83,0	92,4
Pourcentage de culture	55,9%	58,2%	63,2%
Lr10 calculée	33,8	38,9	41,0
Kr10 calculé sans végétation herbacée	42,4%	46,9%	44,4%
Kr10 calculé avec végétation herbacée	28,4%	32,4%	28,6%
Mesures de terrain			
Kr10 par Sircoulon en 1964	50%	53%	43%
Kr10 par Klein en 1967	41%	41%	38%
Kr10 par Albergel en 1984		35,5%	39%
Estimation			
Par la méthode Rodier-Auvray	36%	40%	38%

2) tout le débit provient du ruissellement;

3) la connaissance des paramètres d'écoulement est possible par télé-déttection;

4) les équations de lame ruisselée du catalogue des états de surface sont extrapolables au bassin en entier : c'est un des plus gros problèmes posés par cette méthode (on a vu qu'un coefficient de calage global était nécessaire);

5) les pentes ne sont pas prises en considération pour la fonction de production : ceci vient directement des résultats du simulateur de pluie qui n'en tient pas compte; au Sahel les pentes sont très faibles et leur influence peut souvent être supposée peu importante et homogène d'un bassin à l'autre;

6) les vitesses d'écoulement entre chaque point et l'exutoire sont supposées constantes, et le temps de transfert ne dépend que de la distance de drainage, calculée automatiquement à partir du modèle numérique de terrain; le ruissellement se transporte à l'exutoire avec un simple décalage en temps : c'est le mode de transfert de type hydrogramme unitaire.

À partir de ces hypothèses un modèle de propagation a été écrit en langage Turbo C sur micro ordinateur et appliqué aux bassins versants étudiés.

Nous donnons ci-dessous quelques résultats obtenus pour les bassins de Manga (fig. 10 et 11).

La comparaison entre les hydrogrammes de crues estimés à l'aide de notre méthodologie et ceux observés ou estimés de façon traditionnelle, montre une grande cohérence globale entre observations et estimations. Les résultats que l'on observe pour les trois bassins étudiés sont tout à fait acceptables, et donc encourageants.

4.3.3. Suite de l'étude, validations

Notre souci pour la suite de cette recherche porte d'abord sur la validation précise de chaque niveau de la démarche, en tenant compte de variations régionales possibles :

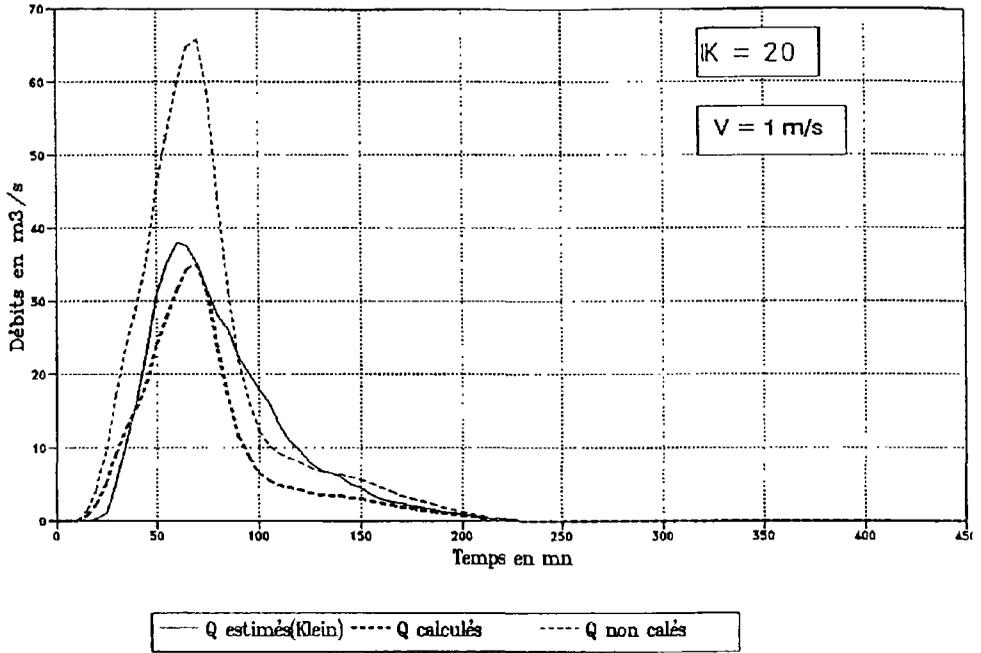


Figure 10. Reconstitution de la crue annuelle sur Binndé-Manga (à partir du hyétogramme décennal type)

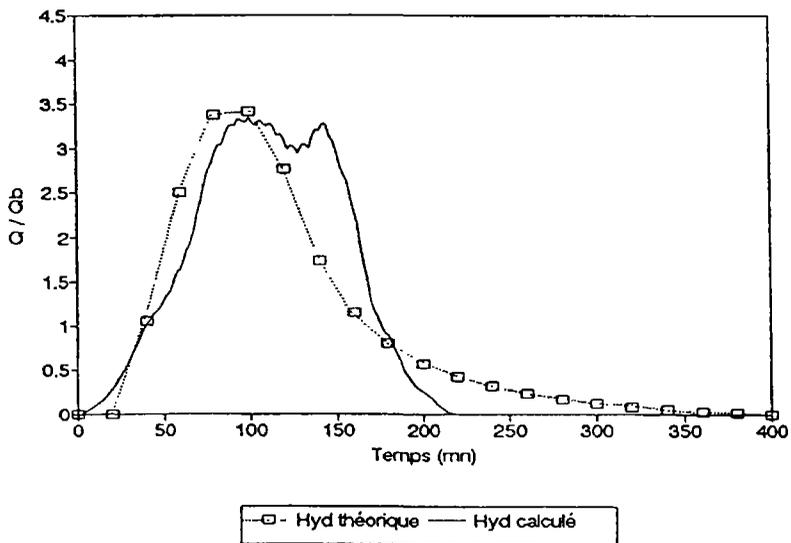


Figure 11. Reconstitution de l'hydrogramme unitaire sur Kazanga-Manga

- validation du traitement des images, ce que l'on peut approcher en comparant la carte des états de surface obtenue par rapport à celles définies sur le terrain;

- validation du calcul des lames ruisselées, à savoir la comparaison cartographique des lames ruisselées élémentaires calculées par rapport à celles qui ont été obtenues *in situ* par des mesures de l'ORSTOM, et ceci dans des conditions régionales diversifiées.

Nous pensons aussi améliorer l'approche hydrologique en utilisant des observations à d'autres résolutions spatiales ou temporelles, par exemple :

- la connaissance des conditions d'écoulement à la parcelle et sur un versant élémentaire; il serait intéressant, au niveau de la parcelle, de préciser les conditions d'écoulement, de façon à pouvoir mieux simuler la composition des ruissellements élémentaires; il manque en effet beaucoup d'informations sur le passage d'échelle du m² au versant puis du versant au bassin : les mesures existantes au niveau de versant élémentaire sont quasi inexistantes;

- l'utilisation des images à basse résolution spatiale.

Les calculs précédents à partir des images haute résolution nous permettent d'estimer les états de surface du bassin versant, états supposés stables dans le temps et décrits sans ambiguïté. Or, ne serait-ce qu'au cours de la saison des pluies, les états de surface du Sahel sont éminemment changeants. Il apparaît donc utile de pouvoir différencier à l'intérieur même de l'année ces variations d'états de façon à les inclure dans les calculs du ruissellement. Et une des meilleures façons d'estimer ces fluctuations passe par l'utilisation des images basse résolution (1 km) mais forte répétitivité (1 jour) du satellite NOAA.

5. Conclusion

L'objectif était avant tout de définir, en la testant, une méthode aussi fiable que possible de caractérisation hydrologique des bassins versants du Sahel, pour ce qui concerne leur aptitude au ruissellement; cette méthode devant combiner la connaissance au sol des états de surface type ORSTOM et l'utilisation de la télédétection satellitaire.

Si des démarches voisines ont déjà été mises en oeuvre pour le bassin du Baongo à Titao (Laboratoire commun de télédétection) et pour la mare d'Oursi (ORSTOM), la méthode appliquée dans cette étude en diffère sensiblement. Un des premiers problèmes a été de combiner les deux méthodologies : on s'est arrêté sur le choix de l'utilisation du catalogue des états de surface de l'ORSTOM, à coupler avec les techniques de télédétection du LCT.

Au niveau décodage des images de télédétection, l'étude montre qu'on s'approche plus finement de la réalité des états de surface par une superposition de plans descripteurs pertinents, qu'en s'appuyant sur un seul critère intégrant les états de surface.

Le couplage télédétection-hydrologie demande encore à être affiné, mais semble donner finalement des résultats cartographiques intéressants. Il faudrait toutefois les comparer à des résultats obtenus par d'autres approches pour en déduire la validité : contrôle de la validité du catalogue des états de surface par simulation de pluie directe et contrôle des conclusions de lames ruisselées grâce à des mesures hydrologiques.

Un des problèmes majeurs se rencontre au moment de l'utilisation des résultats de lames ruisselées qui ne sont théoriquement valables que pour une surface de 1 m² isolée du contexte. Nous avons ébauché ici les quelques possibilités d'utilisation de ces cartographies sans toutefois pouvoir les valider sur des données hydrologiques conséquentes : débit à l'exutoire, modélisation sommaire des écoulements.

6. Références

- ALBERGEL, J. 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso : du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. ORSTOM, Études et thèses, 341 p.
- CASENAVE, A. et VALENTIN, C. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. ORSTOM, Collection Didactiques, Paris.
- DELAHAYE, O. 1991. Apports de la télédétection à l'étude des ruissellements en zone soudano sahélienne. Mémoire de 3^e année de l'ENITRIS, Strasbourg, 90 p.
- KLEIN, J.C. 1964 et 1967. Étude hydrologique des bassins versants représentatifs du sud-est de la Haute Volta. ORSTOM, tome 1 : rapport intermédiaire campagne 1964, tome 2 : rapport définitif 1963-65
- PUECH, C. 1990. Apport de la télédétection à l'aménagement des bassins versants par petits ouvrages en Afrique soudano-sahélienne. Communication aux Journées techniques AUPELF-UREF, Ouagadougou, mars 1990, Bulletin de liaison du Comité interafricain d'études hydrauliques, n° 81, 18 p.
- PUECH, C. et CHABI-GONNI, D. 1983. Méthode de calcul des débits de crues décennales pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale. Comité interafricain d'études hydrauliques, Série Hydrologie, Ouagadougou, 100 p.
- RODIER, J. A. et AUVRAY 1965. Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. Publication ORSTOM - Comité interafricain d'études hydrauliques.
- RODIER, J. A. 1975. Évaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 46, Paris, 121 p.
- RODIER, J. A. 1976. Évaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique Occidentale. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol XIII, n° 4, p. 269-306.
- SIRCOULON, J. et KLEIN, J. C. 1964. Étude hydrologique de bassins expérimentaux dans le sud-est de la Haute Volta (région de Manga). Rapport intermédiaire, campagne 1963, ORSTOM, série Hydrologie.

10

Contribution de l'imagerie satellitaire à l'optimisation des aménagements hydro- agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal

LUC SÉGUIUS*, HERVÉ CHEVILLOTTE*, CHANTAL GASCUEL**,
PASCAL BOIVIN* et ERIK BRAUDEAU*

**ORSTOM, B. P. 1386, Dakar, Sénégal; téléphone : (221) 32-34-80 ou 32-34-76;
télécopieur : (221) 32 43 07; télex : 51 468 SG*

***Laboratoire de sciences du sol, Institut national de recherche agronomique, 65, route
de St-Brieuc, 35042 Rennes cedex, France; téléphone : (33) 99 28 54 27;
télécopieur : (33) 99 28 54 30*

Résumé

Dans un contexte de sécheresse persistante, l'aménagement hydro-agricole de la vallée du fleuve Sénégal est capital pour la recherche de l'auto-suffisance alimentaire des pays riverains. Actuellement, l'achèvement des barrages de Diama (Sénégal) et de Manantali (Mali) offre la possibilité d'une irrigation sécurisée. Mais, les acteurs du développement notamment au Sénégal soulignent la faiblesse des rythmes d'aménagement et de mise en valeur. Au-delà de problèmes structurels et conjoncturels, cet échec relatif est attribué à une prise en compte partielle des contraintes physiques et humaines de la vallée, dans la conception des aménagements. L'objectif du programme «Optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal» est de fournir aux aménagistes un outil d'aide à la décision dans le domaine des sciences de la terre et des sciences sociales. Les thèmes abordés, visant à la compréhension globale de la plaine alluviale sont multiples : caractérisation hydro-physique des sols (état structural, réserve hydrique, variabilité spatiale), comportement hydrologique des cuvettes (remplissage, vidange), situation socio-économique et perspectives en fonction des aménagements pour les cultures et l'élevage. Les pédologues

et hydrologues étudient la cuvette de Nianga (16°33'N-14°55'O) à proximité de Podor. À partir d'une image HRV de SPOT datée du 25 septembre 1990 (fin de la crue), une classification supervisée a permis de distinguer 22 classes d'eau, de sols et de cultures. Les principales classes de sol ont servi à délimiter des parcelles d'échantillonnage (d'environ 2,5 km²) de luminance homogène. Sur celles-ci, on détermine la moyenne et la variabilité des paramètres pédo-hydriques par les techniques de la géostatistique. Par ailleurs, l'image HRV a permis de localiser les zones inondées de manière pérenne, les eaux libres et les voies d'accès de l'eau à la cuvette. La combinaison du fond topographique à l'image satellitaire sera comparée au cubage des zones inondées sur le terrain. La modélisation du remplissage de la cuvette devrait prendre en compte l'hypsométrie, la longueur des drains et les états de référence constitués par le fond d'images HRV. Des relations entre luminance et caractéristiques pédo-hydriques ou bathymétrie seront calculées. L'extension de l'étude à la moyenne vallée sera envisagée à partir de l'ensemble de ces travaux, de données satellitaires et de protocoles de terrain allégés.

1. Introduction

La sécheresse persistante depuis quinze ans a rendu capital l'aménagement hydro-agricole de la vallée du fleuve Sénégal en vue de l'autosuffisance alimentaire des pays riverains. Actuellement, l'achèvement des barrages de Diama (Sénégal) et de Manantali (Mali), offre la possibilité d'une irrigation sécurisée par le maintien d'une ligne d'eau suffisante en saison sèche. Mais de nombreux problèmes restent posés pour le développement des surfaces irriguées (DIEMER et LAAN, 1987). Les acteurs du développement au Sénégal (Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (O.M.V.S.), Ministère sénégalais du développement rural et de l'hydraulique, Cellule de l'après-barrage, Société d'aménagement pour l'exploitation des terres du delta et de la vallée du fleuve Sénégal (SAED), etc.) soulignent la faiblesse des rythmes d'aménagements et de mise en valeur des surfaces dans la moyenne vallée. Au-delà des problèmes structurels ou conjoncturels, cet échec relatif est attribué à une prise en compte partielle des contraintes physiques et humaines de la vallée, dans la conception des aménagements.

L'objectif du programme «Optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal» est de fournir aux aménagistes un outil d'aide à la décision dans le domaine des sciences de la terre et des sciences sociales. Les thèmes abordés par les pédologues et les hydrologues sont la caractérisation hydro-physique des sols (état structural, réserve hydrique, variabilité spatiale) et le comportement hydrologique des cuvettes (remplissage, vidange). La première phase du programme consiste en une collecte des données, une connaissance des mécanismes et une définition de protocoles d'échantillonnage et de mesures à l'échelle d'une cuvette qui seront utilisables lors de l'extension de l'étude à la moyenne vallée.

L'outil satellitaire représente ici, une première contribution pour répondre aux objectifs de ce programme.

2. Cadre de l'étude

La cuvette de Nianga, au sud de la ville de Podor (16°39'N-14°58'O) sur la rive gauche du Sénégal a été choisie comme objet d'étude. De forme elliptique (25 km est-ouest sur 10 km

nord-sud), la cuvette est ceinte par une digue depuis les années 1970. L'ouvrage protège le périmètre irrigué de Nianga (1000 ha en culture, actuellement).

Dans le cadre du programme, une image multibande HRV (KJ 24/317) a été prise le 25 septembre 1990. L'image s'étend de la rive droite mauritanienne au Ferlo sénégalais et comporte la ville de Podor (16°39'N-14°58'O). Pour l'étude de la cuvette de Nianga, une zone de 638 km² a été extraite de l'image.

Les caractéristiques des luminances dans les 3 canaux sont regroupées sur le tableau I.

Bien que la corrélation XS1-XS3 soit plus faible que celle entre XS2 et XS3, la classification a été effectuée sur les canaux 2 et 3 car l'image du canal 1 présentait des défauts (linéations).

Tableau I. Caractéristiques des luminances de l'image

Canal	min.	max.	moyenne	écart-type	Matrice de corrélation		
					XS1	XS2	XS3
XS1	130	159	146,4	3,5	1,00	0,81	0,27
XS2	129	194	163,3	7,6	0,81	1,00	0,40
XS3	114	159	136,0	6,4	0,27	0,40	1,00

3. Définitions des classes

À l'aide de la carte au 1:50 000 d'aptitudes culturales de la zone (F.A.O., 1969) et des comportements spectraux généraux des grands thèmes (eau, sol, végétation) (GIRARD et GIRARD, 1989), nous avons identifié 22 classes.

Une attention particulière a été portée sur le thème «eau». Huit classes d'eau ont été définies en fonction d'une luminance croissante dans le proche infrarouge. Les thèmes retenus pour la classification et leurs caractéristiques dans les canaux 2 et 3 sont réunis sur le tableau II.

L'augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge pour l'eau est attribuable à une diminution de la tranche d'eau ou à une turbidité plus grande (les deux phénomènes peuvent être associés) (PAGES *et al.*, 1988).

La figure 1 présente les ellipses de confiance à 80% des 22 classes. Les classes sont relativement disjointes. Elles sont distribuées en fonction de l'importance des composantes eau, sol et végétation. Les classes à composante unique sont :

- la première classe d'eau (n° 1) correspondant aux zones les plus profondes du fleuve Sénégal,

- le sommet des dunes (n° 16) à forte luminance dans les deux canaux,

- la zone pilote du périmètre irrigué de Nianga (n° 10) où le riz est plus dense et vigoureux. L'absorption importante dans le canal 2 indique une forte activité chlorophyllienne.

Les sols s'organisent en fonction d'une augmentation conjointe des luminances des fonds de cuvette de couleur sombre (n° 11) aux parties sommitales claires des dunes (n° 16). La classification effectuée permet de délimiter les principales unités géomorphologiques telles qu'elles sont définies par MICHEL (1973). Ces unités géomorphologiques correspondent à des sols relativement bien différenciés d'une unité à l'autre, comme l'ont montré les études pédologiques antérieures menées sur la cuvette de Nianga (BRAUDEAU, 1978). Ainsi on peut définir les correspondances suivantes : 1) la classe 11 délimite les fonds de cuvette et correspond à des vertisols modaux, sols très argileux à caractère vertique accentué; 2) la classe

Tableau II. Caractéristiques des 22 classes

n°	Thème	Canal 2		Canal 3		Coefficient de corrélation XS2-XS3
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
1	Eau	159,77	0,83	116,92	0,39	0,09
2	Eau	159,97	1,31	118,33	0,64	0,11
3	Eau	160,22	1,56	120,55	0,68	-0,13
4	Eau	157,13	1,05	122,45	0,55	-0,15
5	Eau	162,29	1,23	124,40	0,53	0,11
6	Eau	158,89	1,08	126,26	0,61	0,20
7	Eau	166,97	0,94	128,59	0,71	-0,19
8	Périmètre irrigué villageois	145,72	3,04	138,23	1,49	-0,45
9	Périmètre de Nianga	139,89	1,89	146,51	0,98	-0,45
10	Périmètre pilote de Nianga	133,14	1,03	150,61	0,71	0,11
11	Fond de cuvette, végétation de méandre	157,22	1,03	132,17	1,84	0,06
12	Cuvette	161,14	0,92	134,38	1,92	0,46
13	Transition levée-cuvette, sillon interdunaire	162,89	2,18	141,99	1,27	-0,17
14	Partie basse des levées	165,16	1,16	137,74	1,03	0,52
15	Dune	170,78	1,36	145,44	1,38	0,62
16	Sommet de dune sans végétation	176,31	0,93	149,49	0,66	0,43
17	Périphérie des mares à végétation	148,83	3,12	124,78	2,40	-0,60
18	Rizière en eau	153,77	1,11	121,79	1,24	0,72
19	Centre des mares à végétation	150,86	0,95	118,72	0,94	0,59
20	Zones exondées encore humides	164,53	0,98	130,33	0,78	-0,11
21	Marigot du Koundi	172,95	0,82	128,77	1,22	0,35
22	Petites levées le long des défluent	171,60	0,97	136,85	3,46	-0,40

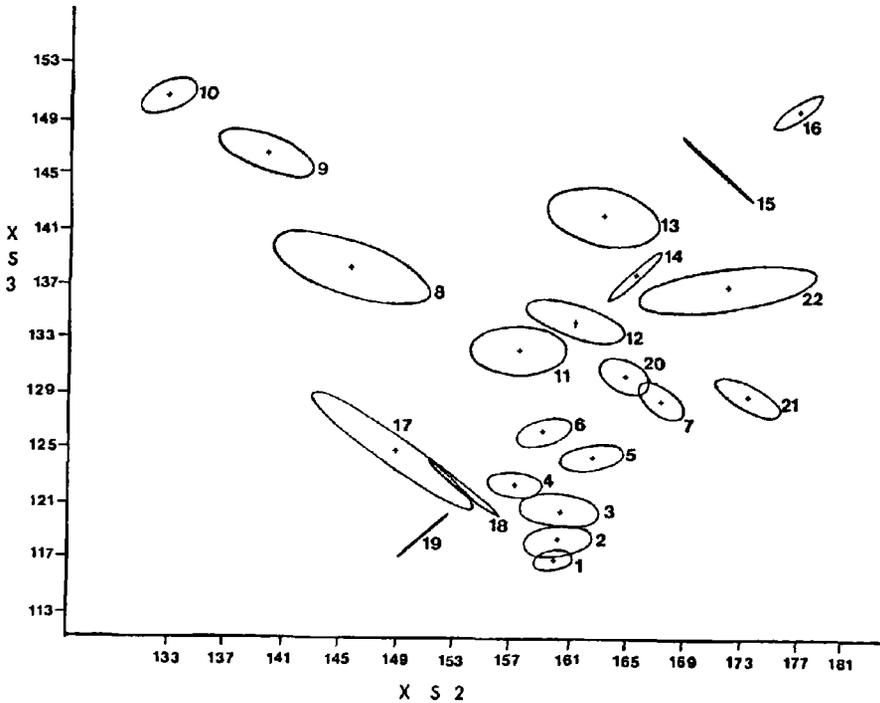


Figure 1. Ellipses de confiance à 80% des classes retenues

12 délimite les cuvettes et comprend essentiellement des vertisols vertiques, sols argileux dont les caractères vertiques sont nettement moins accentués que dans la classe précédente; 3) les classes 13 et 14, constituant les parties basses des levées, comportent des sols peu évolués, d'apport alluvial; ce sont des sols hydromorphes en général, à texture limono-sableuse ou sablo-limoneuse; 4) les classes 15 et 16, comprenant les parties hautes des levées, correspondent à des sols hydromorphes peu évolués à texture dominante sableuse.

Dans les autres classes, deux thèmes interviennent. Les rizières ennoyées (n° 18) ont une faible luminance dans le canal 3 analogue aux autres classes d'eau, par contre l'absorption plus importante dans le canal 2 indique la présence de végétation. Il en est de même pour la périphérie des mares (n° 17). Le centre des mares (n° 19) se caractérise par une eau moins turbide (décantation) et des tranches d'eau plus importantes qu'en périphérie. La luminance dans le canal 3 est donc similaire aux classes d'eau du fleuve mais la turbidité plus faible détermine une luminance inférieure dans le canal 2.

Enfin, l'intersection des ellipses des classes 7 et 20 marque la continuité entre des zones récemment exondées mais encore humides et les zones où la lame d'eau est minimale. Le rapport $XS3/XS2$ permet de classer les classes d'eau en éliminant l'influence de la turbidité. Sur la figure 2 où les classes ont été rangées en fonction d'un rapport $XS3/XS2$ croissant, la courbe présente deux cassures séparant les classes d'eau, de sols et de couvert végétal. La limite des zones ennoyées correspond aux classes 20 et 6 représentant les levées humides et les faibles tranches d'eau. La classe 22 (petites levées) n'est pas placée avec les autres classes de sol. Ceci est peut-être attribuable à une mauvaise définition spectrale dans $XS2$. Malgré sa position excentrée sur la figure 1, la classe 21 du marigot de Koundi (Mauritanie) se situe bien dans les classes d'eau. Par contre, la position dans le graphique de la classe 18 «Rizière en eau» semble indiquer la faible influence de la composante «eau» dans les luminances de cette classe.

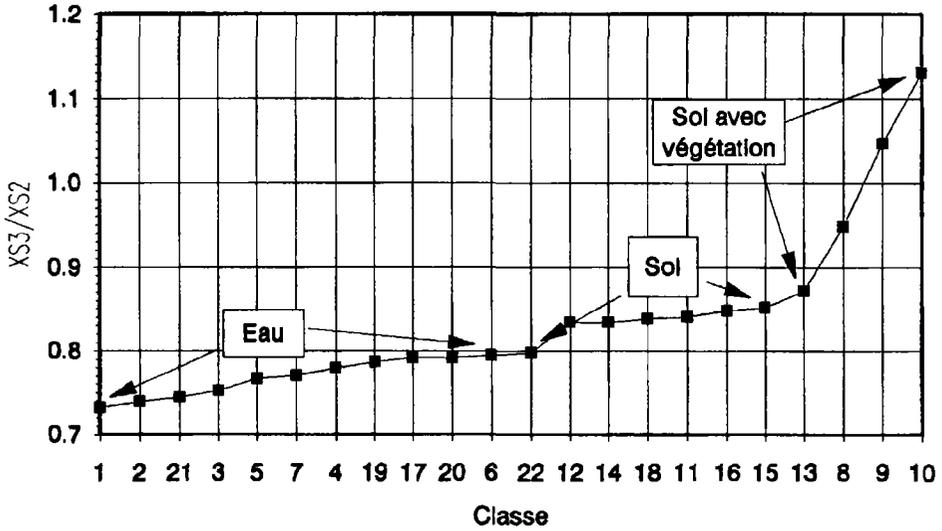


Figure 2. Rapport des canaux XS3 sur XS2

4. Classification supervisée

La classification effectuée sur les canaux 2 et 3 est de type euclidienne : chaque pixel est affecté à la classe la plus proche au sens de la distance euclidienne aux luminances moyennes de la classe. Le tableau III présente la matrice de confusion sur les pixels des polygones de définition des classes. Des éléments de la classe 7 (eau) passent dans la classe 20 (levée humide). Une fraction de la classe 11 (fond de cuvette, végétation de méandre) est redistribuée dans la classe 6 (eau). Enfin, 10% de la classe 17 (rizière inondée) passe dans la classe 4 (eau). Ces erreurs d'affectation sont dues à la difficile définition de la lisière entre les zones inondées et exondées.

L'image classifiée est présentée sur la figure 10-3 (voir cahier couleur). La figure 4 donne la répartition des pixels de l'image classée. Les voies d'eau ressortent bien ainsi que la structure de la cuvette de Nianga. Fin septembre 1990, les zones inondées de la cuvette ne concernent que le sud-ouest de l'image. L'inondation est due à la remontée du niveau de la retenue de Diama durant l'hivernage et à la vidange des casiers du périmètre irrigué. Les eaux du Sénégal se répartissent des classes 1 à 5 tandis que celles du Doué sont dans les classes 5 à 7. Il y a parfois même confusion avec la terre ferme. Ceci est peut-être attribuable à une plus grande turbidité du Doué

La figure 10-5 (voir cahier couleur) présente le détail des deux principales zones inondées de la cuvette de Nianga. Le report de la topographie sur l'image permet de vérifier que l'augmentation du rapport XS3/XS2 dans les classes d'eau correspond bien à une diminution de la tranche d'eau. Sur ces deux images, on peut fixer la cote de l'eau à environ 3 m le 25 septembre 1990.

5. Utilisation pédologique de la classification

Cette classification a servi de base à l'étude de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques des sols de la cuvette de Nianga. Elle a permis de définir une stratégie

Tableau III. Matrice de confusion des polygones de définition des classes

Classe	% des pixels d'une classe réaffectés																						Effectif
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
1	96	4																					83
2	8	90	2																				1472
3		3	86	9	2																		1495
4			9	88	3																		462
5					97	3																	190
6					1	99																	309
7							92												7				491
8								98	1	1													1596
9								99	1														1112
10									100														230
11						11				85	4												1803
12										10	86		3							1			1715
13												93	7										5478
14											2		98										1440
15													1	98	1								4761
16															100								1785
17				10		1											84		5				5037
18				1													13	82	4				1927
19																		5	95				1203
20																			3	97			1260
21																					99	1	181
22																					14	86	1731
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	

d'échantillonnage à deux niveaux. En premier lieu un secteur de référence a été choisi sur chacune des classes définies (fig. 10-3, voir cahier couleur). Ce secteur de 1,2 sur 2,4 km correspond à la plus grande surface possible à l'intérieur de la classe considérée, comportant une forme simple. Le tableau IV permet de vérifier l'homogénéité des luminances des canaux 2 et 3 dans chacun des secteurs.

Tableau IV. Caractéristiques des luminances des 5 secteurs sélectionnés

Secteur	Canal 2		Canal 3	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
1	160,20	2,13	134,45	1,56
2	162,49	2,50	142,12	1,29
3	158,70	1,72	134,17	1,33
4	166,22	1,79	138,20	1,39
5	165,26	2,06	137,37	1,24

Sur chaque secteur, 84 points sont répartis aléatoirement aux noeuds d'une grille régulière de 75 m de côté, avec la contrainte de disposer de deux points au moins par maille de 300 m de côté. Cet échantillonnage stratifié permet d'analyser de façon détaillée les autocorrélations

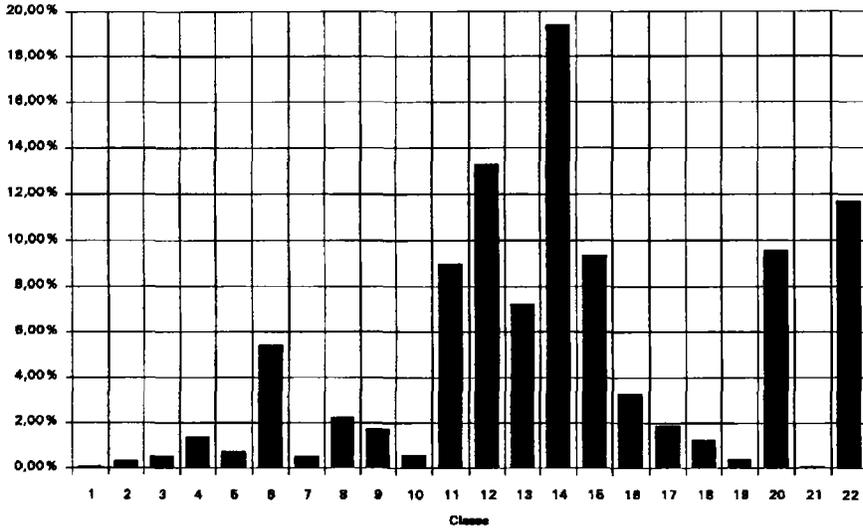


Figure 4. Répartition des pixels de l'image par classes

spatiales entre 75 et 1000 m, avec un pas de 75 m et une densité d'échantillonnage sensiblement homogène sur l'ensemble du secteur de référence. En second lieu un échantillonnage de densité beaucoup plus faible couvrira l'ensemble de chacune des classes à l'échelle de la cuvette de Nianga. Sur chacun des 84 points, l'analyse pédologique porte sur la détermination en laboratoire des caractéristiques physiques du sol telles que la courbe de retrait et les courbes caractéristiques d'humidité; elle est complétée par la description morphologique de la surface du sol et des horizons pédologiques et par la détermination des caractéristiques physico-chimiques classiques (granulométrie, capacité d'échange, cations majeurs, carbone, azote extrait 1/5^e).

Les premiers résultats concernent le secteur de référence de la classe 12 (secteur n° 1 de la fig. 10-3, voir cahier couleur), classe visée en premier lieu par la mise en place des aménagements. Ils portent sur l'analyse morphologique de la surface du sol et des horizons du sol et confirment une nette prédominance des sols à caractères vertiques sur ce secteur. Cependant on observe que 23 profils pédologiques, sur les 84 considérés, ne correspondent pas à l'interprétation pédologique donnée à cette classe. Ce fort pourcentage d'impureté, de 27%, n'est pas le fait de profils répartis au hasard; il correspond aux sols de petits marigots d'une dizaine de mètres de large, internes à la cuvette, et à ceux des petites levées de berges de quelques dizaines de centimètres bordant ces marigots. De par leur relief chaotique, ces zones ne sont pas concernées par les aménagements rizicoles envisagés et doivent être exclus de l'analyse spatiale des caractéristiques physico-chimiques des sols. Ces zones sont partiellement visibles mais mal délimitées sur l'image classée. Le couplage des données avec celles de la topographie pourrait peut-être permettre de les reconnaître *a priori*, avant de fixer tout dispositif d'échantillonnage.

6. Conclusion

Pour sa mise en route, le programme «Optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal» a grandement bénéficié de l'imagerie satellitaire. Celle-ci a permis :

- une mise à jour des cartes anciennes (digues, routes, nouveaux périmètres irrigués),
- une détermination du réseau hydrologique en fonctionnement en l'absence de crue importante.

En pédologie, la classification a servi à délimiter les parcelles d'échantillonnage de luminance homogène. En hydrologie, le pourtour des zones inondées se définit bien en fonction du rapport XS3/XS2. La superposition du fond topographique à l'image montre la bonne correspondance entre la segmentation des classes d'eau et la bathymétrie.

La suite du programme nécessitera des études radiométriques de terrain. Elles auront comme objet :

- l'étude du rapport XS3/XS2 sur une nappe d'eau en fonction de ses caractéristiques (turbidité, épaisseur, végétation, couleur du fond),
- la définition de relations entre réflectances et caractéristiques pédo-hydriques.

L'ensemble de ces travaux servira à l'extension de l'étude à la moyenne vallée.

7. Références

- BRAUDEAU, E. 1978. Étude pédologique de la cuvette de Nianga (secteur A), région du fleuve Sénégal. Mémoire ORSTOM, Dakar, 77 p.
- F.A.O. 1969. Carte d'aptitudes culturales des terres de la vallée et du delta du Sénégal au 1:50 000. 35 feuilles.
- DIEMER, G. et VAN DER LAAN 1987. L'irrigation au Sahel. Édition Karthala C.T.A., Paris, 226 p.
- GIRARD, M. C. et GIRARD, C. M. 1989. Télédétection appliquée; zones tempérées et intertropicales. Collection Sciences agronomiques, Masson, Paris, 260 p.
- MICHEL, P. 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie; études géomorphologiques. Mémoire ORSTOM, Dakar, n° 63, 3 tomes, 752 p.
- PAGES, J., CITEAU, J. et DEMARCQ, H. 1988. Bathymétrie par imagerie SPOT sur la Casamance (Sénégal); résultats préliminaires. 4^e colloque international Signatures spectrales d'objets en télédétection, 18-22 janvier, Aussois, France, 6 p.

PARTIE III

Cartographie des milieux dégradés

11

Cartographie et calcul de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et d'un SIG, cas du bassin versant d'oued Aricha (Settat, Maroc)

HASSAN ANYS*, FERDINAND BONN* et ABDELAZIZ MERZOUK**

**Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1; téléphone : 819-821-7964; télécopieur : 819-821-7238; télex : 05-836149*

***Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (I.A.V. Hassan II), B. P. 6202, Rabat, Maroc; téléphone : 212-7-7717-58; télécopieur : 212-7-7798-85*

Résumé

L'érosion hydrique, prise comme processus naturel que l'homme accélère, constitue l'accusé principal de la dégradation du patrimoine agropédologique en plus de la détérioration de la qualité d'eau qu'elle entraîne. Les facteurs topographiques et climatiques associés à la forte croissance démographique font du Maroc un milieu favorable au phénomène de l'érosion (hydrique, éolienne, etc.). Cette étude fait appel à la télédétection et à un système d'information géographique (SIG) pour quantifier les pertes de sols annuelles à l'aide de l'équation universelle de pertes de sol (USLE), la quantité de sédiments qui sera transportée jusqu'au cours d'eau de même que le potentiel érosif pour le bassin versant d'oued Aricha (Settat, Maroc). Comme on s'y attendait, le plus grand taux de pertes de sol est localisé dans les régions de sols nus. Toutefois, il est à noter que ce taux de pertes de sol dans ces régions n'est pas seulement dû à l'absence de couvert végétal; en effet, le potentiel érosif, qui fait abstraction de la nature de l'occupation des terres et considère seulement les facteurs physiques du sol, a toujours attribué la plus grande valeur pour les sols nus. On remarque aussi que les pertes de sols importantes (plus que 20 t/ha/an) proviennent uniquement du tiers du secteur d'étude (34,94%); la carte des pertes de sols montre aussi que ces zones sont surtout localisées sur les

berges des cours d'eau. Dans les zones où la quantité de sédiments acheminée jusqu'au cours d'eau est aussi grande que celle perdue à l'origine, on peut conclure que la topographie et la nature du sol sont favorables à l'arrachage des matériaux et leur «livraison» jusqu'au cours d'eau. Cette étude a démontré que la télédétection, de concert avec d'autres sources de données procure des renseignements remarquables et uniques pour la détermination de l'érosion du sol, et de la susceptibilité à l'érosion, à des échelles variant entre 1:50 000 et 1:200 000.

1. Introduction

Une étude réalisée par la Food and Agriculture Organisation (F.A.O., 1977) au Maroc a montré que plus de 12 millions d'hectares de terres de cultures et de parcours sont menacés par l'érosion et que les deux tiers des terres actuellement cultivées nécessitent des interventions urgentes et des mesures de conservation sévères. Cette perte produite en amont se traduit par une réduction de la productivité des sols.

Dans une perspective de lutte anti-érosive, la Direction des eaux et forêts et de la conservation du sol au Maroc entreprend des travaux de conservation des eaux et du sol tels que l'aménagement pastoral, le reboisement et la construction de seuils de sédimentation.

Cependant, de tels efforts ne peuvent être efficaces et suffisamment rentables s'ils ne sont pas orientés vers les terres qui présentent la plus grande priorité d'intervention.

Cette étude vise à mettre en oeuvre les plus récentes techniques de cartographie et de calcul pour l'économie du temps et des moyens. En effet, elle fait appel à la télédétection et au système d'information géographique (SIG) pour développer une méthodologie qui permettra de quantifier et cartographier les pertes de sols annuelles, la quantité de sédiments qui sera transportée, à l'échelle de la parcelle, jusqu'au cours d'eau de même que le potentiel érosif pour le bassin versant d'oued Aricha (Settat, Maroc). Cette quantification sera faite à l'aide de l'équation universelle de pertes de sol (USLE) (WISCHMEIER and SMITH, 1958) en utilisant des données provenant de diverses sources, à savoir des données de télédétection, un modèle numérique d'élévation, des données cartographiques, des données météorologiques, et des visites sur le terrain.

2. Matériel et méthode

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la région de la haute Chaouia (plateau des phosphates), celle-ci est séparée de la plaine de Berrechid (basse Chaouia) par une flexure caractérisée dans le paysage par un contact net qui est marqué par une dénivelée de 60 à 100 m.

Le secteur d'étude est le bassin versant d'oued Aricha situé au sud-est de Settat (Maroc). Il couvre une superficie de 13 800 ha et présente un relief très accidenté avec des altitudes qui varient de 400 m à 795 m et des pentes fortes allant de 0 à 40% et parfois plus. Il ressort des données thermiques de la station de Settat que la zone d'étude est caractérisée par un régime thermique contrasté et saisonnier où on distingue de façon très nette une saison fraîche à froide et une saison estivale chaude.

En ce qui a trait à l'utilisation des sols, la zone d'étude est à vocation céréalière, dont le blé et l'orge sont les plus dominants et occupent 66% de la superficie agricole utile (S.A.U.).

2.2. Données disponibles

Données cartographiques :

- carte pédologique au 1:100 000 de la région de Settat (Maroc);
- deux cartes topographiques au 1:50 000 qui couvrent la zone d'étude.

Il faut noter aussi que des photographies aériennes à l'échelle 1:17 500 datant de 1982 et couvrant tout notre secteur d'étude sont disponibles.

Image satellitaire :

- image TM de Landsat-5 datant du 2 octobre 1986.

Données de terrain :

- données des températures enregistrées à la station de Settat pour une période de 30 ans (1933 à 1966);
- données pluviométriques mensuelles des 20 dernières années enregistrées à la station de Ben Ahmed, ainsi que l'intensité maximale en 24 heures de période de retour de 2 ans;
- étude granulométrique de toutes les unités pédologiques de notre secteur d'étude.

2.3. Méthodologie

L'équation universelle de pertes de sol a été utilisée, dans plusieurs pays du monde, pour prédire la perte de sol, à long terme, provenant de l'érosion torrentielle, par ruissellement et en nappe (WISCHMEIER and SMITH, 1958).

La moyenne annuelle de pertes de sol par hectare (A) est déterminée à partir de 6 facteurs : l'indice d'érosivité des pluies (R), l'érodabilité propre à chaque sol (K), la longueur de pente (L), le degré de pente (S), la couverture et la gestion des terres (C) et les pratiques de conservation entreprises (P) (WISCHMEIER and SMITH, 1958).

COOK *et al.* (1985) ont utilisé, sur micro-ordinateur, un modèle comportant l'USLE et le coefficient de transportabilité des matériaux détachés pour désigner les principales surfaces sources en érosion des sols. Le même modèle a ensuite été utilisé par HESSION et SHANHOLTZ (1988) à l'aide d'un système d'information géographique pour estimer le potentiel d'apport en sédiments qui seront transportés à partir des terres agricoles jusqu'au cours d'eau.

Pour ce qui est de notre méthodologie, on a intégré tous les facteurs de l'USLE de même que le facteur de transportabilité des sédiments à l'échelle de la parcelle (DR) dans un SIG créé avec le logiciel PAMAP afin de pouvoir élaborer une carte de pertes de sol, une carte de potentiel érosif et une carte de potentiel de transport de sédiments jusqu'au cours d'eau. Il faut souligner aussi que la carte des indices C a été déterminée indirectement à partir des données de télédétection et de l'indice de végétation TSAVI (Transform Soil Adjusted Vegetation Index) (BARET *et al.* 1989).

2.3.1. Calcul de l'érosivité des pluies (R)

HEUSCH (1970) a développé pour des stations du Maroc une formule empirique qui permet de calculer le facteur d'érosivité des pluies; cette formule est :

$$R = 143 \log (\bar{P} \cdot P_{24}^2 \cdot 10^{-6}) + 89,7$$

\bar{P} = précipitation moyenne annuelle (mm);

P_{24} = précipitation maximale en 24 heures, période de retour 20 ans (mm).

Pour le bassin versant d'oued Aricha, les précipitations moyennes annuelles calculées à la base des 20 dernières années sont de 422,8 mm. Les précipitations maximales en 24 heures ayant une période de retour de 20 ans sont de l'ordre de 50 mm d'où :

$$R = 143 \log (422,8 \cdot 50^2 \cdot 10^{-6}) + 89,7 = 97,6.$$

2.3.2. Calcul de l'érodabilité des sols (K)

L'érodabilité du sol a été déterminée, pour chaque type de sol, à partir du nomographe établi par WISCHMEIER et SMITH (1978). L'utilisation de ce dernier a nécessité des données de granulométrie, de taux de matière organique, de structure et de perméabilité. Ces données d'analyses ont été tirées de l'étude pédologique effectuée par ABDILLAH (1985) pour les communes rurales de M'Garto et Tlat Loulad de la province de Settat.

La figure 11-1 (voir cahier couleur) présente la carte pédologique numérisée dans PAMAP de même que la valeur de l'indice K pour chaque unité pédologique.

2.3.3. Calcul du facteur topographique (LS)

Les deux composantes du facteur topographique, à savoir la longueur de pente (L) et le degré de pente (S), ont été calculées à l'aide du modèle numérique de terrain (M.N.T.) créé à partir de la carte topographique au 1:50 000 ayant une équidistance de 10 m.

À partir du fichier pente on a pu établir les grandes classes de pente et en produire une carte (fig. 11-2, voir cahier couleur).

La longueur de pente (L), pour un point d'un bassin versant, est définie par la S.C.S. (Soil Conservation Studies) (ZING, 1940) comme la distance entre ce point et sa source de ruissellement qui est généralement la crête ou le sommet d'une colline.

Ainsi, le programme de calcul de longueur de pente parcourt le fichier des 8 classes d'orientation en format matriciel et assigne à chaque pixel une valeur correspondant au rang de ce pixel dans la suite de pixels de même orientation à laquelle il appartient. Pour chaque pixel le programme vérifie son orientation, ensuite il vérifie si le pixel suivant a la même orientation, si l'orientation est la même alors le programme assigne au pixel en cours de traitement la valeur du pixel en amont +1, sinon le pixel se voit assigner la valeur 1 sauf si l'orientation du pixel est zéro. Dans ce dernier cas, la valeur 0 est assignée au pixel pour indiquer qu'il s'agit d'un pixel sans orientation (pente nulle).

D'après WISCHMEIER et SMITH (1978), le facteur LS est calculé comme suit :

$$LS = (L/22,15)^m (65,41 \sin^2 S + 4,56 \sin S + 0,065)$$

où

L = longueur de pente (mètre);

S = Degré de pente; et

m = 0,2 si S < 1%;

m = 0,3 si 1% ≤ S < 3,5%;

m = 0,4 si 3,5% ≤ S < 5%;

m = 0,5 si S ≥ 5%.

2.3.4. Calcul des facteurs de couverture au sol (C) et des pratiques culturales (P)

Afin d'établir une carte des indices «C», il a fallu élaborer une carte d'occupation des terres et assigner à chaque type de couverture au sol une valeur «C» qui lui est propre.

La cartographie de l'occupation des terres a été effectuée à l'aide du logiciel de traitement d'images EASI/PACE de PCI sur une image TM de Landsat-5.

Afin de rendre plus facile la classification thématique de notre image on a calculé l'indice de végétation TSAVI qui nous a permis de mettre plus en relief les différentes classes d'occupation des terres. Notre choix s'est posé sur cet indice parmi de nombreux autres car il est ajusté pour les caractéristiques de la droite des sols nus propre à chaque image afin d'éliminer l'erreur de calcul de l'indice de végétation pour un faible indice foliaire «L.A.I.» (Leaf Area Index) ou un faible couvert végétal qui sont des situations courantes dans notre secteur d'étude.

D'après BARET *et al.* (1989), le TSAVI se calcule comme suit :

$$\text{TSAVI} = \frac{a (R_{\text{nir}} - a R_{\text{r}} - b)}{(R_{\text{r}} + a R_{\text{nir}} - a b)}$$

Les résultats de la régression entre les bandes rouge et proche-infrarouge des pixels choisis ont permis de calculer les deux paramètres a et b de la droite des sols nus :

$$a = 1,30554542$$

$$b = -1,84223629$$

La figure 3 montre le résultat de calcul du TSAVI avec les grandes classes qu'on a pu établir en s'appuyant sur la photo-interprétation (photographies aériennes au 1:17 500) et les valeurs de cet indice.

Il faut noter cependant, que la classe «eau» n'a pu être bien différenciée puisque tous les cours d'eau sont couverts par une végétation verte très dense.

Par conséquent, on a numérisé sur PAMAP les cours d'eau de la carte topographique au 1:50 000 puis on les a superposés au résultat de classification par le TSAVI et la photo-interprétation; le résultat final est présenté sur la figure 11-4 (voir cahier couleur).

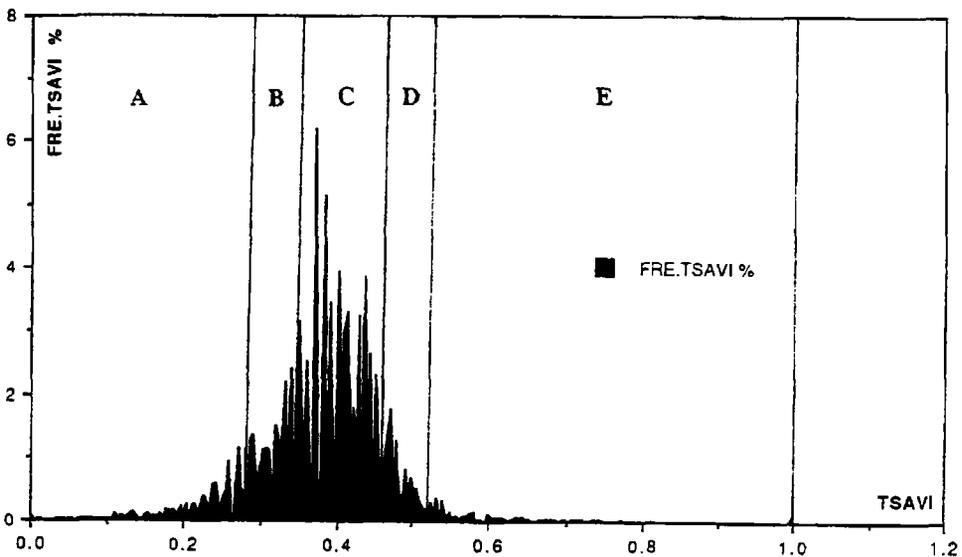


Figure 3. Découpage de l'histogramme du TSAVI; A = sols nus; B = jachère; C = cultures assolées à sec; D = forêt et reboisement peu denses; E = cultures irriguées et végétation dense le long des oueds

La dernière étape de l'élaboration de la carte des indices C est la détermination de ce dernier pour chaque type de couverture au sol et l'assignation de ces valeurs aux zones correspondantes dans l'image TM.

La forêt et le reboisement existant dans notre secteur d'étude, de climat semi-aride, ne comportent pas, ou peu, de broussailles dans les sous-bois. Le facteur C pour cette catégorie d'occupation des terres a été déterminé à partir de la table 10 figurant dans «Agriculture handbook no. 537» (WISCHMEIER and SMITH, 1978).

Pour les autres catégories d'occupation du sol, les valeurs du facteur C ont été tirées des résultats expérimentaux adoptés par OMAKUPT *et al.* (1988) pour les mêmes types d'occupations des terres (tab. I).

Tableau I. Indice C par thème d'utilisation du sol

Type de cultures	Indice C	Superficie (ha)	Superficie (%)
Cultures irriguées et végétation dense le long des oueds	0,28	164,34	1,19
Forêt et reboisement peu denses	0,39	781,38	5,65
Cultures assolées à sec (céréales, fourrage, etc.)	0,40	10464,14	75,68
Jachère	0,45	2169,70	15,69
Sols nus	1,00	246,51	1,79
Total		13 826,07	

2.3.5. Calcul du coefficient de transportabilité des sédiments à l'échelle de la parcelle (DR)

Le coefficient de transportabilité des sédiments à l'échelle de la parcelle (DR) a été défini par HESSION et SHANHOLTZ (1988) à l'aide de l'expression suivante :

$$DR = 10 (r/L')$$

où r est la différence d'altitude entre la cellule agricole et la cellule du cours d'eau qui lui est associée et L' est la distance entre ces deux cellules.

Pour le calcul de la distance L', on a utilisé le même programme de calcul de longueur de pente auquel on a appliqué une seule modification. Le programme exécute la même fonction que ce qu'on a décrit dans la section (2.3.3) sauf que les orientations recherchées ont été inversées; en d'autres termes, le programme recherche des orientations du même sens que celui du balayage du fichier en format matriciel.

D'autre part, un nouveau programme a été développé pour le calcul du relief r. Ce programme utilise pour cet effet le fichier des orientations et le modèle numérique d'altitude.

Après avoir calculé le relief (r) et la distance au plus proche cours d'eau (L') ces deux fichiers ont été transférés sur PAMAP afin de calculer le coefficient de transportabilité des sédiments DR.

3. Présentation et analyse des résultats

3.1. Application du modèle USLE et sa combinaison avec le coefficient DR

Les cinq facteurs actuels (R, K, LS, C et P) furent intégrés au SIG PAMAP et la fonction de modélisation USLE, définie comme le produit de chaque facteur, a été utilisée pour obtenir la carte finale d'érosion des sols. Les valeurs d'érosion sont quantifiées en tonnes par hectare par année (fig. 11-5, voir cahier couleur).

Une autre carte du potentiel érosif, qui met l'accent sur les facteurs physiques du sol (R, K et LS), a été produite en considérant uniquement le produit de ces derniers dans l'USLE (fig. 11-6, voir cahier couleur).

D'autre part, la carte du coefficient DR a été combinée à l'USLE pour élaborer la carte représentant les quantités de sédiments qui seront transportés jusqu'au cours d'eau (fig. 11-7, voir cahier couleur).

3.2. Pertes des sols et potentiel érosif

Étant donné que les pertes de sols moyennes varient en fonction de l'occupation des terres, celles-ci sont représentées au tableau II pour chaque type de couverture au sol. Le plus grand taux de pertes de sol est localisé dans les régions de sols nus; toutefois l'existence d'une telle perte de sol n'est pas seulement due à l'absence de couvert végétal; en effet, le potentiel érosif, qui fait abstraction de la nature de l'occupation des terres, a toujours attribué la plus grande valeur pour les sols nus. Par conséquent, ces sols ne sont pas seulement nus, mais se trouvent en plus dans des régions à topographie très accidentée avec un sol de nature favorable à l'érosion.

Pour ce qui est des autres occupations des terres à savoir les cultures irriguées, forêt et reboisement et les cultures assolées à sec, le type de couvert en place est nécessaire pour freiner l'érosion hydrique; en effet, l'abstraction de ce couvert donne des pertes de sols (potentiel érosif) jusqu'à trois fois plus grandes que celles avec ce même couvert.

D'autre part on a pu établir les statistiques pour les cartes de pertes de sols et du potentiel érosif; le résultat de ces statistiques est présenté au tableau III.

Comme on peut le constater un grand pourcentage du secteur d'étude présente une perte de sols inférieure à 10 t/ha/an; ceci ne veut surtout pas dire que ces secteurs sont bien aménagés car ce taux de pertes de sols vient soit du fait que la pente est faible soit du fait que la nature du sol intervient contre l'érosion.

Tableau II. Pertes de sols et potentiel érosif moyens pour chaque thème d'occupation des terres

Couverture au sol	Perte de sol moyenne (t/ha/an)	Potentiel érosif moyen (t/ha/an)
Cultures irriguées	6,21	22,18
Forêt et reboisement	7,45	19,10
Cultures assolées à sec (céréales, etc.)	10,29	25,73
Jachère	12,34	27,42
Sols nus	42,35	42,35

Tableau III. Statistiques des cartes de pertes de sols et du potentiel érosif

Valeur de classe V (t/ha/an)	Superficie dans le cas de perte de sol (ha et %)		Superficie dans le cas du potentiel érosif (ha et %)	
$0 \leq V < 10$	5303,30	38,36%	5303,30	38,36%
$10 \leq V < 20$	3570,66	25,82%	2224,40	16,08%
$20 \leq V < 30$	917,79	6,64%	440,55	3,19%
$30 \leq V < 40$	1739,05	12,57%	1027,33	7,43%
$40 \leq V < 50$	1741,85	12,60%	1988,28	14,38%
$50 \leq V \leq 60$	92,39	0,67%	364,79	2,64%
$V > 60$	461,03	3,34%	2477,42	17,92%

On remarque aussi que les pertes de sols importantes (plus que 20 t/ha/an) proviennent uniquement du tiers du secteur d'étude (34,94%); la carte des pertes de sols (fig. 11-5, voir cahier couleur) montre aussi que ces zones sont surtout localisées sur les berges des cours d'eau.

3.3. Quantité de sédiments transportés jusqu'au cours d'eau

La carte des quantités de sédiments acheminés jusqu'au cours d'eau est issue de la carte des pertes de sols à laquelle on a appliqué le coefficient DR. Ce coefficient, compris entre 0 et 1, est fonction surtout de la topographie; il aura des valeurs proches de 1 pour les zones à relief accidenté et des valeurs proches de 0 pour des zones relativement planes.

Ainsi, en comparant la carte des pertes de sols (fig. 11-5, voir cahier couleur) à celle de la quantité de sédiments transportés jusqu'au cours d'eau (fig. 11-7, voir cahier couleur), on observe qu'il existe des régions qui ont une grande perte de sols mais que seule une quantité plus faible de ces sédiments arrivera jusqu'au cours d'eau; ceci est dû au fait que le coefficient DR a une valeur proche de 0. Par conséquent, la nature du sol est très favorable à l'érosion mais ce sol se trouve dans une zone où le relief n'est pas suffisamment accidenté pour que tous les sédiments arrachés parviennent au bas de la pente.

Dans le cas des zones où la quantité de sédiments acheminés jusqu'au cours d'eau est aussi grande que celle perdue à l'origine, on peut seulement conclure que la topographie et la nature du sol sont favorables à l'arrachage des matériaux et leur «livraison» jusqu'au cours d'eau.

On observe aussi, qu'il existe toujours des secteurs, même s'ils représentent un faible pourcentage, qui produiront plus de 60 t/ha/an de sédiments qui vont se retrouver dans le réseau hydrographique. Ces zones sont facilement identifiables sur la carte de transportabilité des sédiments ce qui facilitera l'intervention sur le terrain à leur niveau pour lutter contre cette source de pollution.

4. Conclusions

L'utilisation des données de télédétection pour évaluer des informations sur de grands territoires est plus objective et efficace que la compilation des données de plusieurs efforts individuels. Les données de télédétection et les analyses sur ordinateur ne remplacent pas les levés sur le terrain précis et détaillés. Mais de telles données peuvent aider les scientifiques

et les décideurs à déterminer la portée d'un problème et concentrer les activités là où elles seront plus efficaces.

Cette étude multithématique est un exemple de l'utilisation des données de télédétection combinées à des données ponctuelles (météorologie) et cartographiques (topographie, pédologie); l'intégration des divers éléments étant effectuée à l'aide d'un SIG.

Cette étude a démontré aussi que la télédétection, de concert avec d'autres sources de données, peut procurer des renseignements remarquables et uniques pour la détermination de l'érosion du sol, et de la susceptibilité à l'érosion, à des échelles variant entre 1:50 000 et 1:200 000. En effet, la plus grande échelle avec laquelle on peut produire nos cartes est l'échelle 1:50 000 puisque nous avons utilisé des données TM (résolution 30 m x 30 m) et une carte topographique de base à l'échelle 1:50 000. Quant à la plus petite échelle elle est de 1:200 000 puisqu'avec des échelles plus petites il n'y aurait pas d'intérêt cartographique majeur pour des fins d'aménagement. Notons toutefois que l'échelle des cartes produites dans le présent article a été choisie dans l'unique but de réduire l'espace que ces dernières pourraient occuper avec des échelles plus grandes.

Pour ce qui est de l'imagerie TM, cette dernière s'est avérée appropriée et équivalente à d'autres sources classiques d'information, du moins à la même échelle, pour la cartographie de l'érosion par l'entremise de l'identification du couvert végétal et de l'utilisation des terres. D'autre part, un système d'information géographique, utilisé de concert avec l'équation universelle de pertes de sol permet la caractérisation des régions sujettes à l'érosion de même que certains problèmes de pollution reliés à ce phénomène.

5. Remerciements

Nous tenons à remercier l'Agence canadienne pour le développement international (ACDI) (bourse d'études supérieures de l'auteur) et le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada (subvention OGP0006043) pour avoir financé partiellement les travaux de recherche associés à cette étude.

Nous tenons également à remercier Paul-André Chassé et Jean Daoust pour leur aide lors du traitement des données.

6. Références

- ABDILLAH, M. 1985. Cartographie au 1:100 000 et caractérisation des sols dans les communes rurales de M'Garto et TlatLoulad (province de Settat). Mémoire de 3^e cycle en agronomie, I.A. V. Hassan II, Rabat, Maroc.
- BARET, F., GUYOT, G. et MAJOR, D. J. 1989. TSAVI : A vegetation index wich minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *International geoscience and remote sensing symposium*, vol. 3, p. 1355-1358.
- COOK, D. J., DICKERSON, W. T., RUDRA, R. P. et WALL, G. J. 1985. A microcomputer model for evaluation of conservation systems. *American society of agricultural engineers*, Paper no. 85-2044, St. Joseph, Michigan, 13 p.
- F.A.O. 1977. Érosion et aménagement des bassins versants dans les pays méditerranéens. *Terre, eaux et hommes*, vol. 9, n^o 30, p. 27-45.

- HESSION, W. C. and SHANHOLTZ, V. O. 1988. A geographic information system for targeting nonpoint-source agricultural pollution. *Journal of soil and water conservation*, p. 264 - 266.
- HEUSH, B. 1970. Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique. *Société des sciences naturelles et physiques, Maroc*, p. 41-54.
- OMAKUPT, M., IMPAT, P., KANCHANAKUL, N. and BUAPRADAPKUL, D. 1988. Soil erosion mapping in the Chiang Mai basin using remote sensing data and geographic information system. *Proceeding of the final seminar under the SIDA-Thailand Landsat project*, p. 12-14.
- WISCHMEIER, W. H. and SMITH, D. D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *American geophysical union transactions*, 39, p. 285-291.
- WISCHMEIER, W. H. and SMITH, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook no 537*, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 58 p.
- ZING, A. W. 1940. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agricultural engineers*, 21, p. 59-64.

12

Suivi par télédétection de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger)

SALIFOU KARIMOUNE*, JEAN ALEXANDRE** et ANDRÉ OZER***

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

***Laboratoire de géographie physique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, B-4000, Liège, Belgique; téléphone : (32) 41-66-52-67; télécopie : (32) 41-66-57-00*

****Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Université de Liège, 7, place du 20-Août, B-4000, Liège, Belgique; téléphone : (32) 41-66-54-46; télécopie : (32) 41-66-57-00*

Résumé

Dans le cadre d'une recherche partagée de l'AUPELF-UREF, une étude de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger) a été entreprise par les Universités de Liège et de Niamey. Les méthodes utilisées sont l'interprétation visuelle d'une composition colorée d'une sous-image HRV de SPOT couvrant une partie du secteur d'étude et la confrontation de photographies aériennes numérisées avec l'image satellitaire. Les mêmes traitements (seuillage interactif et classification) ont été appliqués à la sous-image et aux photographies aériennes. La comparaison d'images diachroniques (les photographies aériennes sont de 1957-1958 et de 1975 et l'image satellitaire de 1987) permet d'apprécier et d'estimer la réduction de la couverture végétale et les remaniements éoliens entre 1957-1958 et 1987. La végétation ligneuse, de plus en plus contractée, est circonscrite aux lits des oueds et aux dépressions où la nappe n'est pas très profonde, quoique les eaux de surface aient pratiquement disparu. Quant aux remaniements éoliens, ils affectent la quasi-totalité des sommets des dunes anciennes dépourvues de végétation et fragilisés par les cultures. Une campagne de vérité-terrain a permis de valider la plupart des interprétations.

1. Introduction

Dans le cadre d'une recherche partagée de l'AUPELF-UREF sur le thème «Télédétection et désertification», une étude consacrée à la dégradation des milieux de la région de Zinder a été entreprise par les Universités de Niamey et de Liège. Cette étude tente de repérer par télédétection des indices de désertification afin d'en suivre l'évolution dans le temps. Les travaux comportent trois étapes.

La première étape a consisté en l'interprétation de photographies aériennes réalisées par l'Institut géographique national (IGN) de Paris (France) en 1975 (vol NIG 40/600 de mars-avril 1975 à l'échelle du 1:60 000). Elle a abouti à l'élaboration d'une carte morphologique. Cette recherche a fait l'objet d'une affiche aux deuxièmes journées scientifiques du réseau de télédétection de l'UREF à Thiès (Sénégal) ainsi que d'une publication (KARIMOUNE *et al.*, 1990).

La deuxième étape a été la confrontation des photographies de 1975 avec celles de 1957-1958 (ces dernières réalisées également par l'IGN au cours des missions AOF ND 32 X et ND 32 XVI à l'échelle du 1:50 000). Elle a permis de détecter un certain nombre d'indices de désertification : réduction de la couverture végétale, changement d'état de surface des sables dunaires de certains secteurs, érosion éolienne par déflation, etc. Au cours de cette deuxième phase, l'acquisition d'une image satellitaire HRV de SPOT prise le 22 novembre 1987 nous permet d'avoir une autre vue du secteur d'étude. La comparaison des situations de 1957-1958, 1975 et 1987 souligne l'amplification des indices détectés, en particulier la déflation et la remobilisation des sables dunaires. Les principaux résultats de cette recherche ont été communiqués lors des troisièmes journées scientifiques de l'UREF à Toulouse.

Au cours de la troisième étape, des photos aériennes ont été numérisées et soumises à des traitements permettant, par comparaison de situations diachroniques, une meilleure visualisation de l'évolution des processus de désertification. En outre, une campagne de vérité-terrain a été effectuée qui confirme la plupart des interprétations.

Le but de cette communication est de présenter les résultats de la dernière étape, à savoir les traitements numériques des photos aériennes et la campagne de vérité-terrain.

2. Le cadre géographique

L'étude s'intéresse à la région située à l'est de Zinder (Niger méridional) qui est comprise entre 13°20' et 14°30' de latitude nord, 9° et 10°10' de longitude est (fig. 1). Cette région est caractérisée par une pluviométrie annuelle variant du sud au nord, entre 575 mm (Magaria, moyenne 1938-1987) et 260 mm (Tanout, moyenne 1936-1987). Elle s'étend à la fois sur la zone soudano-sahélienne et la zone sahélienne *stricto sensu*. La zone sahélienne est celle qui reçoit entre 150 et 400 mm de précipitations annuelles et la zone soudano-sahélienne, celle dont la pluviométrie annuelle est comprise entre 400 et 600 mm (AUBREVILLE, 1949; LE HOUEROU, 1979). Selon la classification d'AUBREVILLE (1949), ces zones sont caractérisées, en fonction de la pluviométrie, par une végétation de savane et de steppe arborées à arbustives. Nous avons pu observer, sur le terrain, que la composition floristique varie de façon très sensible lorsqu'on va du sud vers le nord. On passe de formations riches en *Accacia albida* (localement appelé gao) avec, dans les dépressions, *Adansonia digitata* (baobabs) et *Hyphaene thebaïca* (palmiers doum), à des formations où dominent les arbustes épineux (*Accacia seyal*, *Accacia radiana*, *Balanites aegyptiaca*, etc.), et des espèces xérophytes comme *Boscia senegalensis*.

Les traits morphologiques marquants de la région sont des reliefs de quartzite de quelques dizaines de mètres d'altitude relative qui forment des barres plus ou moins allongées

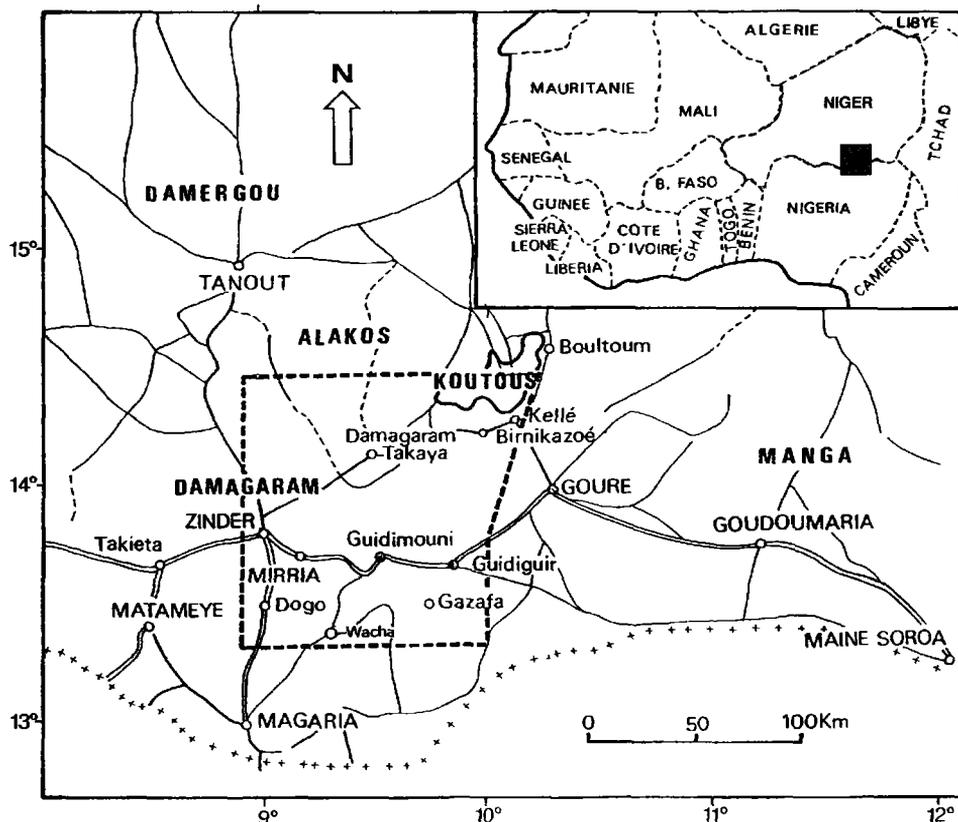


Figure 1. Localisation du secteur d'étude

présentant quelquefois des virgations (GREIGERT et POGNET, 1967) et, surtout, un modelé dunaire hérité des phases arides du Quaternaire (KARIMOUNE *et al.*, 1990 et 1993).

Depuis une vingtaine d'années, les totaux pluviaux annuels ont fortement diminué, engendrant un net décalage des isohyètes vers le sud (fig. 2). Subséquemment, la couverture végétale déjà fort affectée par la pression humaine, s'est nettement dégradée et la protection des sols s'en est trouvée amoindrie. En outre, les vents efficaces sont devenus plus fréquents (KARIMOUNE *et al.*, 1993). Cette évolution a pour conséquence la remise en mouvement des sables des dunes anciennes et l'érosion éolienne des sols par exportation des sédiments fins. Ce sont là des indices de désertification repérables par télédétection. Leur localisation et le suivi de leur évolution permettent de cerner les secteurs les plus sensibles afin de mieux cibler les zones où des actions de protection et de conservation de l'environnement doivent être envisagées.

3. Méthodologie

Dans les premières étapes de notre travail de recherche, nous avons utilisé quelques techniques simples pour mettre en évidence les indices de désertification : l'interprétation de

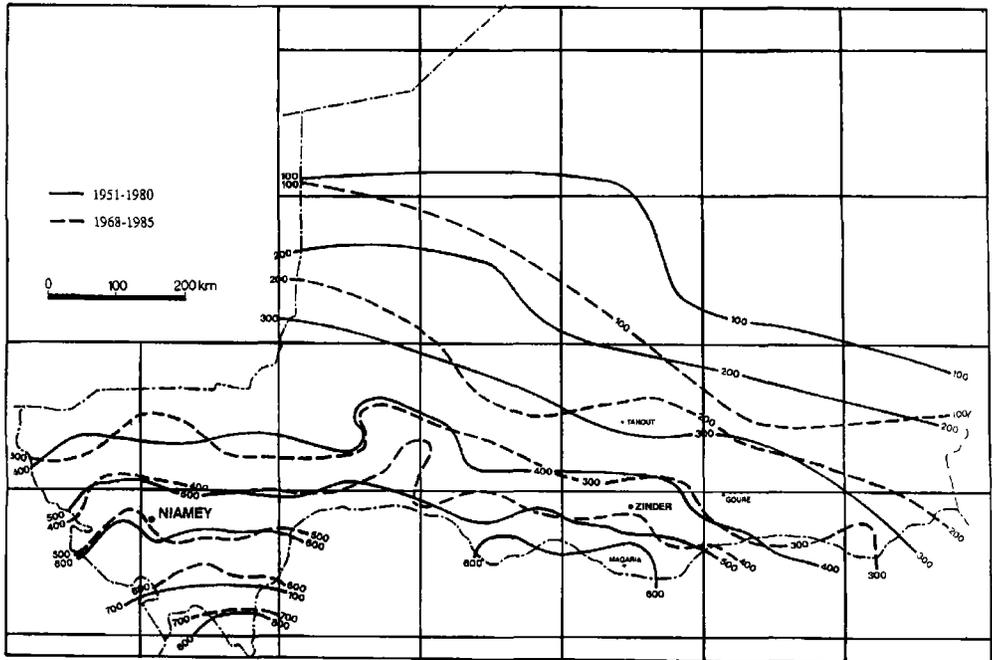


Figure 2. Décalage des isohyètes suite à la réduction de la pluviométrie depuis la fin des années soixante (synthèse d'après MAMADOU, 1989)

couples stéréoscopiques pour les photographies aériennes, l'interprétation analogique de certains traitements numériques (composition colorée, filtrages directionnels, seuillages interactifs) pour l'imagerie satellitaire HRV.

Dans la présente étape, une interprétation visuelle d'une composition colorée de la zone d'intérêt a d'abord été effectuée. Puis une confrontation de l'image satellitaire avec les photographies aériennes de 1957-1958 et de 1975 a été réalisée. Pour ce faire des photographies aériennes ont été numérisées séparément. Ce procédé consiste à les transformer, par balayage, en images numériques à 256 niveaux de gris. Ainsi, on peut les soumettre à un certain nombre de traitements qui ont déjà été appliqués à l'image satellitaire, en particulier au seuillage interactif. La mise en évidence de la couverture végétale peut être obtenue par binarisation des photographies numérisées (DEFURNY, 1990) ou par un seuillage visant à extraire de l'image une classe végétation (fig. 3). Ensuite les photographies aériennes de 1957-1958 et de 1975 couvrant les mêmes territoires ont été comparées deux à deux. Afin de les rendre superposables, les images acquises aux trois dates (photographies aériennes et imagerie satellitaire) ont été géoréférencées et rectifiées. Des points communs choisis sur une carte au 1:50 000 et sur les trois images ont été utilisés pour l'application d'une rectification linéaire. La taille des pixels des photographies aériennes a été dégradée et ramenée à 20 m de façon à correspondre à celle des pixels de l'image satellitaire. Une classification supervisée ayant pour objectif la mise en évidence de la couverture végétale et des sables remaniés est ensuite appliquée à la partie commune aux trois images. On peut alors suivre l'évolution des deux principaux indices de désertification par comparaison des situations de 1957-1958, 1975 et 1987.

Le deuxième aspect du travail de cette étape est la campagne de vérité-terrain effectuée pour vérifier la validité des interprétations des images.

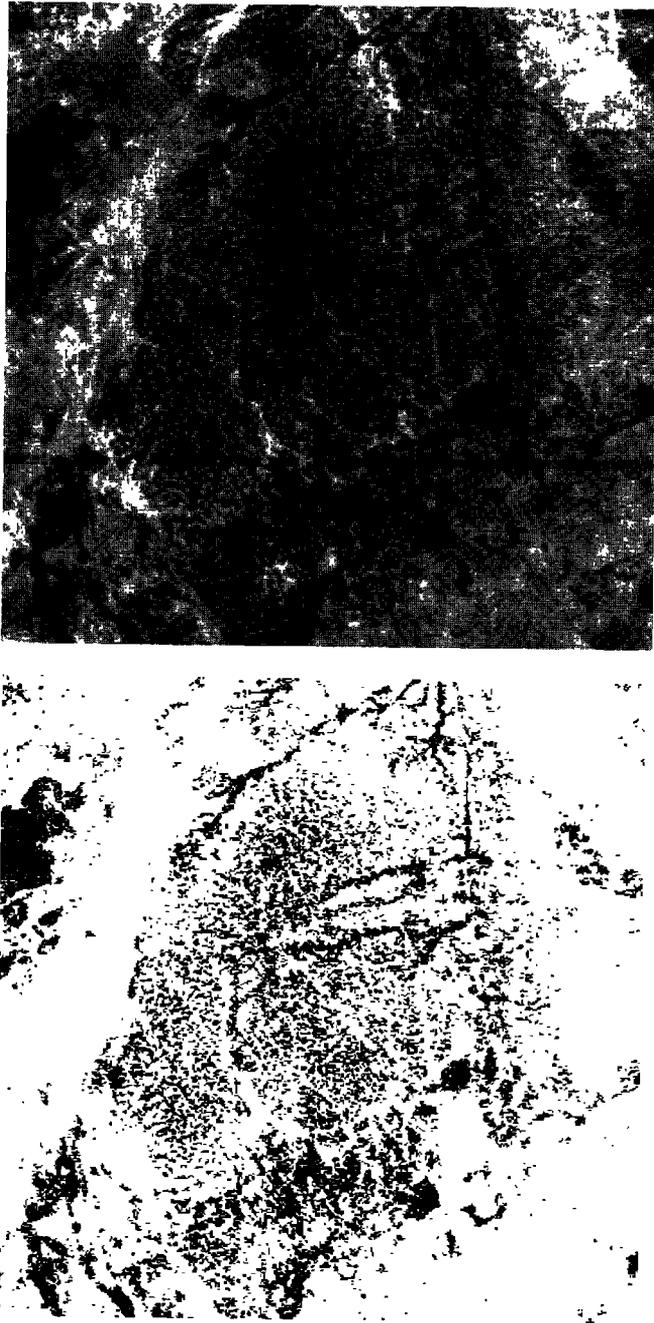


Figure 3. a) amélioration de contraste sur une photographie aérienne de 1958 numérisée (secteur de Makaoratchi); b) mise en évidence de la végétation; à noter que les reliefs quartzitiques localisés à l'ouest de la photographie apparaissent dans la même classe de gris que la végétation

4. Résultats

Sur une composition colorée de l'image satellitaire HRV on peut facilement discerner les grands traits de la morphologie (reliefs de quartzite, dépressions et dunes anciennes) ainsi que les remaniements éoliens actuels (sables remobilisés et secteurs de déflation) (fig. 12-4, voir cahier couleur). Mais c'est la confrontation de la situation de 1987 avec celles de 1975 et 1957-1958 qui permet d'apprécier les changements intervenus en une trentaine d'années. Cependant, sur les seuillages, les reliefs de quartzite et divers affleurements rocheux se situent dans la même gamme de gris que la végétation (fig. 3b). Les reliefs les plus importants se situent à la périphérie du secteur considéré. Aussi peut-on les éliminer en utilisant un masque. De cette manière, on peut avoir une meilleure estimation de la densité de la couverture végétale. La comparaison des photographies de 1957-1958 et celles de 1975 souligne la grave dégradation de la couverture végétale entre les deux prises de vue (fig. 12-5 a et b, voir cahier couleur). La confrontation des photographies aériennes avec l'image satellitaire n'est pas assez aisée pour donner une idée de l'évolution du couvert végétal entre 1975 et 1987. Des confusions existent également entre dépressions et végétation d'une part et affleurements de grenaille et de cuirasse latéritiques, d'autre part. Ces affleurements négligeables en 1957-1958 et même en 1975 prennent des proportions importantes en 1987 suite à la déflation de plus en plus efficace qui sévit sous le vent des reliefs résiduels et déblaie les sédiments de couverture. C'est la présence de ces affleurements qui explique l'expansion de la classe «dépressions et végétation» dans la partie centre-nord de l'image satellitaire (fig. 12-5 c, voir cahier couleur). Des tentatives de classification plus fine n'ont pas donné de meilleurs résultats. Si donc la comparaison entre les trois images reste fiable pour les sables remaniés, elle devient plus aléatoire en ce qui concerne la végétation. Pour cet élément du paysage, ne peut être prise en compte que la confrontation entre les photographies aériennes de 1957-1958 et celles de 1975. Bien que les classes ne se recouvrent pas tout à fait, nous en avons tiré les statistiques données au tableau I, le but poursuivi étant la mise en évidence de l'amplification de la remobilisation des sables, indicatrice à la fois de la réduction de la couverture végétale et de l'accentuation de l'efficacité des vents, les deux allant de pair.

Sur la photographie de 1957-1958, la végétation est relativement dense. Le remaniement des sables dunaires n'est que très ponctuel.

En 1975, la végétation se limite à quelques lits d'oued et une grande partie du secteur a été dégagée de ses sédiments fins superficiels, balayés par la déflation. Une partie des sédiments fins exportés s'est déposée contre l'obstacle que constitue le relief de quartzite situé à l'ouest de la zone de déflation. En outre, deux anciennes dunes longitudinales, auparavant peu affectées par les remaniements éoliens ont une réflectance plus forte qui témoigne de la remise en mouvement des sables. Par contre, la grande dune longitudinale qui borde le NO du secteur n'est que faiblement affectée par les remaniements éoliens.

En 1987, le secteur balayé par la déflation s'est élargi, les zones à forte réflectance se sont étendues, en particulier au sommet des dunes longitudinales et autour des villages où on note

Tableau I. Évolution de quelques éléments du paysage dans le secteur de Makaoratchi entre 1957-1958 et 1987

	1957-1958	1975	1987
Dépressions et végétation	36%	14%	8%
Sables remaniés	6%	16%	23%
Delta	0,2%	0,24%	0,56%

des auréoles de plus forte luminance suite au piétinement excessif et aux pâturages (fig. 12-4 et 12-5 c, voir cahier couleur).

Le remaniement des sables affecte souvent les champs où les paysans ont enlevé la végétation arbustive et les souches de mil de la saison précédente et ont nettoyé l'herbe sèche, lesquelles constituent les principaux obstacles au transit éolien. La pratique de la jachère a permis à la végétation arbustive et herbacée de se reconstituer assez rapidement sous les conditions climatiques favorables des années antérieures à 1968 et donc de freiner, voire d'annihiler au fil des ans, la remobilisation des sables dans les champs. Ainsi peut s'expliquer la disparition des sables remaniés de la partie supérieure de la photographie aérienne de 1958. Cependant, comme mentionné plus haut (analyse de la situation de 1975), nous pensons plutôt que les vents, de plus en plus efficaces, suite à la réduction de la couverture végétale, ont exporté les sables vers les secteurs situés au sud-ouest. En effet, la comparaison des situations de 1957-1958, de 1975 et de 1987 (fig. 12-5 a, b et c, voir cahier couleur) permet de suivre le déplacement des sables remaniés qui sont nettement plus répandus dans la partie sud-ouest de l'image de 1987 par rapport aux vues antérieures.

L'extension plus importante des dépressions dans la partie sud-est de l'image de 1987 est sans doute liée au développement assez spectaculaire, autour des zones marécageuses, des cultures de contre-saison depuis le début des années 80. L'accroissement des superficies des zones humides peut également s'expliquer par l'intensification du ruissellement qui, même pour des précipitations relativement faibles, apporte dans les dépressions des quantités appréciables d'eau. Cette intensification de l'écoulement au détriment de l'infiltration est liée d'une part à la réduction de la couverture végétale et d'autre part à des affleurements de plus en plus étendus, suite à la déflation, d'horizons imperméables. Elle engendre d'ailleurs une érosion de plus en plus sévère des sols attestée par l'augmentation considérable du volume des deltas, notamment entre 1975 et 1987 (fig. 12-5 a, b et c, voir cahier couleur, et tab. I).

Les résultats de ces interprétations ont été par la suite vérifiés lors d'une première campagne de vérité-terrain menée en janvier 1991.

5. L'apport de la campagne de vérité-terrain

Les travaux de terrain sont indispensables pour confirmer, nuancer ou corriger les interprétations de télédétection. Ils doivent, dans certains cas, se doubler d'enquêtes auprès des populations.

Ainsi, pour avoir des informations sur l'évolution de la couverture végétale et des plans d'eau, avons-nous interrogé des paysans rencontrés dans notre secteur d'étude. Tous les témoignages concordent pour dire que la végétation était très dense avant la sécheresse de 1968-1973. «Une véritable forêt» couvrait, notamment, le secteur de Makaoratchi. Les dépressions étaient de grandes mares permanentes, voire des lacs. Depuis une vingtaine d'années, la «forêt» a pratiquement disparu, les lacs se sont asséchés, les oueds à écoulement saisonnier ont cessé de fonctionner. Aujourd'hui, des puits sont creusés dans les lits des oueds pour l'alimentation en eau, et, au fond de certains lacs, l'argile est exploitée pour la fabrication des briques servant à la construction des habitations. Les secteurs où la végétation a fortement diminué sont soumis à d'intenses processus de déflation. Cette vigueur de l'activité éolienne est attestée par l'anémomorphisme des arbustes (fig. 12-6, voir cahier couleur).

La déflation amène l'affleurement d'étendues de cuirasse et d'épandages de grenailles latéritiques qui constituent de véritables regs (fig. 12-7, voir cahier couleur). Ces éléments du paysage correspondent aux teintes sombres, gris foncé sur la composition colorée de l'image satellitaire (fig. 12-4, voir cahier couleur). L'un des linéaments détectés sur les images est un

ancien cours d'eau dont le lit, constitué par de la grenaille latéritique indurée, est aujourd'hui en inversion de relief. Il mesure au moins 60 m de large sur quelques kilomètres de longueur.

La déflation exhume en outre un glaçage ancien qui bloque l'infiltration des eaux de pluie et favorise l'écoulement superficiel, en nappe. La puissance des processus éoliens est telle qu'il ne subsiste de sédiments fins, dans les secteurs de déflation, qu'autour des arbustes qui constituent ainsi des îlots surélevés par rapport aux surfaces environnantes couvertes de grenailles. Un micromodèle éolien existe aussi dans les champs où les limites, en relief, sont soulignées par des accumulations ou des reliques de sédiments fins, alors que les parties cultivables sont en creux.

Nous avons pu constater également que les sommets des dunes sont effectivement soumis aux remaniements éoliens, surtout lorsque les paysans ont préparé leurs champs de façon précoce. Ces remaniements n'intéressent en général que les couches superficielles des sables dunaires. Mais cela donne lieu néanmoins à une suralimentation des zones frontales des dunes et à l'ensablement des cuvettes ou des routes lorsque celles-ci passent au pied des édifices dunaires (fig. 12-8, voir cahier couleur). Les remaniements peuvent aussi avoir des caractères beaucoup plus importants et provoquer le creusement de caoudeyres de plusieurs dizaines de mètres de diamètre ou la formation de dunes d'obstacles (fig. 12-9, voir cahier couleur) lorsqu'un écran de végétation s'oppose au transit éolien. Les alluvions sableuses des oueds sont aussi remobilisées par le vent qui peut les modeler en petites dunes. Il faut noter qu'elles sont issues de sables dunaires repris par les oueds pendant la saison des pluies. C'est pour cette raison que les sables dunaires remaniés et les alluvions des oueds ont la même réflectance sur les images traitées.

6. Conclusion

Comme nous l'avons souligné dans les communications précédentes (KARIMOUNE *et al.*, 1990, KARIMOUNE *et al.*, 1993), la dégradation des milieux est très sensible dans la région de Zinder. Les secteurs les plus affectés sont ceux situés dans la partie septentrionale ou zone sahélienne. Dans la partie méridionale ou zone soudano-sahélienne, de grandes surfaces situées sous le vent des reliefs de quartzite et autres massifs rocheux sont dénudées parce que leur végétation a fortement diminué, remplacée par des arbustes xérophiles. Cette réduction de la couverture végétale est elle-même liée à la diminution de la pluviosité et à l'action anthropique. En effet, la préparation précoce des champs, la coupe du bois pour divers besoins ménagers et l'augmentation du cheptel jouent un rôle important dans la fragilisation des sols et des paysages. Les actions visant à restaurer les milieux devront en tenir compte.

Pour mieux caractériser les sables mobiles, nous avons commencé à faire en laboratoire, des mesures radiométriques sur des échantillons prélevés lors de la campagne de terrain. Puis, dans une étape prochaine, nous comptons faire des mesures *in situ* avec un spectro-radiomètre à haute résolution dont les bandes seront étalonnées sur celles de TM. L'analyse d'une image TM en voie d'acquisition et ces mesures devraient nous permettre de mieux cerner l'évolution de la désertification dans la région de Zinder.

7. Remerciements

Nous nous devons de remercier l'AUPELF-UREF qui nous a accordé les subsides nécessaires pour mener à bien nos recherches, ainsi que le laboratoire de télédétection de la Faculté des

sciences agronomiques de Gembloux (service de S. Dautrebande) et celui de l'Université de Liège-SURFACES (J.-P. Donnay) pour leur aide précieuse dans la numérisation des photographies aériennes et le traitement des images, M. B. Mahamane Sany, doyen de la Faculté de pédagogie de l'Université de Niamey, pour le soutien logistique lors de la campagne de vérité-terrain.

8. Références

- AUBREVILLE, A. 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'éditions géographiques et coloniales, Paris, 351 p.
- DEFOURNY, P. 1990. Méthode d'évaluation quantitative de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir de données Landsat TM (Burkina Faso). *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.M (éd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Journées scientifiques de Thiès, 21-24 novembre 1989, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 63-74.
- GREIGERT, J. et POUGNET, R. 1967. Notice explicative sur la carte géologique de la République du Niger au 1:2 000 000, Édition du Bureau de recherches géologiques et minières, Paris, 62 p.
- KARIMOUNE, S., OZER, A. et ERPICUM, M. 1990. Les modelés éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphologie, note préliminaire. *in* Lafrance, P. et Dubois, J.-M. M. (éd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Journées scientifiques de Thiès, 21-24 novembre 1989, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 145-161.
- KARIMOUNE, S., DONNAY, J.-P. et OZER, A. 1993. Désertification dans le sud nigérien. Interprétation d'une image SPOT. *in* Dubois, J.-M. M. et Blasco, F. Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Éditions AUPELF-UREF et les Presses de l'Université du Québec, p. 77-106.
- LE HOUEROU, H. N. 1979. Écologie et désertification en Afrique. Travaux de l'Institut de géographie de Reims, n° 39-40, p. 5-26.
- MAMADOU, D. 1989. Les dates favorables des semis au Niger : exemple de la culture du mil. Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement : agrométéorologie. Fondation universitaire luxembourgeoise, Arlon, 34 p et annexes.

13

Téledétection appliquée à la zone côtière et suivi de l'environnement côtier au Congo : cas de l'érosion dans les gorges de Diosso

JEAN TCHICAYA* et LÉONARD SITOU**

**Laboratoire de photogrammétrie et de télédétection, Centre de recherche géographique et de production cartographique (CERGEC), B.P. 125, Brazzaville, République du Congo; téléphone : (212) 81-07-80*

***Laboratoire de géographie physique, Département de géographie, Faculté des lettres et sciences humaines, Université Marien Ngouabi, B.P. 2642, Brazzaville, République du Congo; téléphone : (212) 82-52-67*

Résumé

Cette étude montre l'intérêt de l'utilisation des données iconographiques dans les études des phénomènes morphodynamiques et les préoccupations environnementales. L'objectif principal de notre étude est de suivre le phénomène érosif dans l'espace et le temps au niveau du cirque de Diosso d'une part et d'autre part de retracer la dynamique spatiotemporelle du cirque, ceci à partir des données iconographiques, complétées par des observations de terrain. L'analyse de ces données et les travaux de terrain nous ont permis de reconstituer les évolutions qualitative et quantitative du cirque de Diosso, y compris sa zone côtière, entre 1890 et 1983. Les mesures ont porté concrètement sur l'évolution spatiotemporelle du cirque, le recul de la paroi bordière du cirque et du trait de côte à l'exutoire du cirque, l'amenuisement des arêtes et des pics à l'intérieur du cirque, l'évolution de la végétation, et le recul de la paroi du cirque qui devient menaçant pour la route nationale n° 5 et les habitations. Les résultats obtenus permettent de conclure que les données iconographiques sont des outils efficaces pour l'étude des phénomènes morphodynamiques.

1. Introduction

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur les applications de la télédétection aéroportée et spatiale en zone côtière congolaise.

L'objectif de la recherche est d'évaluer concrètement les possibilités des outils de télédétection dans l'analyse et le suivi de la dynamique du milieu naturel en général et particulièrement des phénomènes d'érosion.

L'étude a porté sur le cirque de Diosso, une des multiples excavations creusées par l'érosion dans la région côtière du Congo. Les cirques d'érosion et le recul du trait de côte où débouchent la plupart de ces amphithéâtres, sont une menace sérieuse pour les habitations et les routes dans la région, notamment la route nationale n° 5. Notre travail a consisté à quantifier cette érosion régressive afin de fournir aux autorités des données pouvant orienter leur action dans le cadre d'un réaménagement du réseau routier. Les données iconographiques ont été les outils de travail. Elles ont été complétées par les observations de terrain.

2. Localisation et description du site

Le cirque de Diosso se trouve à environ 30 km au nord de la ville de Pointe-Noire, dans un secteur où s'est développée, dans les formations sédimentaires du bassin côtier, une multitude de cirques de toute taille (fig. 1). Le cirque de Diosso est le plus spectaculaire et le plus actif (fig. 13-2, voir cahier couleur). Il s'ouvre dans la baie de Loango, par une petite bande littorale dont le trait de côte est affecté par l'érosion côtière. Ce cirque en forme d'amphithéâtre mesure environ 2,5 km de diamètre. La paroi de son enceinte très polylobée et escarpée mesure 80 m de profondeur moyenne. Les différents lobes sont séparés par des arêtes au sommet étroit et découpé qui plongent à l'intérieur. Ce cirque a été choisi pour plusieurs raisons : il s'agit en premier lieu de l'un de ceux qui menacent le plus la route nationale n° 5 qui traverse la région; en second lieu, il est facile d'accès et il figure sur de nombreuses cartes et jeux de photographies aériennes. Les résultats de ce travail serviront de base à un autre travail destiné à cerner l'âge de ce cirque, les conditions de son déclenchement, et les moyens d'endiguement du phénomène.

3. Matériel et méthode

3.1. Choix des documents

Pour effectuer ce travail nous avons exploité deux types de documents : les cartes topographiques et les photographies aériennes. Nous avons travaillé sur des cartes anciennes de la période qui n'est pas couverte par les photographies aériennes. Celles-ci ont été choisies en tenant compte de deux critères (UPOLI, 1987 et 1988) à savoir :

- une échelle supérieure ou égale à 1:100 000;
- une carte dont l'interprétation doit nécessairement montrer des changements vis-à-vis d'une édition ancienne.

Pour les photographies aériennes, seules celles ayant une échelle supérieure ou égale à 1:50 000 ont été retenues et nous avons tenu compte de l'amplitude du temps (résolution

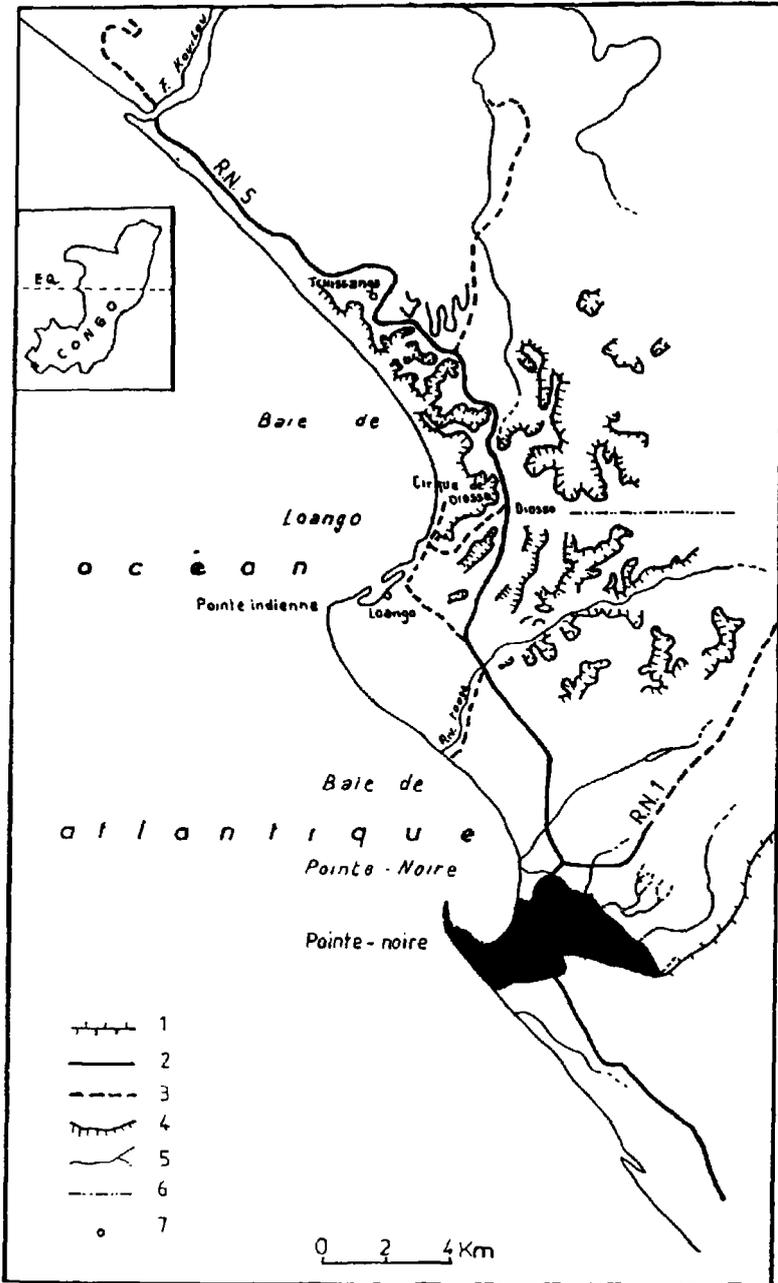


Figure 1. Carte de localisation; 1 : voie ferrée; 2 : route bitumée; 3 : route en terre; 4 : talus ou parois des cirques; 5 : cours d'eau; 6 : ligne de crête; 7 : village

temporelle) entre les différentes missions de photographies aériennes, pour une meilleure visualisation des changements.

C'est ainsi que les documents suivants ont été exploités :

- la carte du Congo-Français au 1:80 000 de 1890 feuille n° 21;
- la carte de prospection pétrolière de la région du Kouilou au 1:100 000 de 1931;
- la mission de prises de vue aérienne SB-32-bis au 1:50 000 de 1951;
- la mission de prises de vue aérienne SB-33-1bis au 1:50 000 de 1960;
- la mission de prises de vue aérienne 66 AE 331 / 125 au 1:12 500 de 1966;
- la mission de prises de vue aérienne 81 Cong 24 / 300 au 1:30 000 de 1981;
- la mission de prises de vue aérienne 83 Cong au 1:8 500 de 1983.

Toutes ces missions sont en noir et blanc.

3.2. Exploitation et analyse des données

En dehors des observations de terrain, l'étude est fondée sur la comparaison des données iconographiques (cartes et photographies aériennes). Les étapes de l'exploitation sont les suivantes :

- l'interprétation directe des cartes;
- la photo-interprétation classique pour une vue générale du cirque;
- la restitution photogrammétrique pour quantifier les évolutions. Celle-ci a été faite à l'échelle des photos à l'aide d'un appareil de restitution (un stéréotopographe Poivillier SOM type D3), ce qui nous a permis d'exploiter chaque couple de clichés en le replaçant dans une position identique à celle occupée au moment de la prise de vue. La démarche utilisée est la méthode classique de restitution qui passe par les différentes phases de l'orientation :
 - l'orientation interne : elle permet de reconstituer pour chaque cliché sa gerbe perspective, cela correspond à repositionner le sommet perspectif par rapport au cliché comme sur la chambre de prise de vue;
 - l'orientation relative : c'est la formation du modèle stéréoscopique ou modèle spatial. Elle consiste à orienter l'une par rapport à l'autre les deux gerbes reconstituées lors de l'orientation interne, de manière que tout rayon de l'une coupe le rayon homologue de l'autre;
 - l'orientation absolue : elle consiste à mettre le modèle spatial à l'échelle et de l'orienter dans l'espace-terrain à l'aide de quatre points identifiables sur les clichés et connus en coordonnées terrain. Cette opération a pour but de déterminer et de corriger les dénivelées relatives entre les coordonnées modèles (machine) et les coordonnées terrain sur les quatre points (points de calage ou points d'appui);
 - et enfin les réductions et agrandissements au pantographe (avec une précision de 1/10 mm) pour ramener toutes les données à une même échelle, afin de les rendre facilement comparables en les superposant. Pour éviter les déformations, on a sélectionné des points de calage connus en X et Y repérables sur toutes les données, encadrant le cirque et sa zone côtière à l'extérieur.

Pour suivre les changements morphologiques au niveau du cirque, il nous a fallu comparer toutes les données entre elles. L'analyse et le suivi de ces évolutions ont porté sur deux aspects : l'aspect qualitatif et l'aspect quantitatif. Pour cela, deux cartes définissant la forme du cirque et sa zone côtière ont été retenues comme base du travail. Il s'agit de la carte de 1890 pour la morphologie générale du cirque et de celle de 1951 pour la réalisation des cartes d'évolutions et la quantification de ces évolutions.

Le travail de laboratoire a été complété par les campagnes de terrain qui ont permis de comprendre les mécanismes et les processus de l'érosion dans le cirque de Diosso et au niveau du trait de côte.

4. Les résultats

4.1. Les résultats qualitatifs

L'analyse du schéma d'ensemble sur la configuration du cirque montre d'importants changements entre 1890 et 1931 (fig. 3). Les modifications sensibles sont à relever au niveau de la paroi bordière.

En 1890, le cirque de Diosso est en effet caractérisé par un seul grand lobe.

En 1931, 41 ans après, plusieurs petits lobes naissent, donnant une allure festonnée au contour général du cirque.

L'interprétation des jeux de photographies aériennes montre que la morphologie générale du cirque n'a pas subi d'évolution notable entre 1951 et 1983. Les lobes observés en 1951 sont presque ceux de 1983, donnant toujours au contour du cirque une allure très festonnée. Durant cette période, ces lobes ont été seulement agrandis. Le développement de ces lobes et l'irrégularité du contour général du cirque peuvent être observés sur les schémas géomorphologiques issus de la restitution photogrammétrique des différentes missions de photographies aériennes (fig. 4).

Les résultats qualitatifs sont aussi obtenus par les observations de terrain. De ces investigations, il ressort que le cirque de Diosso est le résultat d'une coalescence de plusieurs cirques élémentaires. L'origine de ces petits cirques est à la fois fluviale et pluviale (VENNETIER, 1968). Les mécanismes de la dynamique actuelle sont les mouvements de masse sous forme d'affaissement brusque ou de glissement lent, ceux-ci s'observent aussi bien le long de la paroi bordière qu'au niveau des flancs des arêtes centrales (SITOU et TCHICAYA, 1991). Le cirque de Diosso est drainé, en effet, par un réseau de petits ruisseaux nés à la base de la paroi et dont le plus important est le ruisseau de Matombi qui mesure environ 2,5 km de long avec une profondeur qui atteint rarement 1 m. Les rivières creusent le pied de la paroi et créent des encoches qui sont à l'origine des effondrements. Les affaissements sont accélérés par l'imbibition, les eaux de pluie et du matériel en porte à faux (fig. 13-5, voir cahier couleur). Ils sont annoncés par des fentes de détente qu'on observe sur le plateau au bord de la lèvres du cirque. La prise en charge et l'évacuation des matériaux écroulés sont assurées par les eaux de ruissellement et des écoulements concentrés dans les thalwegs.

L'érosion régressive fait ainsi évoluer le cirque en faisant reculer la paroi bordière et en amenuisant les arêtes centrales et les pics (fig. 13-6, voir cahier couleur).

4.2. Les résultats quantitatifs

Les cartes de 1890 et 1931, trop schématiques, ont empêché de suivre l'évolution quantitative du cirque avant 1951. La superposition des croquis de l'interprétation de ces deux cartes a révélé en effet plusieurs contradictions parmi lesquelles un net décalage entre les deux documents (fig. 7). Ce qui nous a conduit à abandonner la comparaison des données issues des photographies aériennes avec ces cartes. La quantification de l'érosion régressive tant au niveau de la paroi bordière que celui du trait de côte n'a été obtenue que par la superposition des croquis d'interprétation des photographies aériennes.

4.2.1. Le recul de la paroi

Entre 1951 et 1983, l'évolution des parois du cirque a été importante. Elle varie entre 2,5 et 90 m selon les endroits, soit une vitesse moyenne de 0,2 m/an sur les zones peu érodées et une vitesse moyenne de 2,5 m/an sur les zones plus érodées (fig. 8).

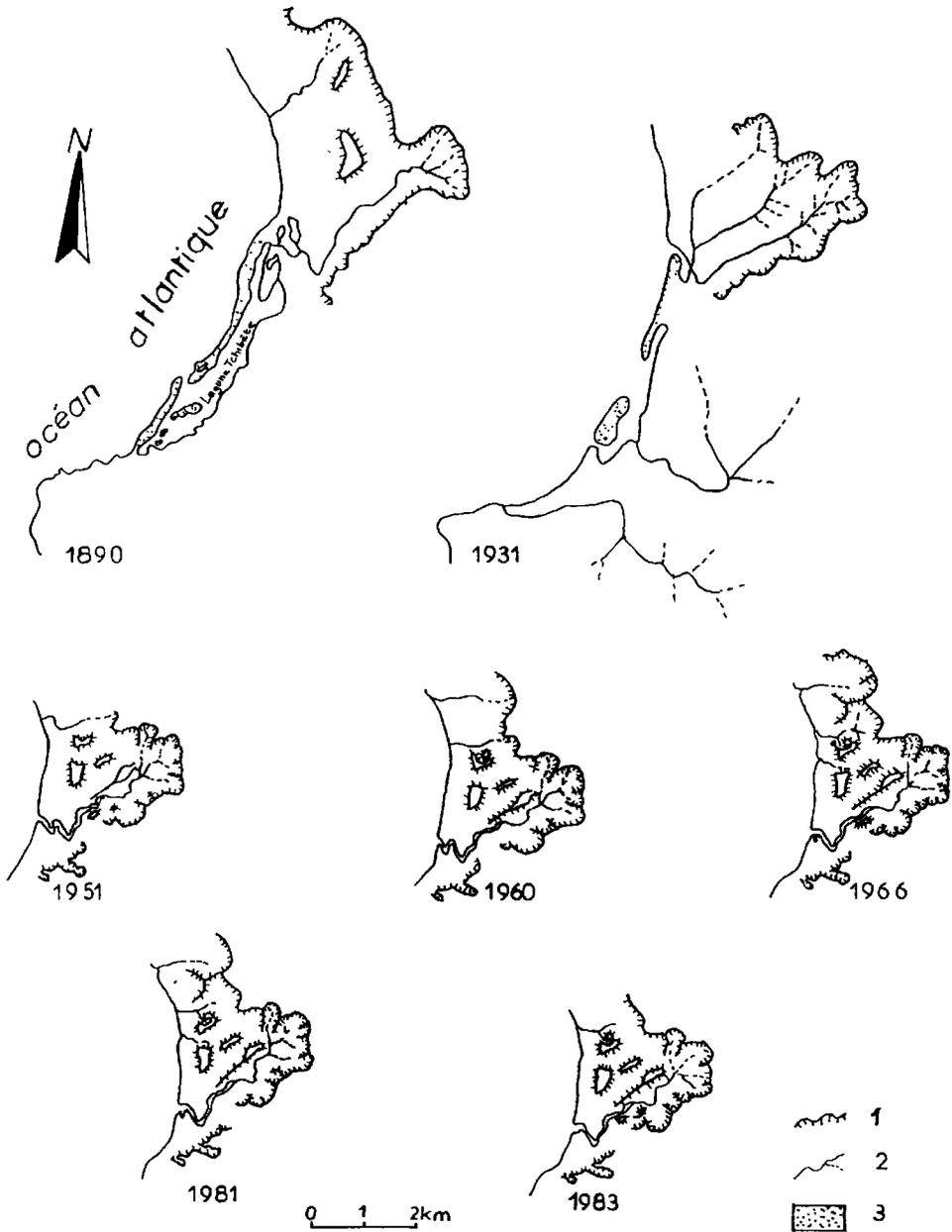


Figure 3. Morphologie générale du cirque de Diosso; 1 : talus; 2 : cours d'eau; 3 : banc de sable

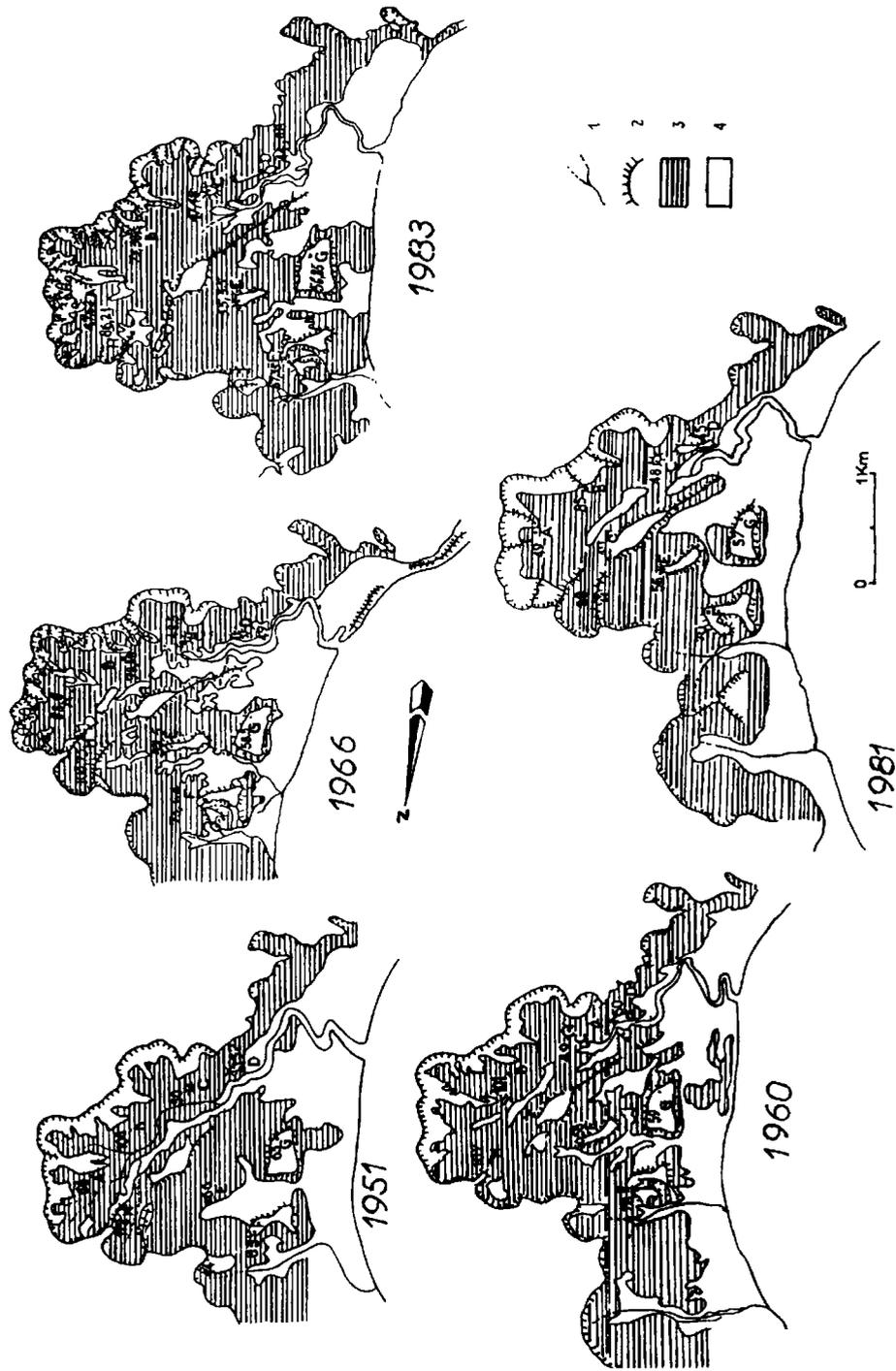


Figure 4. Limites de la forêt dans le cirque de Dioosso en 1951, 1960, 1966, 1981 et 1983; 1 : cours d'eau; 2 : talus; 3 : zone de forêt; 4 : sol nu

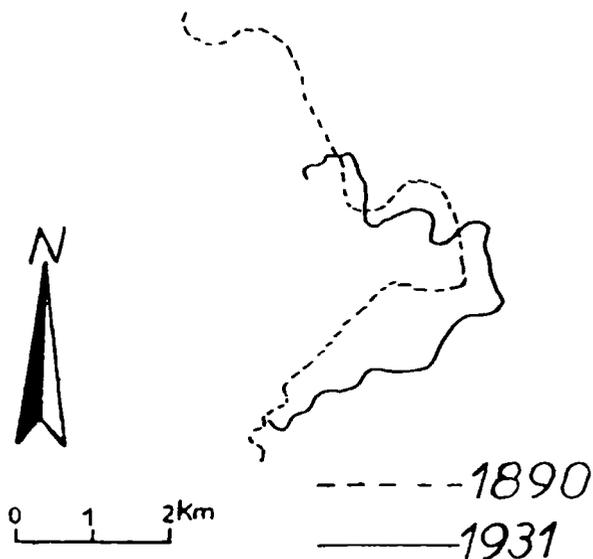


Figure 7. Évolution de la paroi bordière du cirque de Diosso entre 1890 et 1931

L'évolution de cette paroi a été également quantifiée en estimant la surface des matériaux disparus entre 1951 et 1983 (tab. I). Suivant les résultats consignés sur le tableau I, on note une progression plus accélérée entre 1981 et 1983 et une situation presque linéaire pendant les autres périodes allant de 1951 à 1983, avec une vitesse moyenne de 1,276 ha/an alors qu'elle est de 7,031 ha/an entre 1981 et 1983.

Cette évolution de la paroi a été particulièrement quantifiée sur le lobe le plus avancé du cirque vers la route nationale n° 5 (tab. II). Il y a eu un recul de 74 m en 37 ans, soit une vitesse moyenne de 2,27 m/an. Nous avons estimé le temps pour lequel le cirque de Diosso pourrait atteindre ou couper la nationale n° 5 (fig. 9); ce temps se situe autour de 8 ans, avec la vitesse moyenne de 2,27 m/an.

4.2.2. Le recul du trait de côte

La ligne de rivage (trait de côte) a reculé de 175 à 350 m par endroits entre 1951 et 1983, soit une vitesse moyenne de 10,94 m/an sur les sites les plus touchés (fig. 8 et 9). Cependant, les mesures effectuées sur le terrain en 1988 (tab. III) et des enquêtes menées auprès des riverains indiquent une vitesse actuelle plus grande. En effet, en 1988, celle-ci a été de 1,92 m/mois, soit une vitesse moyenne annuelle de 23,76 m/an (fig. 10 et fig. 13-11, voir cahier couleur).

4.2.3. L'amenuisement des pics et arêtes centrales

L'évolution du cirque de Diosso a été également appréciée à l'intérieur de celui-ci, par le suivi de l'amenuisement des pics et des arêtes centrales (tab. IV). Les pics et arêtes ont perdu entre 2,52 et 28,62 m, soit une moyenne de 15,57 m en 32 ans, avec une vitesse moyenne de 0,486 m/an. Dans l'ensemble, cinq points (A, B, E, F et H) ont dépassé cette moyenne de 15,57 m entre 1951 et 1983, alors que les autres points n'ont pas dépassé même la moitié de cette moyenne (C, D et G). Pendant ces différentes périodes entre 1951 et 1983, chaque point a eu sa propre évolution. Le point E par exemple, qui s'amenuise de 14,5 m entre 1951 et 1966, soit

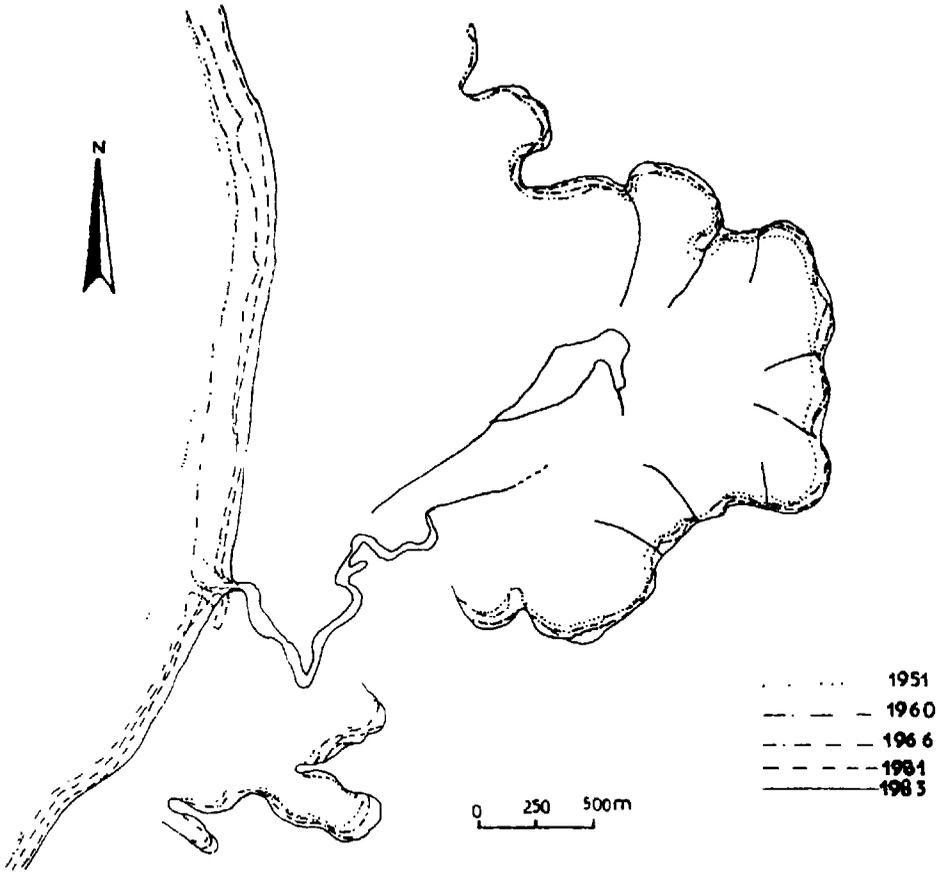


Figure 8. Évolution de la paroi bordière du cirque de Dioosso et du trait de côte de son exutoire entre 1951 et 1983

une vitesse de 0,96 m/an, voit son altitude décroître de 2,15 m seulement entre 1966 et 1983 avec une vitesse moyenne de 0,126 m/an tandis que le point H a eu évolution inverse pendant la même période (tab. V).

4.2.4. L'évolution de la végétation

L'analyse des cartes issues de photographies aériennes montre bien une progression nette du couvert végétal dans le secteur nord. La reconquête forestière dans le nord tend à réduire la dynamique érosive sur ce secteur. Le sud par contre, dont la forêt est souvent défrichée, et l'est dénudé font encore l'objet d'attaques érosives assez intenses.

L'analyse des cartes issues des photographies aériennes, nous a révélé trois périodes d'évolution des surfaces nues sur la paroi bordière du côté est et sud-est (tab. VI et fig. 12) : deux périodes régressives entre 1951 et 1966 d'une part, et entre 1981 et 1983 d'autre part, celles-ci correspondent à une reconquête de la végétation sur ces surfaces nues. Une période progressive entre 1966 et 1981 qui correspondait à une diminution de la végétation. Dans l'ensemble on constate une nette régression des surfaces nues entre 1951 et 1983.

Tableau I. Évolution des surfaces des matériaux disparus à différentes périodes

Période	Surfaces des matériaux disparus (ha)	Vitesse moyenne (ha/an)
1951-1960 (9 ans)	10,979	1,220
1960-1966 (6 ans)	9,312	1,550
1966-1981 (15 ans)	18,625	1,241
1981-1983 (2 ans)	14,063	7,031
1951-1983 (32 ans)	40,770	1,270

Tableau II. Évolution du lobe le plus avancé du cirque de Diosso vers la route nationale n° 5 au point d'observation A

Année	Longueur (m)	Période	Vitesse de recul (m/an)
1931	100	1931-1951	3
1951	40	1951-1960	0,277
1960	37,50	1960-1966	1,076
1966	31,15	1966-1981	0,740
1981	20	1981-1983	1,50
1983	17	1983-1988	1,200

Tableau III. Observation de l'érosion côtière dans la baie de Loango au Congo (TCHICAYA et MAKAYA, 1988)

Date	Période	Recul (m)	Vitesse (m/mois)
08-02-1988			
07-03-1988	08-02-1988—07-03-1988	2,66	2,66
06-06-1988	07-03-1988—06-06-1988	7,24	2,41
12-07-1988	06-06-1988—12-07-1988	0	0
	08-02-1988—12-07-1988	9,90	1,98

Tableau IV. Évolution des pics et arêtes dans le cirque de Diosso; les altitudes sont présentées en mètres

Pics et arêtes	1951	1960	1966	1981	1983
A	65	56	53,50	49	47,62
B	108	101	98,88	85	79,38
C	50	49	48,50	48	47,48
D	52	50	49,00	45	44,68
E	72	58	57,50	56	55,35
F	83	78	75,64	70	67,35
G	61	58	57,50	57	56,85
H	112	107	103,75	88	86,21

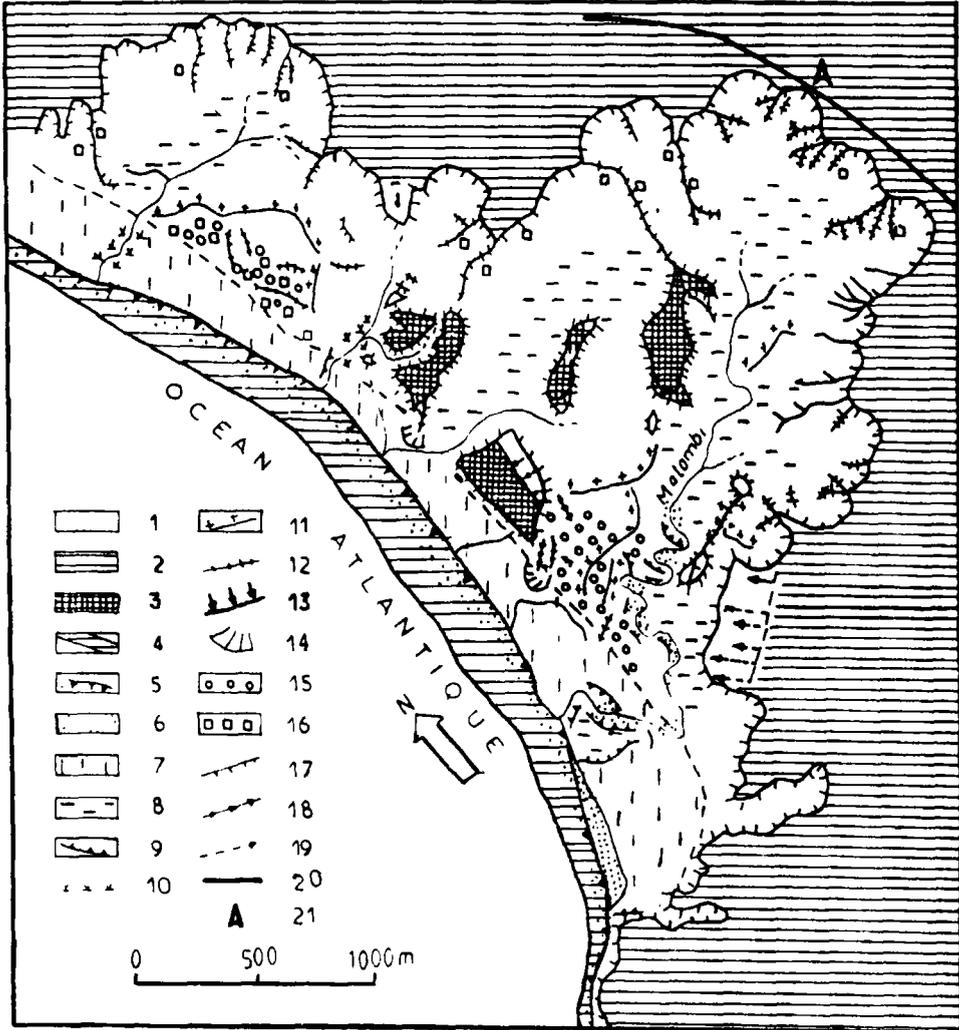


Figure 9. Carte géomorphologique du cirque de Diosso; 1 : secteur à forte pente, paroi abrupte du cirque; 2 : plateau de Diosso; 3 : replat en lambeaux de plateau; 4 : partie érodée de 1951 (érosion côtière); 5 : trait de côte et plage en 1983; 6 : sable en zone humide; 7 : remblaiement fini-kibanquin; 8 : secteur plan de dépôts actuels; 9 : berge rafraîchie par érosion; 10 : zone de marécage; 11 : sommet arrondi d'interfluve; 12 : arête vive; 13 : surface inclinée avec ligne de rupture de pente; 14 : cône de déjection; 15 : nappe de débris en surface; 16 : blocs de cuirasse démantelée; 17 : paroi verticale et subverticale; 18 : ravine profonde et récente; 19 : ravine superficielle; 20 : route nationale n° 5; 21 : point d'observation sur le lobe le plus avancé vers la route

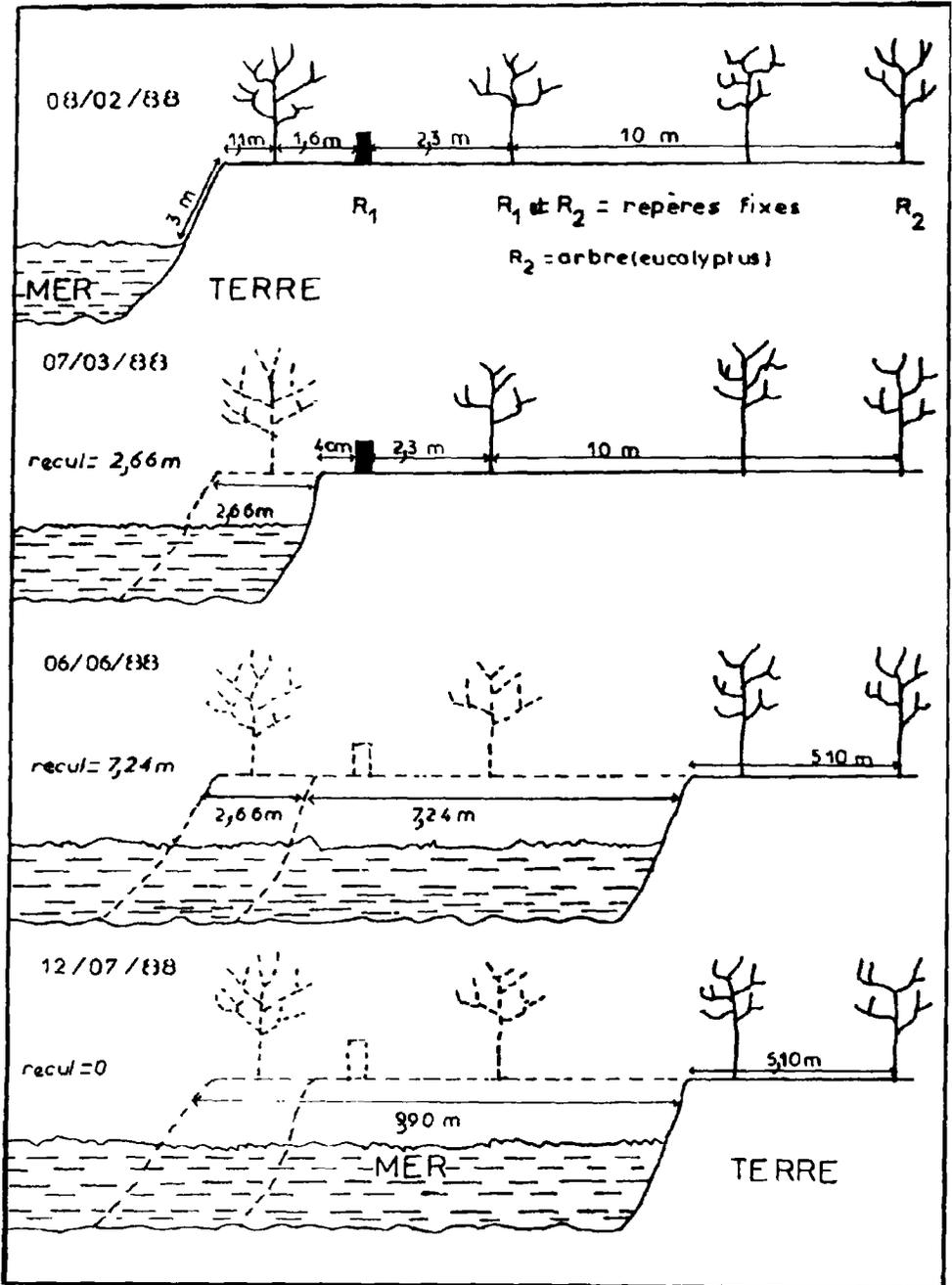


Figure 10. Observation de l'érosion côtière dans la baie de Loango

Tableau V. Évolution des pics et arêtes dans le cirque de Diosso par périodes; les amenuisements sont donnés en mètres

Pics et arêtes	1951-1960	1960-1966	1966-1981	1981-1983	1951-1983
A	-9	-2,50	-4,50	-1,38	-17,38
B	-7	-2,12	-13,88	-5,62	-28,62
C	-1	0,00	-1,00	-0,52	-2,52
D	-2	-1,00	-4,00	-0,32	-7,32
E	-14	-0,50	-1,50	-0,65	-16,65
F	-5	-4,36	-5,64	-2,65	-17,65
G	-2	-0,50	-0,50	-0,15	-3,15
H	-5	-3,25	-15,75	-1,79	-25,79

Tableau VI. Évolution des surfaces nues sur la paroi bordière du cirque de Diosso à l'est et au sud-est

Année	Surfaces nues (ha)	Période	Progression ou régression (ha)	Vitesse (ha/an)
1951	51,625	1951-1960	-5,180	-0,576
1960	46,440	1960-1966	-0,377	-0,550
1966	45,063	1966-1981	3,803	0,253
1981	58,875	1981-1983	-10,720	-5,360
1983	48,155	1951-1983	-3,470	-0,108

5. Discussion et conclusion

Les résultats présentés ici montrent que le cirque de Diosso subit une évolution très active. Les reculs moyens constatés, de l'ordre de 3 m/an, sont des ordres de grandeur qui permettent de faire des extrapolations sur le plan de la dynamique passée ou encore de faire des prospectives à court terme.

Cette étude montre donc que la photographie aérienne est un outil efficace pour l'étude de la morphodynamique. Les prises de vue aériennes à grande échelle nous ont fourni des informations sur les aspects morphologiques et les activités humaines à l'intérieur du cirque. La restitution photogrammétrique donne des résultats d'une grande précision dans la quantification des formes de détail tel que les cirques d'érosion et le trait de côte.

Cependant, nous n'avons pas encore effectué la même étude avec les images satellitaires. Il est donc difficile pour l'heure de faire des comparaisons fiables entre la télédétection aéroportée et satellitaire sur notre étude. Nous pensons toutefois que pour ce type de travail basé sur les formes de détail, la photographie aérienne demeure un outil très efficace d'investigation. Dans la zone côtière congolaise, les missions de photographies aériennes datent des années 1950. C'est la seule documentation ancienne pour l'étude de la dynamique de ces années. C'est un atout que ne possède pas la télédétection satellitaire, vu son caractère assez récent. La photographie aérienne présente néanmoins des handicaps sérieux qu'il convient de mentionner ici. Il s'agit principalement de la faiblesse de la répétitivité des missions (4-5 ans en moyenne pour les missions les plus rapprochées). Le coût assez élevé des

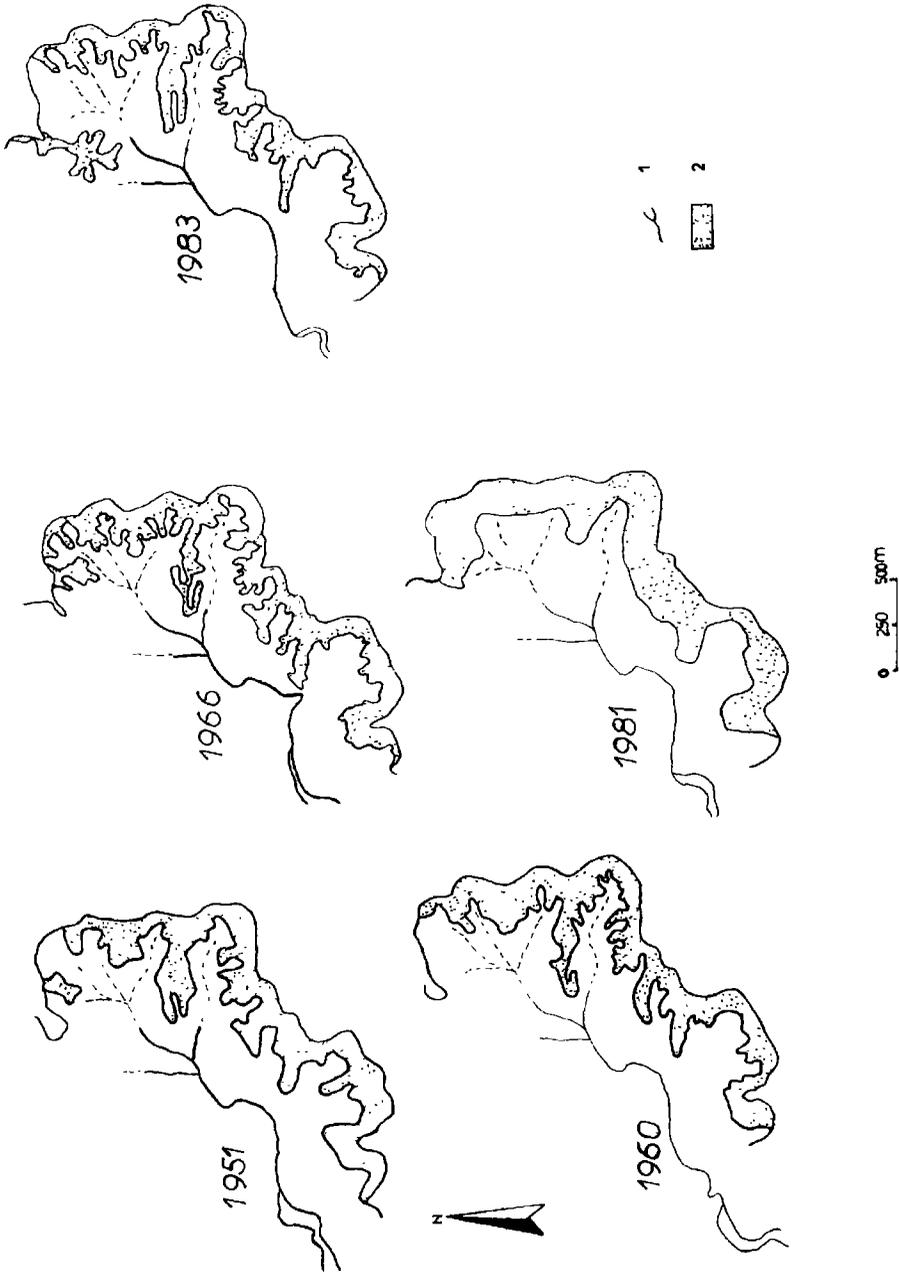


Figure 12. Évolution des surfaces nues sur la paroi bordière du côté est et sud-est du cirque de Dioso; 1 : cours d'eau; 2 : surfaces nues

campagnes de prises de vue aériennes limite, dans le temps et l'espace, le nombre de missions effectuées. La télédétection satellitaire présente à ces points un grand avantage qui réside surtout sur la grande répétitivité des images. SPOT et Landsat par exemple enregistrent les mêmes secteurs tous les 26 jours pour le premier et tous les 18 jours pour le second. Cette répétitivité permet de mieux suivre l'évolution des paysages et d'établir, dans le cadre de la quantification, des vitesses moyennes plus précises. Il faut dire que, dans le cadre de la prospective, les processus d'évolution des formes sont très importants à connaître car ce sont eux qui orientent toute intervention dans le domaine de la protection. Cette étude nous a en effet permis de noter que l'évolution du cirque de Diosso se fait parfois brusquement de façon catastrophique, avec une très grande irrégularité. D'où l'intérêt d'avoir des images très rapprochées dans le temps qui permettent de mieux suivre l'évolution des paysages et surtout de faire des corrélations plus fiables pour chaque changement. Les images des satellites tels que SPOT et Landsat, qui possèdent une haute résolution, doivent avoir un grand intérêt scientifique pour une telle étude.

Il paraît donc judicieux, à défaut d'une multiplication des missions de photographies aériennes très coûteuses, d'utiliser l'imagerie satellitaire à haute résolution.

La fragilité des écosystèmes de notre zone côtière nécessite, au demeurant, la mise en place d'un système d'information géographique, pour une bonne gestion de notre environnement côtier.

6. Références

- SITOU, L. et TCHICAYA, J. 1991. L'érosion en cirque dans la région côtière du Congo. Bulletin de la Société géographique de Liège, n° spécial, Hommage au Prof. Jean Alexandre, Afrique Centrale : Géomorphologie et géologie récente, p. 77-91.
- TCHICAYA, J. et MAKAYA, J. F. 1988. Rapport technique sur l'observation de l'environnement côtier au Congo. Direction générale de la recherche scientifique du Congo, 20 p.
- UPOLI, W. 1987. Mapping coastal changes from historical documents and aerial photographs. Journal I.T.C., 1987-2, p. 139-144.
- UPOLI, W. 1988. Mapping coastal evolution in Sri Lanka, using aerial photographs. Journal I.T.C., 1988-2, p. 188-195.
- VENNETIER, P. 1968. Pointe-Noire et la façade maritime du Congo-Brazzaville. Mémoire, ORSTOM, p. 11-80.

14

Téledétection par satellite et catastrophe écologique dans la région de Sudètes (Europe Centrale)

TOMASZ ZAWILA-NIEDZWIECKI

Centre polonais de téledétection (OPOLIS), Institut de géodésie et de cartographie, 2/4, rue Jasna, 00-950 Varsovie, Pologne; téléphone : (48) 22-27-76-13; télécopie : (48) 22-27-03-28

Résumé

La Pologne est l'un des pays les plus pollués du monde. Cela résulte non seulement des émissions locales mais également des pollutions transportées sur de grandes distances, surtout de Tchécoslovaquie et d'Allemagne. En raison des dimensions et de la vitesse de la dégradation du milieu dans les montagnes des Sudètes, on a décidé que, pour l'inventaire de l'état de forêt, on aurait recours à des images satellitaires. Pendant la première étape des travaux, on a testé l'aptitude des images recueillies par les capteurs de Landsat, de SPOT et de Cosmos. On a constaté qu'en cas de forêts dégradées les meilleurs résultats sont obtenus grâce aux images Thematic Mapper qui servent le mieux à l'établissement d'une carte d'état de forêts. En recourant à l'imagerie TM, on a délimité sur le terrain en question trois classes d'état de la santé des forêts d'épicéas (*Picea abies*) et cinq classes supplémentaires caractérisant la forêt. L'interprétation hybride des images TM a permis d'évaluer les pertes d'accroissement des peuplements sur le terrain de la catastrophe écologique dans les Sudètes.

1. Introduction

Depuis plusieurs années, on observe dans les forêts européennes l'accroissement des dégâts occasionnés par la pollution industrielle de l'air. Cette situation est particulièrement grave en

Europe Centrale où on dénote la plus abondante émission de soufre (Allemagne : 3 millions de tonnes par an, Pologne : 2 millions de tonnes par an). Les plus exposées au danger sont les forêts de montagne, tout spécialement dans les monts des Sudètes où se trouvent des espèces sensibles à la pollution atmosphérique : sapins, épicéas, hêtres. En Pologne on craint que, d'ici l'an 2000, le déboisement de la surface située à plus de 1000 m au-dessus du niveau de la mer puisse se produire.

Les changements brusques de l'environnement nécessitent la mise en place de nouvelles méthodes d'évaluation de l'état de forêt. C'est la raison d'un intérêt constant pour la télédétection de la part des services forestiers polonais. Ces dernières années, on a entrepris des essais en vue de tirer profit des images satellitaires pour l'évaluation de la dégradation des forêts dans une région écologiquement sinistrée, telle la partie polonaise des Sudètes Occidentales. Le terrain en question, couvert de forêts d'épicéa (*Picea abies*), est l'un des plus pollués dans le monde sous l'effet d'émissions locales et étrangères; 75% des polluants y parvenant sont transportés par le vent de l'étranger, surtout de Tchécoslovaquie et d'Allemagne.

La mauvaise condition des forêts dans les monts des Sudètes est prouvée par les résultats des inventaires forestiers consécutifs. En 1988 on a constaté que seulement 4% des arbres pouvaient être considérés comme sains, 24% légèrement atteints, 50% atteints et 20% fortement atteints. Une situation particulièrement grave a lieu dans le district de Swieradow (env. 10 000 ha de surface boisée) où, sur un terrain qui en couvre 20%, la forêt n'existe plus et, quant au reste, 55% des arbres sont atteints et 45% fortement atteints.

Les dimensions de la catastrophe écologique dans les monts des Sudètes étaient à l'origine de la mise à profit des images satellitaires en vue d'évaluation de l'état de forêts et des changements s'y produisant.

2. Matériel et méthodes

Au cours de la première étape de recherches, on a testé l'aptitude de l'imagerie TM de Landsat, HRV de SPOT et Cosmos pour l'inventaire forestier. Les images sus-mentionnées diffèrent surtout par le mode d'enregistrement des données. Les systèmes américain et français s'appuient sur l'enregistrement par capteur avec la notation numérique et le système russe sur l'enregistrement photographique. Qui plus est, le capteur TM enregistre sept bandes spectrales, le capteur HRV de SPOT trois bandes spectrales et une bande panchromatique et enfin le satellite Cosmos produit des photographies en bandes panchromatique et infrarouge couleurs.

Les photographies infrarouges couleurs de Cosmos sont effectuées à l'aide d'une caméra à distance focale de 1000 mm et 300 mm sur un film négatif à deux couches (SN-10), enregistrant le rayonnement électromagnétique de la bande de 0,57-0,80 μm . Ces photos se caractérisent par une faible correction optique. Les déformations dues à la distorsion et à la contraction irrégulière de la pellicule peuvent dépasser 300 m sur le terrain. Ainsi, on a affaire à une forte disproportion entre la capacité de résolution (5-10 m) et la déformation géométrique qui n'influe pas sur la valeur informative de l'image mais qui peut, toutefois, rendre plus difficile la localisation dans le terrain de certaines informations.

Parmi les trois systèmes satellitaires sus-mentionnés la plus grande résolution caractérise les images effectuées par le satellite Cosmos (5-10 m) et SPOT (10 et 20 m) en devançant de beaucoup les images TM (30 m). Aussi bien les images HRV de SPOT que Cosmos rendent possible la formation du modèle stéréoscopique.

Les moyens d'analyse des images satellitaires en question sont déterminés par les

techniques concernant leur acquisition. Les images TM et HRV inscrites de façon numérique sont soumises à des traitements numériques car le matériel standard ne se prête pas à des analyses forestières détaillées. On a eu donc recours à une interprétation hybride basée sur l'interprétation visuelle des compositions colorées, préparées numériquement, et des classifications dirigées. On a étudié aussi des histogrammes multidimensionnels et des corrélations de canaux. Les photographies infrarouges couleurs Cosmos, sous forme de diapositives et d'épreuves couleurs sur papier, ont été interprétées visuellement (mono- et stéréoscopique).

Les résultats des classifications numériques et des interprétations visuelles ont été comparés avec les cartes de la santé des forêts, préparées à partir de données aériennes infrarouges couleurs, et avec les cartes topographiques.

3. Résultats

Le trait spécifique des images Cosmos, du point de vue de l'analyse de la végétation, consiste en une nette distinction entre les forêts de conifères, de feuillus, les coupes-rases et les jeunes peuplements. Les espèces de conifères et de feuillus sont visibles comme des objets ayant des réponses spectrales totalement différentes, ainsi que sur d'autres pellicules infrarouges couleurs (par exemple Kodak IR 2442) sont différenciés les arbres sains et morts (IRACKA, 1989). La possibilité de la stratification de la santé des forêts sur les photographies effectuées sur le film SN-10 est limitée à cause de sa construction de même qu'à cause des effets de l'atmosphère masquant des changements subtils dans les couronnes des arbres.

Les images acquises grâce à tous les satellites envisagés ci-dessus peuvent être employées pour la cartographie forestière et la surveillance des forêts saines. Par contre, en cas de forêts atteintes et dégradées, on obtient des résultats nettement meilleurs au moyen d'images Thematic Mapper (BYCHAWSKI, 1988). Le manque d'enregistrement des canaux de l'infrarouge moyen propre aux satellites SPOT et Cosmos constitue un défaut important dans la mise en pratique de ces images pour des recherches relatives à l'environnement.

En procédant à l'élaboration thématique de l'image Thematic Mapper de la région des Sudètes, on a choisi, pour les analyses détaillées les canaux qui reflètent le mieux les changements de l'état des arbres visualisés par la diminution de pigments et d'eau dans les feuilles et la réduction de l'appareil d'assimilation. À la suite des analyses de l'image TM des Sudètes, prenant en considération les histogrammes et les corrélations des canaux, on a constaté qu'une gamme assez large d'informations relatives à la forêt figurait dans TM1. Il n'empêche que son utilité reste limitée à cause des effets atmosphériques apparaissant dans la bande spectrale enregistrée par ce canal. Le canal TM3 est intimement corrélé avec TM1 ($r = 0,92$), ce premier est cependant moins susceptible aux effets atmosphériques, tout particulièrement, lorsque l'image est prise en été. Une forte corrélation existe également entre TM5 et TM7 ($r = 0,95$) ce qui permet de constater que ces deux canaux aussi enregistrent un champ d'informations sur la forêt assez semblable, bien que TM7 recèle une moindre dynamique des tons de gris. Par contre TM5 et TM4 manifestent une gamme d'informations assez proches concernant les types de forêts et les classes d'âge, mais TM5 est encore en mesure de fournir des données relatives à la condition de la forêt et à l'humidité des sites forestiers.

Les analyses détaillées des compositions colorées des combinaisons variées des canaux TM ont montré que les bandes consécutives recèlent des informations permettant la distinction des éléments de la forêt. Ainsi, TM3 se prête le mieux à la distinction des peuplements de

conifères, dans TM4 les plus visibles sont les peuplements mélangés, de feuillus et la prairie, par contre TM5 et TM7 peuvent servir à la distinction des déforestations au sol nu et des pertes d'aiguilles dans les forêts de conifères.

En ce qui concerne le ratio TM4/TM3, il est surtout utile pour une nette différenciation entre les peuplements mélangés et de feuillus et les jeunes épicéas, de même que pour une bonne distinction des prairies et des reboisements. À son tour, le ratio TM5/TM4 est particulièrement apte à distinguer les peuplements d'épicéas endommagés. Il s'en suit que, pour des analyses minutieuses de la forêt dans le mont des Sudètes, on avait eu recours à TM3, TM4, TM5 et TM7 aussi bien qu'à la composition colorée, formée avec les canaux TM5/TM4, TM4/TM3 et TM7, qui s'est avérée être la plus utile. À la base d'une telle composition on a distingué des classes (fig. 1) qui ont été définies en profitant des résultats de l'inventaire forestier établi à partir des photographies aériennes infrarouges couleurs. Les classes distinguées sont les suivantes : 1) peuplements d'épicéas atteints; cette classe est constituée d'épicéas d'âge moyen de 70 ans, à la classe de qualité du site forestier I-II (sur une échelle de cinq degrés), avec une densité de 703 arbres/ha dont 7% sont morts et 12% mourants; 2) peuplements d'épicéas sérieusement atteints; cette classe est constituée d'épicéas d'âge moyen 90 ans, à la classe de qualité du site forestier II-IV, avec une densité de 513 arbres/ha dont 78% sont morts et 12% mourants; 3) peuplements morts; 4) peuplements de feuillus et mélangés; 5) jeunes épicéas; 6) coupes rases avec végétation; 7) coupes rases avec sol nu.

En comparant le résultat de l'interprétation des images TM avec les photographies aériennes, on peut constater que les catégories sus-mentionnées ont été définies d'une manière correcte. Pratiquement, sur l'image satellitaire, il n'y a qu'un élément qui déforme l'état réel du terrain. C'est qu'en interprétant l'image TM on a inclus les pins de montagne (*Pinus mugho*) au peuplement mort. Cela est dû au fait que les pins de montagne ont une réponse spectrale semblable à celle d'un peuplement mort. Cette limitation n'a cependant qu'une importance secondaire car les pins de montagne recouvrent de petites superficies.

La comparaison des résultats de l'interprétation des images satellitaires avec des cartes topographiques anciennes a permis de présenter la distribution des surfaces touchées par la déforestation, pendant les années 1947-1984 (fig. 2). Ils occupent 23% du territoire en question et se manifestent depuis 650 m au-dessus de la mer (POLAWSKI et ZAWILA-NIEDZWIECKI, 1987).

4. Discussion

Les résultats de l'évaluation de l'état des forêts sur de grandes surfaces (y compris à partir des images satellitaires) se prêtent à être présentés à des échelles différentes, selon les besoins. Les possibilités de la technique satellitaire de même que les besoins de l'inventaire relatif aux grandes surfaces optent pour une échelle qui rend possible une présentation synthétique des phénomènes qui se produisent dans la forêt. La résolution de l'image TM permet la présentation cartographique de la forêt même à l'échelle 1:25 000. En cas d'analyses régionales ou globales, par exemple en vue de surveiller les changements de la végétation, il est possible d'élaborer, à la base des images TM, des cartes à de petites échelles qui donnent un panorama général de l'état du milieu forestier.

Dans ce travail, on a pris pour carte de base la carte topographique à l'échelle 1:25 000 dans laquelle on a inscrit les classes d'interprétation délimitées auparavant. Comme présenté ci-dessus, parmi les peuplements d'épicéas vivants situés dans la région de catastrophe écologique dans les Sudètes, on a distingué deux classes d'état de santé. Les peuplements se caractérisant

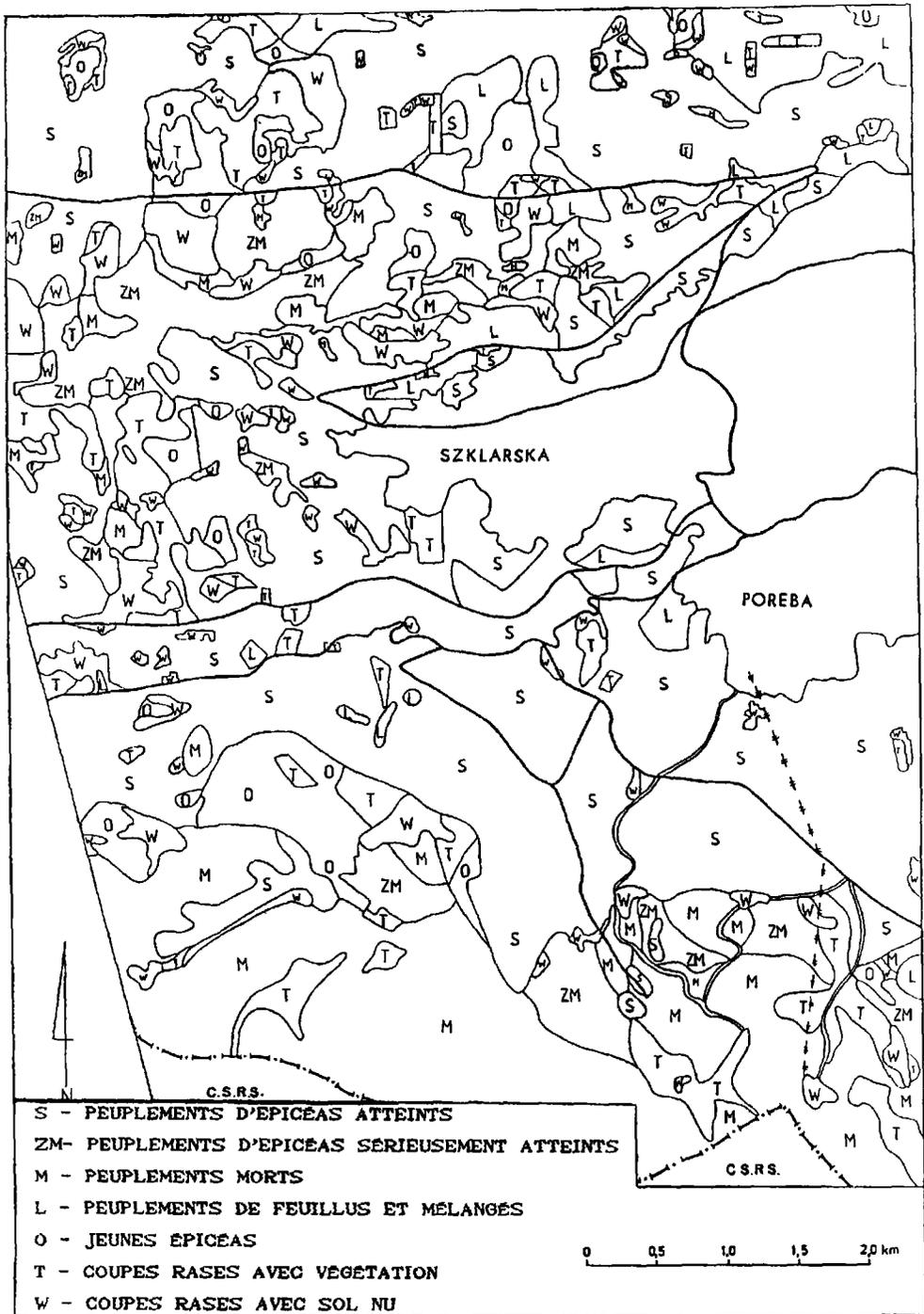


Figure 1. Le résultat de l'interprétation de la composition colorée d'image Thematic Mapper

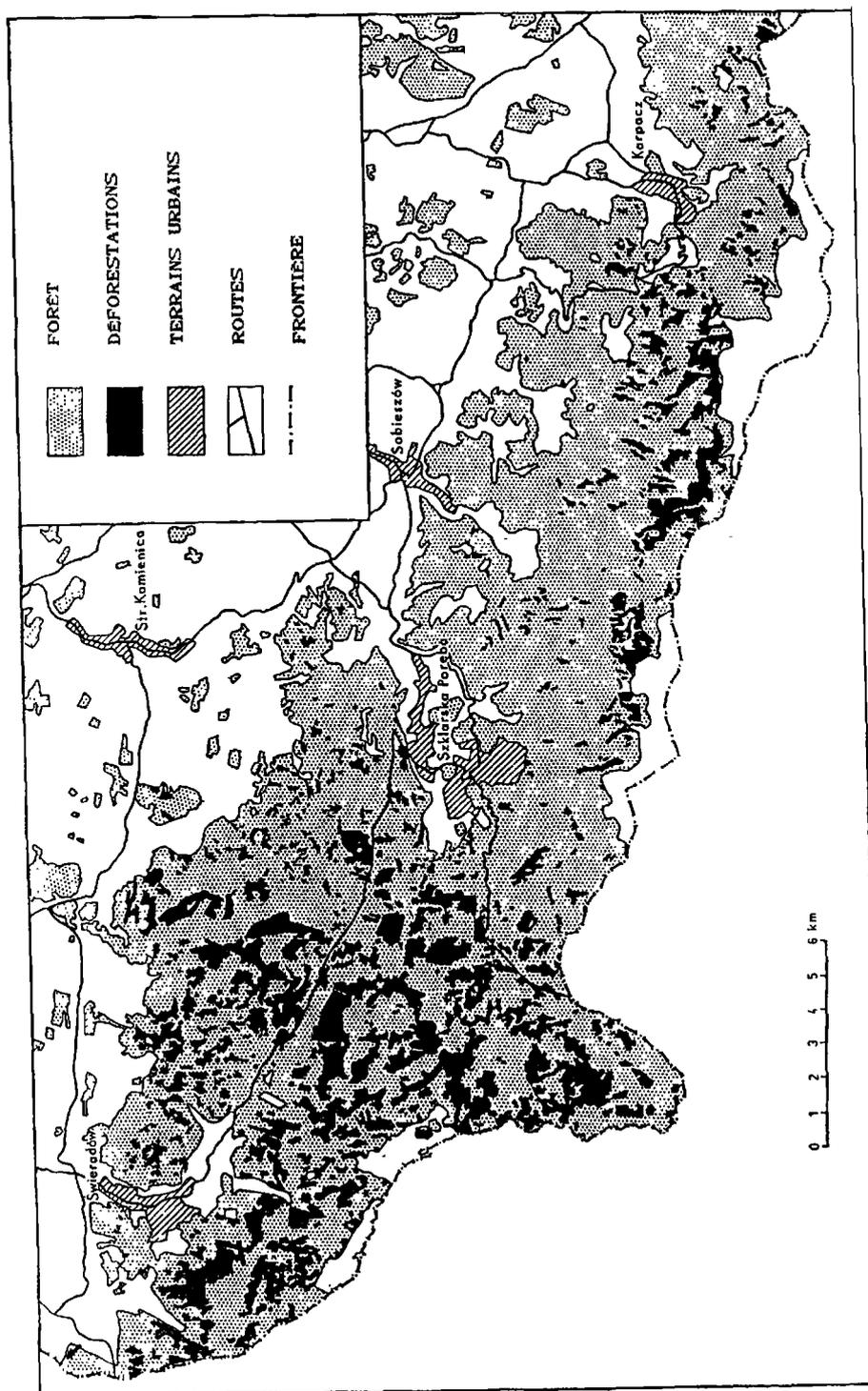


Figure 2. Les déforestations dans la région des Sudètes pendant les années 1947-1984

par une meilleure condition sont un peu moins âgés (la moyenne d'âge est de 70 ans) en comparaison avec les peuplements se caractérisant par une moins bonne condition (moyenne de 90 ans), ils ont une plus grande densité (respectivement 703 et 513 arbres/ha) et ils se distinguent par des proportions moins élevées d'arbres morts (respectivement 7% et 78%). La délimitation de ces classes peut fournir des informations précieuses pour la planification des activités économiques et de sauvetage en désignant les peuplements nécessitant en priorité une intervention urgente. Ce qui est important du point de vue de l'économie forestière c'est également la possibilité de la distinction des peuplements appartenant à des classes d'âge plus ou moins avancé, d'autant plus que les jeunes épicéas sont plus résistants aux facteurs stressants que les épicéas plus âgés. Par contre, l'image TM ne permet pas de différencier les reboisements et les terrains couverts d'herbes et de broussailles. En revanche, il est avantageux de pouvoir distinguer les terrains de sol nu. Ce fait est surtout important en montagne, donnant la possibilité de désigner les terrains menacés par l'érosion.

5. Conclusion

L'utilisation d'images satellitaires a permis de déterminer la répartition des dégâts dans la région occidentale des Sudètes. La zone étudiée s'étend sur 32 000 ha dont 23% sont couverts d'épicéas atteints, 21% d'épicéas sérieusement atteints et 6% d'épicéas mourants ou morts. Il n'y a aucun peuplement sain; même les jeunes sujets qui occupent 12% de la zone étudiée sont légèrement atteints. La zone de déboisement qui a été exclue de la production de bois, couvre une superficie de 7 360 ha (23%). Près d'un cinquième de la zone étudiée était recouvert d'arbres qu'il a fallu enlever avant qu'ils ne parviennent à la maturité.

En profitant des résultats des travaux sus-présentés et des études menées à l'Institut de recherches forestières de Varsovie, on a essayé d'évaluer les pertes d'accroissement annuel du volume de bois dans les forêts des Sudètes. Les études de l'Institut de recherches forestières révèlent que les pertes d'accroissement annuel du volume de bois des peuplements touchés par la pollution atmosphérique s'établissent comme suit : atteinte physiologique : 10%; atteinte légère : 25%; atteinte moyenne : 50%; atteinte grave : 75%. Pour évaluer les pertes annuelles en fonction de ces données et des résultats de l'analyse d'images satellitaires sus-mentionnée, on peut distinguer quatre catégories de forêts dans la région étudiée des monts des Sudètes (tab. I) (CIOLKOSZ et ZAWILA-NIEDZWIECKI, 1990).

Tableau I. Pertes annuelles d'accroissement du volume de bois dans les quatre catégories de forêts distinguées sur l'image satellitaire de la région des Sudètes

Catégorie	Zone (ha)	Accroissement annuel potentiel (m ³)	Indice des pertes d'accroissement	Estimation de pertes totales d'accroissement de volume (m ³)
Légèrement atteinte	3 840	13 000	0,10	1 000
Atteinte	7 360	24 000	0,25	6 000
Fortement atteinte	6 720	22 000	0,50	11 000
Mourante ou morte	3 840	6 000	0,75 - 1,00	5 000- 6 000
Totaux	21 760	65 000	0,431 (moyenne)	23 000- 24 000

Si l'on prend en considération dans ces calculs la perte d'accroissement de volume de bois occasionnée par la coupe des massifs mourants avant l'âge normal d'exploitation la perte sur ces 32 000 hectares serait selon les estimations d'environ 45 000 m³/an, soit une perte moyenne de volume d'accroissement d'environ 1,4 m³/ha/an, contre une moyenne de 0,6 m³/ha/an pour les forêts polonaises touchées par les émissions industrielles. Ces calculs ne tiennent pas compte de la perte d'accroissement de bois de feuillus et des forêts mélangées, car la baisse du nombre de feuillus est plus difficile à déterminer par la télédétection que la baisse du nombre de conifères.

6. Références

- BYCHAWSKI, W. 1988. Évaluation de l'état de forêt sur de grandes surfaces à la base des images par satellites à haute résolution. Institut de géodésie et de cartographie, Varsovie, 60 p.
- CIOLKOSZ, A. et ZAWILA-NIEDZWIECKI, T. 1990. Télédétection et limitation de la productivité des forêts en Pologne. *Nature et ressources*, vol. 26, n° 1, p. 41-44.
- IRACKA, M. 1989. Évaluation des informations comprises dans les images effectuées par des satellites de la 3^e génération pour les besoins de la valorisation des surfaces forestières. *Bulletin de l'Institut de géodésie et de cartographie*, Varsovie, vol. 34, n° 1, p. 5-13.
- POLAWSKI, Z. F. et ZAWILA-NIEDZWIECKI, T. 1987. Évaluation de l'état de forêt dans la région des Sudètes à la base de la télédétection. *Sylwan*, n° 5, p. 49-60.

PARTIE IV

Cartographie de la végétation

15

Le graphique «binormalisé» : un outil d'étalonnage des indices de végétation - application aux cultures sahéliennes

ÉTIENNE BARTHOLOMÉ

Institut pour les applications de la télédétection, Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes (IATD-CCR), T.P. 440, 21020 Ispra, Italie; téléphone : (39) 332-789908; télécopieur : (39) 332-789073; télex : 380042 EUR I; courrier électronique : etienne.bartholome@jrc.it

Résumé

Pour résoudre le problème de la représentation graphique et la compréhension visuelle de données dans un espace supérieur à deux dimensions, on propose ici d'utiliser des indices calqués sur l'indice de végétation de la différence normalisée (NDVI). Le graphique «binormalisé» représente donc un indice normalisé par axe. Les isolignes sont parallèles entre elles. L'application de ce principe simple de figuration à des données satellitaires HRV de SPOT couvrant des espaces agricoles en région sahélienne (Ségou, Mali, et Bobo-Dioulasso, Burkina Faso) complétées par des observations de terrain et des prises de vue à grande échelle a permis les observations suivantes : 1) la différence normalisée entre canaux vert et rouge permet de différencier aisément et donc de cartographier les sols suivant l'importance de leur rubéfaction; 2) le graphique «binormalisé» représentant les canaux vert, rouge et infrarouge permet de mettre en évidence les trajectoires spectrales de la végétation en fonction de leur densité et de leur taux de recouvrement d'une part, et du comportement spectral du sol sous-jacent d'autre part. Ces trajectoires partent de noyaux propres à chaque type de sol et convergent vers une zone commune correspondant à un taux de recouvrement de 100%. L'exploitation du graphique binormalisé doit permettre, lorsque les conditions pédologiques et de végétation l'autorisent, d'étalonner l'indice de végétation dérivé de données à haute résolution (HRV, TM) en termes de pourcentage de recouvrement de la végétation, et par extension en termes de capacité photosynthétique, avec un appui au sol limité, et ensuite d'extrapoler à des données à faible résolution (AVHRR).

1. Introduction

1.1. Utilité des indices de végétation

Parmi tous les indices de végétation proposés depuis les origines de la télédétection spatiale, l'indice de végétation normalisé (ROUSE *et al.*, 1974) est devenu l'outil standard de description du comportement spectral de la couverture végétale. Cet indice, le plus souvent appelé NDVI selon son abréviation anglaise, est calculé à partir de deux bandes spectrales, le rouge R et l'infrarouge IR selon la formule suivante : $NDVI = (IR - R)/(IR + R)$. Son utilité pour décrire le couvert végétal se base sur le fait que d'une part ce dernier absorbe préférentiellement (mais pas uniquement) l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse, et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge, en fonction de la structure inter-cellulaire du matériel végétal photosynthétisant (GAUSMAN, 1985). En outre cet indice minimise la variation d'illumination en fonction du relief (HOLBEN and JUSTICE, 1981), mais reste sensible à la turbidité de l'atmosphère (SLATER and JACKSON, 1982; JACKSON *et al.*, 1983; CRIPPEN, 1988). Diverses alternatives ont été proposées (KAUTH and THOMAS, 1976; RICHARDSON and WIEGAND, 1977; PERRY and LAUTENSCHLAGER, 1984; HUETE, 1988; BARET *et al.*, 1989) pour remplacer le NDVI, mais ce dernier reste sans doute le plus largement utilisé.

L'indice de la différence normalisée a été relié à divers caractères descriptifs de la physiologie du couvert végétal, les trois plus importants étant l'indice foliaire, le pourcentage d'énergie solaire interceptée par le couvert pour la photosynthèse, et le pourcentage de couvert végétal. L'utilité de la première relation est relativement limitée, car on observe un effet de saturation pour des indices foliaires de l'ordre de 2 à 3 (HATFIELD *et al.*, 1984) ce qui somme toute est un cas très fréquent. Par contre, aussi bien les développements théoriques (SELLERS, 1985 et 1987) que les observations empiriques (ASRAR *et al.*, 1984) indiquent que la relation entre le NDVI et les autres paramètres tend à être linéaire. Cette linéarité permet d'envisager l'utilisation du NDVI pour estimer la productivité primaire à partir du modèle proposé par MONTEITH (1972) :

$$Rdt = \int_{t_1}^{t_2} PAR \cdot APAR \cdot \epsilon \, dt \quad (1)$$

où Rdt est la quantité de matière végétale produite au-dessus du sol;

t_1 et t_2 définissent l'intervalle de temps sur lequel se fait l'intégration;

PAR est la partie du rayonnement global incident (en mégajoules, MJ) disponible au niveau du sol pour la photosynthèse; PAR vaut environ 45 à 50% du rayonnement global;

APAR est la fraction (en %) du PAR qui est effectivement absorbée par la végétation pour la photosynthèse; ce terme peut être estimé par le biais des indices de végétation dérivés des données télédétections;

ϵ est le coefficient de transformation de l'énergie lumineuse en matière sèche; il s'exprime généralement en g/MJ.

Dans le cas où on désire mesurer la production utile comme par exemple le grain chez les céréales, la productivité primaire doit être pondérée par le terme G qui est le rapport pondéral entre le grain, définissant le rendement utile que l'on désire connaître, et le reste de la biomasse, c'est-à-dire les organes photosynthétisants perceptibles par les capteurs satellitaires.

La validité de ce modèle a été empiriquement démontrée à diverses échelles, depuis la parcelle expérimentale jusqu'aux ensembles sous-continentaux.

1.2. Difficultés d'étalonnage des indices de végétation

En ce qui concerne les données télédéteectées le problème majeur réside dans l'étalonnage des indices de végétation. Si les problèmes relatifs à la correction des capteurs et des effets atmosphériques commencent à être maintenant bien maîtrisés, il n'en reste pas moins que la plupart du temps les mesures adéquates manquent pour appliquer de manière effective ces corrections, et ce, spécialement dans les régions intertropicales. À supposer que cette étape est franchie, il reste encore à étalonner l'indice ainsi corrigé en termes de variables phyto-physiologiques, cette relation étant influencée par les propriétés optiques et structurales du couvert végétal.

La possibilité d'établir un étalonnage empirique des données satellitaires en termes de recouvrement et de taux d'interception de la lumière à l'aide de mesures de pourcentages de recouvrement a déjà été reconnue précédemment (BARTHOLOMÉ, 1989). Cependant il n'est pas toujours aisé de disposer des informations de terrain nécessaires à ce type d'approche. L'objectif est donc ici d'évaluer la possibilité d'étalonner les données satellitaires à haute résolution (HRV de SPOT) en compensant la faiblesse des observations de terrain par une exploitation raisonnée du comportement spectral des surfaces décrites par les données satellitaires. Si elle se révèle positive une telle approche devrait permettre par la suite d'étalonner empiriquement des données satellitaires à basse résolution (AVHRR/HRPT) avec un appui sur le terrain réduit au minimum.

1.3. Couvert végétal et radiométrie

Nous ne considérons ici que la question de l'estimation du pourcentage de recouvrement, qui est une variable aisément contrôlable par mesure directe sur des photographies à grande échelle. Des études précédentes ont montré que les isolignes de recouvrement ne sont ni parfaitement parallèles ni parfaitement convergentes vers l'origine (HUETE, 1988), et que d'autre part ces isolignes se «ramassent» sur elles-mêmes pour les plus hauts taux de recouvrement, au point de définir un «point de convergence» des trajectoires radiométriques dans les canaux rouge et infrarouge (BARTHOLOMÉ, 1989). Ces trajectoires radiométriques décrivent l'accroissement de pourcentage de recouvrement du couvert végétal pour un type donné de sol en arrière-plan. Ces trajectoires affectent une forme incurvée (fig. 1) que les modèles radiométriques (KUMAR, 1988; BARET, 1988) relient à la réflectance infinie dans le rouge et l'infrarouge. Celle-ci se définit comme la réflectance du couvert végétal dans une longueur d'onde donnée d'une superposition de feuilles en nombre tel que l'ajout d'une feuille supplémentaire n'influence plus cette réflectance (ALLEN and RICHARDSON, 1968). Dans cette étude on s'efforce en plus de tenir compte de la trajectoire dans le vert, longueur d'onde où le comportement spectral se rapproche sensiblement de celui dans le rouge, on doit donc s'attendre à une linéarisation du comportement spectral dans ces deux canaux en fonction du taux de recouvrement de la végétation. L'information du canal XS1 (vert) est généralement considérée comme redondante avec celle du canal XS2 (rouge), ce qui se traduit en effet par des coefficients de corrélation très élevés. Cependant il est intéressant de noter que la couleur des sols et d'autres surfaces minérales se traduit souvent par des différences de réponse dans ces deux canaux (STONER *et al.*, 1980; STONER and BAUMGARDNER, 1981). C'est le cas par exemple des sols rubéfiés qui absorbent sensiblement plus le vert que d'autres sols (ELVIDGE and LYON, 1985). La combinaison de ces deux canaux du visible doit donc *a priori* renforcer ces contrastes.

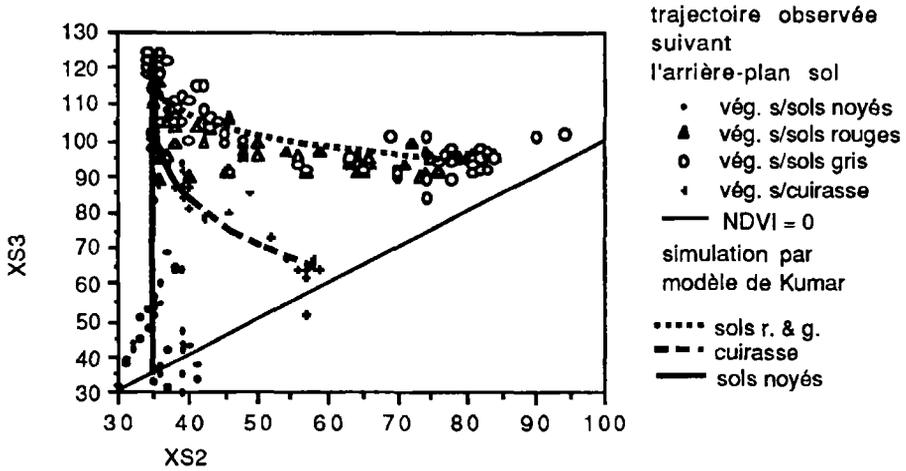


Figure 1. Site de Ségou : trajectoires de la radiométrie HRV en fonction du taux de recouvrement et du comportement spectral de l'arrière-plan sol, superposition des trajectoires théoriques obtenues avec le modèle de réflectance de KUMAR (1988)

1.4. Le graphique binormalisé

Pour mener ce type d'analyse, HUBAUX *et al.* (1985) ont proposé de représenter simultanément les trois canaux de HRV dans le canevas d'une projection stéréographique (fig. 2). Une telle présentation permet de lire simultanément sur un seul et même graphique à la fois l'indice de végétation et un indice de jaunissement. La projection choisie présente cependant à l'usage deux inconvénients. D'une part, le calcul des transformations de coordonnées est relativement lourd et, d'autre part, la lecture en est malaisée car parallèles et méridiens y sont représentés sous forme de courbes.

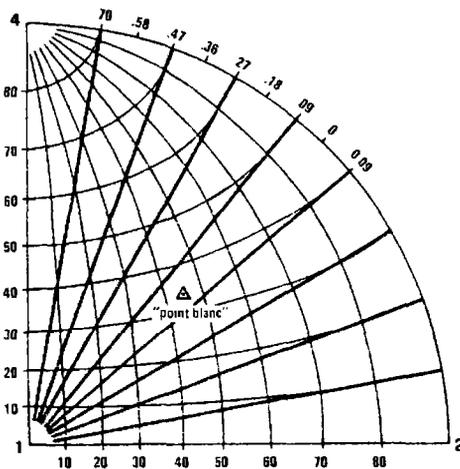


Figure 2. Le canevas stéréographique de Wulff présentant ici le canal rouge en X, le canal infra-rouge en Y et le canal vert en Z; le NDVI est figuré par les droites convergentes à l'origine (d'après HUBAUX *et al.*, 1985)

S'inspirant de ce principe de représentation, on exploite ici un système graphique simplifié avec un canevas orthogonal : l'ordonnée figure le jaunissement par la différence normalisée entre canaux XS1 et XS2, tandis que l'abscisse représente la différence normalisée classique entre XS2 et XS3. Cette représentation est baptisée pour la circonstance «graphique binormalisé». Il ne s'agit plus ici à proprement parler d'une représentation de type cartographique, puisque les différences normalisées ne sont apparentées aux angles que de manière indirecte via la tangente ($NDVI = \text{tg} [a + (P/4)]$), a étant l'angle formé par le vecteur à l'origine dans le plan défini par les axes XS2 et XS3. Le calcul est simple et rapide aussi bien pour des données radiométriques de terrain que pour des images satellitaires, et les isolignes sont des droites parallèles et équidistantes.

2. Matériel

Pour vérifier le bien-fondé des hypothèses émises et de l'utilité de la méthode proposée, on a utilisé, d'une part, un ensemble de données collectées (tab. I) en 1986 sur une zone d'environ 6 km² située en bordure du fleuve Niger (13°22'N - 6°22'O) à 15 km au sud-ouest de Ségou, au Mali et, d'autre part, des données satellitaires complétées d'observations préliminaires de terrain dans une zone d'une cinquantaine de kilomètres de côté située au nord-ouest de Bobo-Dioulasso et centrée approximativement sur la bourgade de Samandéni (12°27'N - 4°27'O) (fig. 3 et 4).

2.1. Le site de Ségou

La zone comprise entre Banankoroni et Dougoukouna, au sud-ouest de Ségou constitue le site de référence de cette étude. Elle s'étend sur un éventail varié de conditions écologiques caractéristiques de la bordure du fleuve Niger (fig. 5).

Les parties basses non aménagées et les îles du fleuve sont marquées par des chenaux anastomosés où se développe une végétation aquatique abondante. Certains indices sur les images (notamment la forme géométrique des surfaces végétalisées) indiquent qu'on s'y adonne localement à la riziculture. En général, les crêtes sableuses entre les chenaux restent

Tableau I. Synthèse des données satellitaires, aérophotographiques et de terrain utilisées dans cette étude

	Site de Ségou	Site de Bobo-Dioulasso
Images satellitaires	HRV XS, 09-10-1986, R 2°1, 11:03:25, KJ 43-323	HRV XS, 08-09-1990, L 17°, 11:03:57, KJ 48-327 HRV XS, 26-10-1990, R 21°, 10:44:46, KJ 48-327 HRV XS, 09-08-1991, R 20°, 10:44:37, KJ 48327
Photographies aériennes	CCR : IRFC et couleurs, 1:2 500 - 1:12 000, 70 mm, 02-10-1986	IGB : NB, 1:50 000, 240 mm, 15-11-1981
Observations de terrain	Levé parcellaire, types de cultures	Reconnaissance

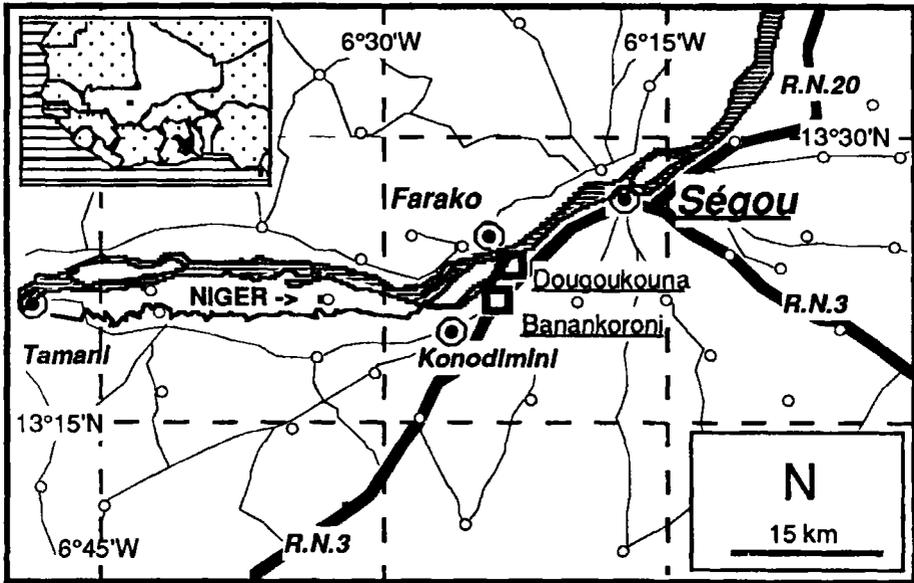


Figure 3. Zone de Ségou avec localisation du site-test de Banankoroni-Dougoukouna

libres de végétation. Les berges du fleuve peuvent recevoir quant à elles de petites parcelles de maïs.

En bordure du fleuve se trouvent les casiers rizicoles de Konodimini dépendant de l'Opération Riz Ségou. Ils sont séparés du fleuve par une simple digue en terre destinée à les protéger des crues trop abondantes, ce qui est devenu très rare ces dernières années. Ils sont alimentés par simple gravité grâce à une prise d'eau située à 40 km à l'amont (Tamarli), qui dérive les eaux durant la crue via un canal. Là où la lame d'eau est faible on cultive le riz dressé (*Oryza sativa*, d'origine asiatique), on réserve le riz flottant (*Oryza glaberrima*, d'origine locale) pour les parties profondes.

Au-dessus du lit majeur, le fleuve est bordé d'une large frange de sols sablo-limoneux de teinte grisâtre. Les champs y sont de taille modeste et peuvent recevoir des cultures spécifiques à ce milieu bien approvisionné en eau grâce à la présence à faible profondeur de la nappe phréatique alimentée par le fleuve. On trouve une première bande occupée de parcelles de manioc (*Manihot esculenta*) encloses de haies, et de mangueraias (*Mangifera indica*), et ensuite une deuxième bande où se rencontrent des cultures variées ainsi que des vergers d'agrumes (*Citrus spp.*). Toute cette frange se caractérise par la relative absence d'arbres hors des vergers, par l'absence de jachères et la faible taille du parcellaire.

Au-delà de cette frange fluviale se développent de grandes zones de culture pluviale (mil, sorgho, niébé, arachide, etc.) dans un paysage arboré dominé par le balézan (*Acacia albida*) et le karité (*Vitellaria paradoxa*).

Les cuirasses et les terres hors du domaine agricole sont occupées par un couvert arbustif à arboré de densité variable. Ces espaces sont soumis au pâturage des bovidés principalement. Cette activité se note par des auréoles de piétinement et par des couloirs de traversée du domaine cultivé pour abreuver le bétail au fleuve.

Sur l'image HRV utilisée, quatre types de surfaces nues peuvent se reconnaître : l'eau, les cuirasses, les bancs sableux du fleuve et les sols agricoles. Trois grands types de couvert

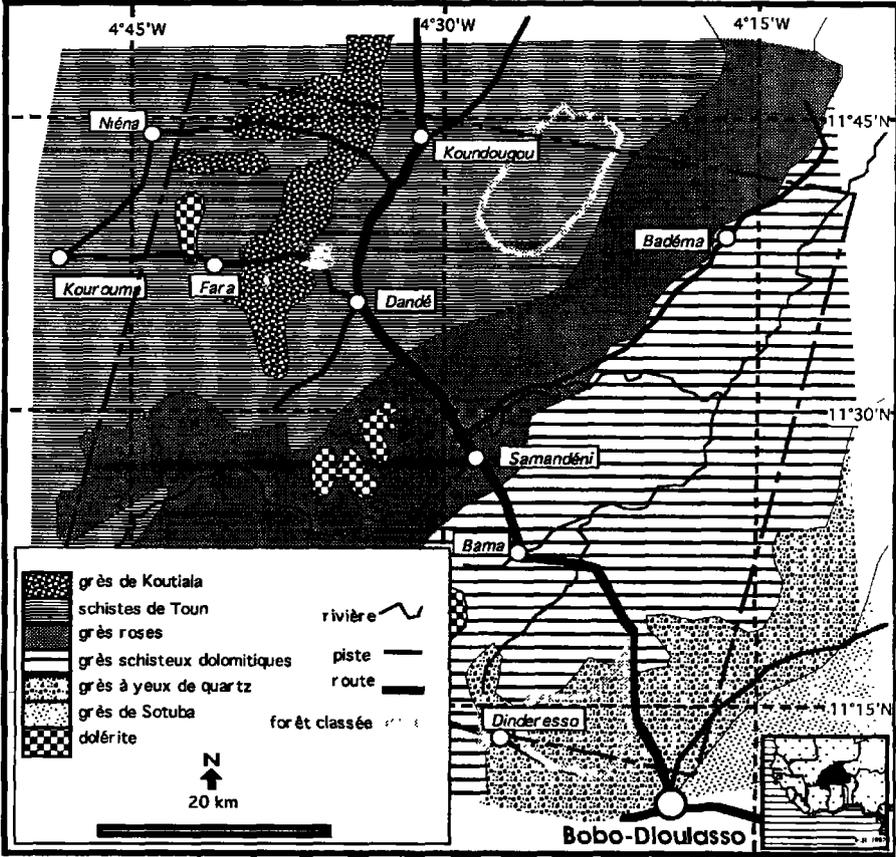


Figure 4. Zone de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso); le losange en tireté indique la zone couverte par les images HRV

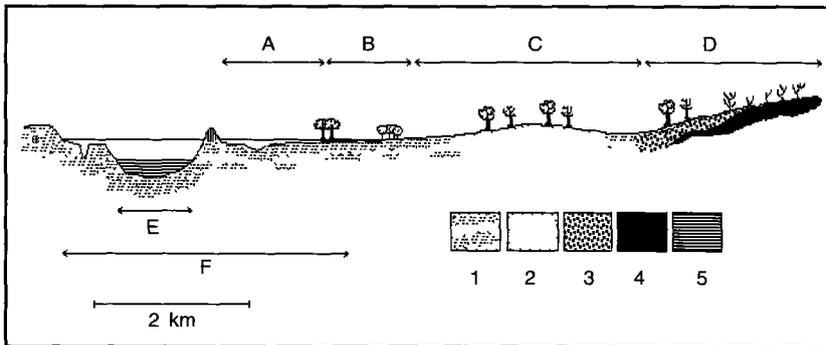


Figure 5. Profil descriptif du paysage dans la région de Ségou; A : casier rizicole, B : frange à cultures permanentes et vergers, C : cultures pluviales avec jachères, bicage de Karité et Balanzan, D : végétation semi-naturelle pâturée. E : lit mineur du Niger, F : lit majeur, 1 : sols argilo-limoneux (TI2 et PL9), 2 : sols sableux (TS3), 3 : dépôts gravillonnaires, 4 : cuirasse, 5 : rivière

végétal se discriminent : végétation herbacée dominante y compris les cultures, végétation ligneuse dominante non compris les vergers, végétation aquatique.

Les sols agricoles de la zone d'étude comprennent trois groupes selon la classification de l'Atlas des ressources terrestres du Mali (PIRT, 1983) :

- groupe TI2 (Typic Tropaqualfs) : sols hydromorphes à gley. Ces sols profonds se développent exclusivement sur alluvions fluviales à texture fine. Ils sont très mal drainés et se caractérisent par une forte gleyification. Ils sont spécifiquement associés à la riziculture par submersion contrôlée. Sur l'image HRV, ces sols sont déjà submergés;

- groupe PL9 (Plinthic Haplustalfs) : sols ferrugineux lessivés à pseudogleys ou taches et concrétions. Ce sont des sols profonds imparfaitement drainés développés sur alluvions. Quand elle est sèche, la surface est gris clair, ou brun grisâtre. Ces sols seront simplement appelés «sols gris» par la suite;

- groupe PS3 (Ultic Haplustalfs) : sols ferrugineux lessivés. Ce sont des sols profonds sur alluvions sableuses. En contre-haut des précédents, ils sont bien drainés. Ils apparaissent bruns ou rouges en surface. Ces sols seront simplement appelés «sols rouges» par la suite.

Les deux derniers groupes sont essentiellement occupés par des cultures pluviales variées, avec jachère courte.

Les levés de terrain et les prises de vues aériennes se sont concentrés sur un site long d'environ quatre kilomètres et large de un kilomètre et demi, parallèle au fleuve et chevauchant la route nationale 3.

Les prises de vues ont été effectuées à l'aide d'un avion «ultra-léger motorisé» (GRÉGOIRE and ZEYEN, 1986; BARTHOLOMÉ *et al.*, 1988), elles ont été acquises à l'aide d'une caméra Hasselblad modèle 500ELX, équipée d'un objectif de 80 mm Planar. Pour les prises de vues en infrarouge fausses couleurs, la chambre était équipée d'une optique de 50 mm Distagon avec porte-filtre. Le déclenchement de l'appareil était assuré par un intervallo-mètre. Trois types différents de pellicule ont été utilisés : Kodak Vericolor II (négatif couleurs), Kodak Aerochrome MS 2448 (positif couleurs naturelles) et Kodak Aerochrome infrared 2443 (positif IRFC).

Les levés de terrain, photographies aériennes et données satellitaires ont été combinés de la manière suivante.

On a d'abord visualisé la bande vidéo des passages à l'altitude la plus élevée, enregistrée simultanément aux prises de vues par ULM, et on a établi à main levée le tracé des pistes et des limites du parcellaire à partir de cette visualisation. Les observations de terrain récoltées sur un cheminement d'environ 6 km ont été localisées sur cette ébauche de plan parcellaire.

Les limites des parcelles ont ensuite été tracées de manière systématique sur la mosaïque non contrôlée des photos aériennes 70 mm à l'échelle du 1:2 500. La carte d'occupation du sol a été établie sur cette base par photo-interprétation, en se référant aux observations collectées sur le terrain.

En superposant le calque du parcellaire à l'image HRV on a finalement sélectionné une trentaine de parcelles pour lesquelles les signatures spectrales ont été extraites des données satellitaires. Les taux de recouvrement correspondants ont été mesurés par comptage à l'aide d'une grille de points superposée à des agrandissements des photos aériennes à une échelle de l'ordre du 1:580.

2.2. Le site de Bobo-Dioulasso

La zone étudiée, située au nord-ouest de Bobo-Dioulasso, recouvre des terrains sédimentaires s'étendant sur le Précambrien et le Paléozoïque, sans que la concordance des stratotypes soit

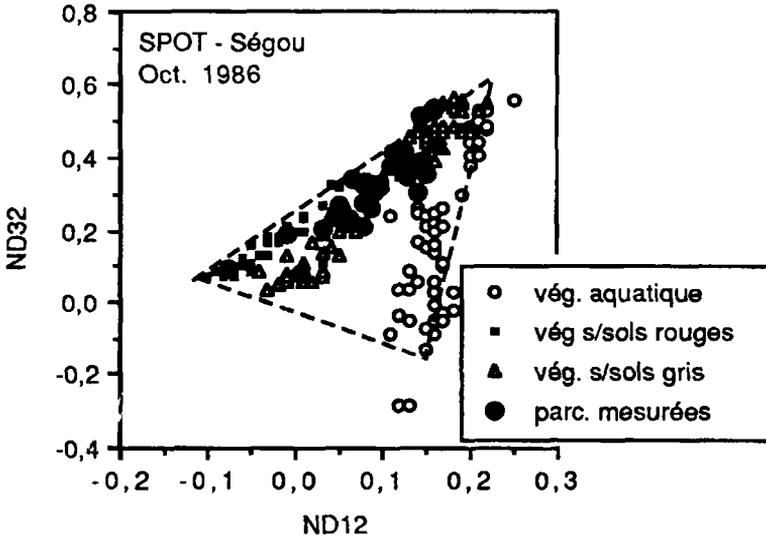


Figure 6. Site de Ségou : triangle de convergence des trajectoires pour diverses cibles définies par interprétation de l'image HRV, et superposition des valeurs correspondant aux parcelles dont le recouvrement a été mesuré sur photos aériennes (voir aussi fig. 9)

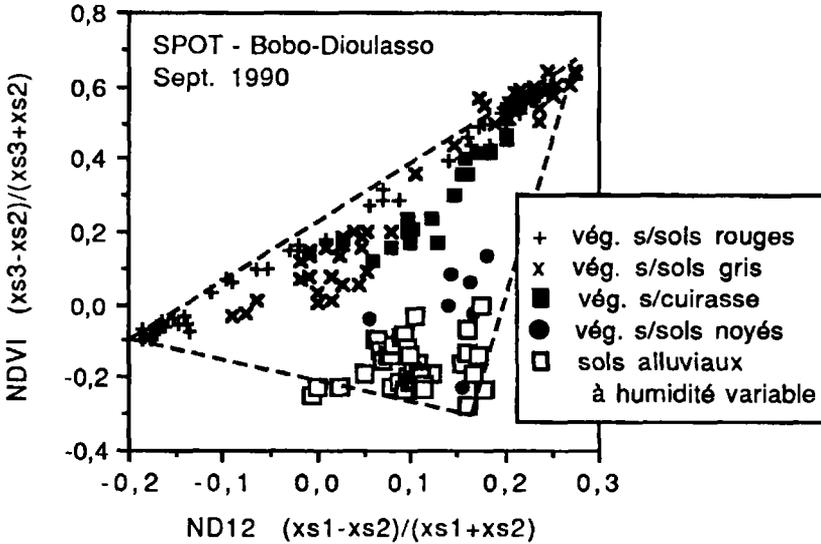


Figure 7. Site de Bobo-Dioulasso : triangle de convergence des trajectoires pour diverses cibles définies par photo-interprétation de l'image HRV

vraiment établie avec précision. Les couches ont un pendage général vers le nord-ouest et sont localement recoupées par des intrusions de dolérite d'âges variés (fig. 7). L'assise des grès à yeux de quartz se singularise sur l'imagerie satellitaire par une tonalité indicatrice de sols fortement rubéfiés, classés comme «sols ferrugineux tropicaux» et «sols ferrallitiques» sur la carte de reconnaissance des sols au 1:500 000 (MOREAU *et al.*, 1969). Par contraste, l'assise des grès schisteux et dolomitiques détermine la redistribution de calcaire et de magnésium dans les sols sus-jacents et spécialement le long du réseau hydrographique (RIEFFEL *et al.*, 1969). Ces sols présentent des couleurs de surface tendant vers le grisâtre.

Toute la région est soumise depuis une vingtaine d'années à un accroissement important des superficies cultivées lié à l'arrivée de nombreux migrants originaires des plateaux Mossi (OUATTARA, 1988). Les cultures pratiquées sont principalement le sorgho, le mil, le maïs, l'arachide et le coton. La riziculture y est également intensément pratiquée, soit dans les zones aménagées (Bama, Banzon), soit dans les zones inondables du Mou Houn et de ses affluents. Les espaces non agricoles se présentent comme une savane arborée. Localement dans les réserves forestières, la canopée du couvert ligneux peut atteindre et dépasser 75% de recouvrement.

Sur cette zone, une série de sites-cibles ont été sélectionnés par photo-interprétation visuelle de la composition colorée HRV complétée de l'image «indice de végétation» correspondante, de documents cartographiques (géologie, pédologie, types d'occupation du sol), de photographies aériennes au 1:50 000 et d'observations de terrain. Les critères de choix des sites étaient la diversité des types de sol et la variabilité de densité apparente du couvert végétal. Les comptes numériques correspondants ont été organisés selon les grands types de couleur de sol (fig. 7).

3. Résultats

L'analyse statistique d'une image HRV de Bobo-Dioulasso indique que la différence normalisée des canaux vert et rouge ne représente pas préférentiellement une bande spectrale originale ou un néo-canal particulier. Les corrélations s'observent dans l'ordre décroissant avec le NDVI, les simples différences XS3-XS2 et XS1-XS2, XS2, et enfin XS1. Fort logiquement la corrélation la plus basse s'observe avec le canal XS3 qui n'entre pas dans le calcul de l'indice étudié. Par contre, il est intéressant de noter l'assez bonne corrélation avec les indices de végétation ($R = 0,78$ pour le NDVI et $0,7$ pour la simple différence). Cette observation peut s'expliquer comme suit. Un indice de végétation croissant traduit un accroissement de la réflectance dans l'infrarouge simultanément à une réduction de la réflectance dans le rouge. Parallèlement, on assiste à une inversion de la pente du profil spectral entre le vert et le rouge au fur et à mesure qu'on passe d'une situation de sol nu à une situation de sol masqué par la végétation. Dans le premier cas, la réflectance s'accroît régulièrement avec la longueur d'onde, tandis que dans le deuxième cas l'absorption du rouge par les pigments chlorophylliens est nettement supérieure à celle du vert. Ainsi donc, la forte redondance entre les canaux rouge et vert cache une information congruente avec celle de l'indice de végétation, tout en trouvant son origine dans des comportements radiométriques spécifiques.

Les figures 6 et 7 confirment cette interprétation. En fonction de la nature et de la couleur de l'arrière-plan, on peut définir des trajectoires quittant le sol nu avec des indices normalisés XS1-XS2 bien différenciés, et secondairement de légères différences d'indices NDVI dues à la non-superposition de la ligne des sols avec l'isoline NDVI = 0. Avec l'accroissement de

densité de végétation, ces trajectoires convergent vers une zone qu'on peut supposer devoir se réduire à un point. En effet, lorsque le couvert végétal est complet, le sol n'interfère plus dans le signal reçu dans des longueurs d'onde du visible. La variabilité résiduelle peut être attribuée, d'une part, à de légères différences de couleur entre espèces végétales et, d'autre part, à des effets de sénescence (jaunissement du feuillage). Contrairement à ce qui était observé sur le graphique XS3-XS2 (fig. 1 et 8), les trajectoires sont ici rectilignes. Le point défini par la convergence de ces trajectoires correspond à des taux de recouvrement observés de l'ordre de 100% (fig. 6 et 9). La simple interprétation de la forme des trajectoires permet donc de localiser ce point. La relation entre indice de végétation NDVI et pourcentage de recouvrement tendant vers la linéarité (BARTHOLOMÉ, 1989), la position observée sur le graphique binormalisé de la ligne des sols nus d'une part, et du point de convergence associé au recouvrement total d'autre part permet d'étalonner le NDVI en termes de pourcentage de recouvrement. Lorsque l'observation satellitaire est enregistrée à une période où la végétation n'est pas à son plein développement, le triangle est tronqué.

4. Discussion

On peut émettre l'hypothèse que dans le cas où la dynamique des indices de végétation est tronquée, l'extrapolation des trajectoires permet de localiser le point théorique de convergence, mais cela n'a pas encore pu être vérifié expérimentalement.

Les mesures de recouvrement servent uniquement à confirmer la validité de l'hypothèse «point de convergence = recouvrement de 100%». Dans la mesure où des répétitions de cette

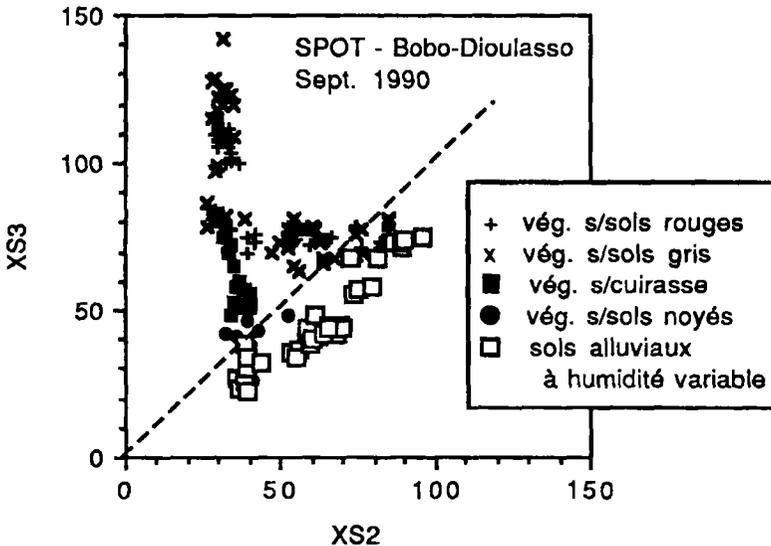


Figure 8. Site de Bobo-Dioulasso : trajectoires de la radiométrie HRV en fonction de la densité apparente de la végétation et du comportement spectral de l'arrière-plan sol; noter la très grande variabilité dans l'infrarouge pour les valeurs minima dans le rouge et la position sous la ligne NDVI=0 de la ligne des sols

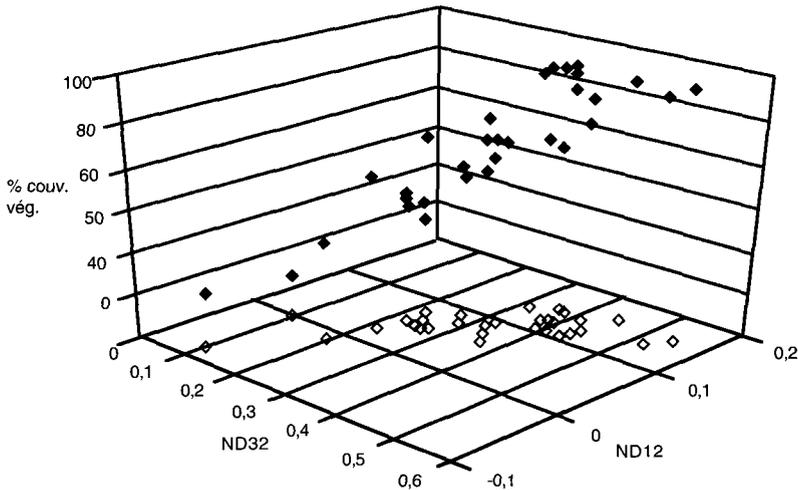


Figure 9. Site de Ségou : relation entre les différences normalisées XS3-XS2 et XS1-XS2 et le taux de recouvrement mesuré par parcelle

expérimentation préliminaire la confirmeront, il ne sera plus nécessaire de faire appel systématiquement à des observations de terrain, les mesures significatives pouvant être effectuées directement sur l'image par sélection visuelle des sites appropriés.

Les observations menées ici n'ont fait appel à aucune correction radiométrique ou atmosphérique. Il est clair que les données utilisées sont contaminées par ces effets. Cependant, les modèles actuels ne peuvent que corriger les défauts systématiques, et non les variations locales dues par exemple à un voile atmosphérique local. De plus, elles peuvent requérir des mesures des caractéristiques atmosphériques qui sont difficilement disponibles pour les zones sahéliennes. En fait ces perturbations se traduisent sur le graphique binormalisé par des échelles plus ou moins larges, et par des valeurs absolues variables de la ligne des sols et du point de convergence. La figure 7 illustre ce point. Alors que la réflectance de la plupart des sols nus est supérieure dans l'infrarouge à celle du rouge, entraînant des valeurs de NDVI supérieures à 0, cette figure dérivée d'une image HRV de septembre 1991 montre des valeurs de NDVI sur sols nus systématiquement négatives. Ce phénomène est à attribuer soit à l'étalonnage des capteurs soit à l'atténuation de Rayleigh (vapeur d'eau). Indépendamment de la cause de cette perturbation, le graphique binormalisé permet de réajuster empiriquement le NDVI en termes de recouvrement.

Le point de convergence apparaît dans la réalité comme une zone plus ou moins large. On a déjà évoqué précédemment la question de la couleur et du jaunissement du matériel végétal. Les modèles de réflectance suggèrent aussi qu'en théorie la structure du couvert végétal n'est pas sans influence sur la relation NDVI pourcentage de recouvrement. Il reste à vérifier si ce paramètre est à prendre en compte pour des mesures satellitaires dont les pixels intègrent divers types de couvert. Dans l'affirmative, l'effet de la visée angulaire serait aussi à intégrer dans le calcul.

Néanmoins, malgré ces multiples inconnues et limitations, l'approche proposée constitue une méthode raisonnablement réalisable en conditions réelles pour d'une part tenter d'étalonner de manière empirique les données à basse résolution telles que les indices de végétation dérivés des données AVHRR, et pour d'autre part confronter les résultats des modèles déterministes à la réalité du terrain qu'il n'est matériellement pas possible de décrire d'une manière suffisamment détaillée à l'aide des seules méthodes classiques de mesures *in situ*.

5. Conclusions

L'étude présentée ici a permis une évaluation préliminaire de l'utilité du graphique binormalisé pour étalonner les indices de végétation en termes de pourcentage de recouvrement par la végétation. Les premières observations indiquent la faisabilité de l'approche proposée. Elles montrent la nécessité d'en vérifier le bien-fondé par des expérimentations complémentaires, et l'utilité d'évaluer sa sensibilité à la structure de la végétation et à la visée oblique.

6. Remerciements

Les données du site de Ségou ont été collectées dans le cadre de la collaboration du Centre commun de recherche (C.C.R.) avec le projet du Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel intitulé «Surveillance des ressources naturelles renouvelables au Sahel» et financé par le Fonds européen de développement. Des remerciements particuliers s'adressent à J.-M. Grégoire, R. Zeyen et G. Bonvini du C.C.R., et à F. Ouattara et P. Delorme du projet «Surveillance» qui ont tout mis en oeuvre pour la réussite de la campagne de terrain. Ce travail n'aurait pu se réaliser sans la fructueuse collaboration du personnel de la Direction nationale de la cartographie et de la topographie à Bamako, et de l'Opération riz Ségou à Ségou. Dans la région de Bobo-Dioulasso, nous avons bénéficié du support actif et efficace du service de statistique de la Direction des études et programmes du Ministère de l'agriculture, et de l'Institut géographique du Burkina. Que tous trouvent ici l'expression de ma gratitude.

7. Références

- ALLEN, W. and RICHARDSON, A. 1968. Interaction of light with a plant canopy. *Optical Society of America*, vol. 58, p. 1023-1031.
- ASRAR, G., FUCHS, M., KANEMASU, E. T. and HATFIELD, J. L. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, vol. 76, p. 300-306.
- BARET, F. 1988. Un modèle simplifié de réflectance et d'absorptance du couvert végétal. Actes du quatrième colloque sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Aussois-Modane, France, ESA-SP 287, p. 113-120.
- BARET, F., GUYOT, G. and MAJOR, D. 1989. TSAVI : a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'89*, Vancouver, Canada, p. 1355-1358.
- BARTHOLOMÉ, É., GRÉGOIRE, J.-M. and ZEYEN R. 1988. Small format air photo from ultralight aircraft as an aid for data collection of agricultural statistics in Sahelian countries. *Proceedings IGARSS'88*, Edinburgh, ESA SP-284 (IEEE 88CH2497-6), p. 269-270.
- BARTHOLOMÉ, É. 1989. Calibration of vegetation indices for APAR measurements using intrinsic satellite image information. *Proceedings of the Remote Sensing Society annual conference*, University of Bristol, p. 47-52.
- CRIPPEN, R. E. 1988. The dangers of underestimating the importance of data adjustments in band ratioing. *International journal of remote sensing*, vol. 9, n° 4, p. 767-776.

- ELVIDGE, C. D. and LYON, R. J. P. 1985. Influence of soil-rock spectral variation on the assessment of green biomass. *Remote sensing of environment*; vol. 17, p. 265-279.
- GAUSMAN, H. W. 1985. Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light. Texas Technical Press, Lubbock, Texas, 78 p.
- GRÉGOIRE, J.-M. and ZEYEN, R. 1986. An evaluation of ultralight aircraft capability for remote sensing applications in West Africa. *International journal of remote sensing*, vol. 7/8, p. 1075-1081.
- HATFIELD, J. L., ASRAR, G. and KANEMASU, E. 1984. Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote sensing of environment*, vol. 14, p. 65-75.
- HOLBEN, B. and JUSTICE, C. 1981. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *International journal of remote sensing*, vol. 2, n° 2, p. 115-133.
- HUBAUX, A., FERRARI, G. et GRÉGOIRE, J.-M. 1985. Suivi radiométrique de cultures vivrières en zone sahélienne. Actes du colloque signatures spectrales d'objets en télédétection, Les Arcs, France, p. 443-449.
- HUETE, A. R. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, vol. 25, p. 295-309.
- JACKSON, R. D., SLATER, P. N. and PINTER, P. J. Jr. 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote sensing of environment*, vol. 13, p. 187-208.
- KAUTH, R. J. and THOMAS, G. S. 1976. The tasseled cap - a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings Symposium on Machine Processing of Remote Sensing Data, LARS, Purdue University, West Lafayette*, vol. 4b, p. 41-51.
- KUMAR, M. 1988. Crop canopy spectral reflectance. *International journal of remote sensing*, vol. 9/2, p. 285-294.
- MONTEITH, J. L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, n° 9, p. 747-766.
- MOREAU, R., GUICHARD, E., LEPRUN, J.-C. et POTTIER, J.-C. 1969. Carte pédologique de reconnaissance de la république de Haute-Volta au 1:500 000. Feuille Ouest-Nord. Centre ORSTOM de Dakar.
- OUATTARA, N. 1988. L'évolution des activités agricoles dans la zone ouest du Burkina Faso. La confrontation des espaces ruraux avec des sollicitations nationales concurrentes. L'exemple des Hauts Bassins. Thèse de troisième cycle, Université de Caen, Département de géographie, 250 p.
- PERRY, C. R. and LAUTENSCHLAGER, L. F. 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote sensing of environment*, vol. 14, p. 169-182.
- PIRT 1983, Atlas des ressources terrestres du Mali. USAID-TAMS, New-York, 3 vol.
- RIEFEL, J.-M., MOREAU, R., FAUCK, R., GUICHARD, E. et MERCKY, P. 1969. Étude pédologique de la Haute-Volta, Région : Sud-Ouest - notice. Centres ORSTOM de Dakar-Hann et Adiopoumé, 250 p.
- RICHARDSON, A. J. and WIEGAND, C. L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, n° 12, p. 1541-1552.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. and HARLAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Grennbelt, Maryland, 50 p.
- SELLERS, P. J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, n° 8, p. 1335-1372.

Le graphique «binormalisé» : un outil d'étalonnage des indices de végétation

- SELLERS, P. J. 1987. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote sensing of environment*, vol. 21, p. 143-183.
- SLATER, P. N. and JACKSON, R. D. 1982. Atmospheric effects on radiation reflected from soils and vegetation as measured by orbital sensors using various scanning directions. *Applied Optics*, vol. 21, n° 21, p. 3923-3931.
- STONER, E. R., BAUMGARDNER, M. F., WEISMILLER, R. A., BIEHLN L. L. and ROBINSON, B. F. 1980. Extension of laboratory-measured soils spectra to field conditions. *Soil Science Society American Journal*, vol. 44, p. 572-574.
- STONER, E. R. and BAUMGARDNER, M. F. 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society American Journal*, vol. 45, p. 1161-1165.

16

Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour une meilleure évaluation des formations végétales actives

PHILIPPE CHAMARD*, MARIE-FRANÇOISE COUREL*,
MICHÈLE DUCOUSSO*, MARIE-CLAIRE GUÉNÉGOU**,
JEANNINE LE RHUN* et ***, JACQUES-ÉDOUARD LEVASSEUR**,
CATHERINE LOISEL**** et MÉMÉ TOGOLA*** et *****

**Laboratoire IMAGEO/CNRS, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France;
téléphone : (33) (1) 43-29-82-60; télécopie (33) (1) 43-29-63-83*

***Laboratoire de botanique, Université de Rennes I, 35042 Rennes cedex, France;
téléphone : (33) 99-28-69-58; télécopie : (33) 99-28-67-00*

****Laboratoire de géomorphologie, École pratique des hautes études, IMAGEO/CNRS,
191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France; téléphone : 33 (1) 43-29-82-60;
télécopie : 33 (1) 43-29-63-83*

*****École nationale d'ingénieurs des techniques des industries agricoles et alimentaires,
chemin de la Géraudière, 44000 Nantes, France; téléphone : (33) 40-40-03-00*

******Centre de recherches zootechniques de Sotuba, B. P. 262, Bamako, Mali;
téléphone : (223) 22-41-92*

Résumé

Le delta central du Niger au Mali, hydrosystème d'une superficie de 15 000 km², est inondé chaque année de juillet à novembre; l'évolution des formations végétales actives y est déterminée par l'ampleur de la crue. Un indice de verdure utilisant les données spectrales dans les longueurs d'onde du vert et du rouge (vert - rouge / vert + rouge) s'est révélé performant

pour identifier les différentes formations. En laboratoire, une relation étroite a été établie entre cet indice de verdeur et le chroma (pureté de la teinte) : corrélation de 0,85, significative à 0,1%. Cette relation montre que l'indice de verdeur est pertinent pour discriminer des groupements végétaux présentant des états phénologiques identiques dans des conditions hydro-environnementales particulières, comme c'est le cas dans les plaines du delta pendant la période des hautes eaux.

1. Introduction

Le delta central du Niger, situé dans le Sahel malien, couvre une superficie de 15 000 km² (fig. 16-1, voir cahier couleur). Cette région est, au plan international, considérée comme une des zones humides les plus importantes de la planète. Il s'agit d'une immense plaine quasi horizontale (sa pente n'est que de 0,5%) parcourue par un lacs complexe de défluent : les mayos. C'est par l'intermédiaire de ce labyrinthe hydrographique que les eaux du Niger et du Bani inondent les plaines du delta et remplissent les lacs Debo et Walado de la fin juillet à la fin novembre. Le Niger et le Bani apportent à la zone d'inondation 70 milliards de m³ d'eau dont la moitié seulement s'en échappe en aval du Débo. Au moment des hautes eaux, «Tiolté», la monotonie de l'immense tapis vert-émeraude (fig. 16-2, voir cahier couleur) formé par les vétiveraies, les prairies à panicées, les oryzaies et les bourgoutières n'est rompue que par les levées alluviales (péroud'i) et les tertres (tougué) sur lesquels sont bâtis les villages peuls et bozo.

Les potentialités du delta sont remarquables, mais difficiles à exploiter rationnellement, tant elles sont assujetties aux conditions pluviométriques et hydrologiques (HIERNAUX *et al.*, 1989). Les pâturages, riches et abondants, ont une production élevée : celle des bourgoutières par exemple varie entre 10 et 30 tonnes de matière sèche par hectare. La superficie totale des bourgoutières peut atteindre en cas de bonne crue 800 000 hectares, et seulement 50 000 à 200 000 hectares en cas de crue très faible comme celle de 1983 (FRANÇOIS *et al.*, 1989).

Depuis 20 ans, la crise climatique qui sévit en Afrique de l'Ouest (COUREL *et al.*, 1984) a profondément modifié le régime des crues du Niger, réduisant l'étendue et la durée de submersion des plaines inondées du delta central (FRANÇOIS *et al.*, 1991).

Les résultats présentés ici ont été obtenus dans le cadre d'un programme de recherche visant à établir, à partir de l'imagerie satellitaire, un inventaire et une cartographie dynamique des différentes unités de paysage qui composent ces milieux inondables.

2. Matériel et méthode

Les traitements effectués sur les canaux rouge et proche-infrarouge (classifications automatiques et supervisées, indices divers) isolent, sur les images satellitaires HRV de SPOT du 3 janvier 1989 et du 7 janvier 1990, les différentes formations végétales actives, sans pouvoir cependant discriminer les différentes formations aquatiques. Les données spectrales du vert et du rouge sont habituellement très corrélées, mais il s'avère que, dans le cas de formations vertes denses et très couvrantes, telles les bourgoutières ou les oryzaies, les informations distinctes fournies dans ces canaux apportent des renseignements spécifiques intéressants sur l'état phénologique des espèces.

Partant du constat que, pour un même stade phénologique, la couleur des différentes espèces végétales n'est pas identique, nous avons entrepris de rechercher s'il existait une

relation entre les caractéristiques de la couleur et les données de la réflexion dans les canaux S1 (vert) et S2 (rouge) de HRV. Pour cela, nous avons choisi d'analyser la couleur au maximum de l'activité photosynthétique du feuillage chez différentes espèces et tenté de mettre en évidence la valeur discriminante d'un indice de verdeur dans l'utilisation des données satellitaires.

La couleur d'une végétation est analysée à l'aide de trois caractéristiques : la teinte, liée à la longueur d'onde dominante (ici, le vert), la saturation ou pureté de la teinte et la clarté, caractéristique d'intensité (vert clair ou foncé). Ces trois caractéristiques interviennent à des degrés divers dans les données de réflexion ou d'absorption de la lumière par la végétation.

À l'aide d'un indice de verdeur appelé NDGI (Normalized Difference Greenness Index), calculé à partir des données dans les bandes verte et rouge (V-R/V+R), nous avons effectué une cartographie des formations végétales (fig. 16-3 et 16-4, voir cahier couleur).

Parallèlement, en Bretagne, des mesures de réflexion diffuse ont été réalisées à partir de 13 espèces végétales à l'aide d'un spectrophotomètre (UVIKON 810P) muni d'une sphère d'intégration. Ces mesures ont été effectuées au cours du mois de mai 1991, c'est-à-dire au maximum de l'activité photosynthétique du feuillage considéré. Les valeurs retenues pour chacune des espèces correspondent à la face du limbe foliaire directement exposée au rayonnement solaire : face inférieure ou supérieure des feuillages, selon le cas, tiges pour les Salicornes. Les caractéristiques colorimétriques, calculées à partir du spectre de réflexion (entre 360 et 850 nm), sont exprimées dans le système $L^* a^* b^*$, la teinte par l'angle de teinte, la pureté par le chroma et la clarté par les valeurs de L^* (fig. 16-5, voir cahier couleur). L'indice de verdeur a été calculé à partir des aires des courbes de réflexion dans les longueurs d'onde des canaux HRV S1 et S2.

3. Résultats

3.1. Résultats des mesures en laboratoire

Le tableau I nous montre que l'angle de teinte est très peu variable; le coefficient de variation est en effet de 2,45%. Ce constat est logique du fait que les mesures, effectuées au maximum de l'activité photosynthétique, correspondent à un même état phénologique de ces végétaux. La réflexion est alors maximale dans le vert et minimale dans le rouge pour toutes les espèces. Le type même d'évaluation de l'angle de teinte ne justifie pas une mise en relation avec l'indice de verdeur.

Le chroma (ou saturation) évalue la pureté de la couleur. Le calcul de la régression linéaire fait apparaître une très forte corrélation de cette caractéristique avec l'indice de verdeur :

$$\text{Chroma} = f(\text{NDGI}) = 70,9 \text{ NDGI} - 8,07 \quad (r = 0,846).$$

Cette forte corrélation (fig. 6) (significative à 0,1%) s'explique par le fait que la saturation traduit la part d'énergie réfléchie dans la longueur d'onde dominante (le vert, canal S1 de HRV), par rapport à l'ensemble de l'énergie réfléchie.

Par contre, il n'y a pas lieu de rechercher une relation entre l'indice de verdeur et la clarté, laquelle traduit la quantité totale d'énergie du spectre. Une variation de la clarté entraîne une variation de l'ensemble du spectre, mais ne modifie pas obligatoirement l'indice de verdeur. En réalité, la clarté semble varier considérablement en fonction de la structure même du feuillage (observations non publiées).

Tableau I. Indice de verdeur (NDGI) et données colorimétriques des espèces étudiées, à partir d'une analyse au spectrophotomètre muni d'une sphère d'intégration

	NDGI	Angle Teinte	Chroma	Clarté
<i>Elymus pycnanthus</i> Meld.	36,9	129	17,67	44,3
<i>Festuca rubra</i> ssp. <i>littoralis</i> Auq.	42,5	123	25,37	41,4
<i>Puccinellia maritima</i> Parl.	40,3	125	20,89	39,8
<i>Phalaris arundinacea</i> L.	41,3	127	21,40	40,5
<i>Typha latifolia</i> L.	37,2	132	16,36	41,1
<i>Populus nigra</i> ssp. <i>pyramidalis</i> C.	33,5	128	14,71	36,8
<i>Populus canescens</i> (Ait) Smith	37,0	126	17,36	35,4
<i>Viburnum lantana</i> L. (Viorne)	39,4	126	19,87	37,5
<i>Hedera helix</i> L. (Lierre)	37,9	131	16,66	35,0
<i>Salicornia dolichostachya</i> Moss	34,4	122	17,21	33,2
<i>Halimione portulacoides</i> Aell.	30,3	126	15,06	48,4
<i>Suaeda maritima</i> Dum. (Soude)	35,8	128	15,37	38,7
<i>Aster tripolium</i> L.	31,5	125	16,19	42,3
Coefficient de variation (en %)	10,16	2,45	18,19	10,0

On sait que la teinte varie avec l'état phénologique des végétaux (et donc avec leur teneur en chlorophylle), entraînant des variations de la réponse spectrale au cours du temps. Cependant, nous constatons ici que la teinte est très peu variable au maximum de l'activité photosynthétique, et de ce fait, ne modifie pas sensiblement la réponse spectrale d'une espèce à l'autre dans les conditions d'observation présentes. Par contre, les variations de la saturation (chroma) et de la clarté influencent nettement les courbes de réflectance. Ces variations intègrent non seulement la teneur en chlorophylle, mais aussi les éléments de la structure de surface des feuillages : poils et reliefs épicuticulaires, pruines (FELDHAKÉ, 1990), ainsi que les éléments de la structure anatomique : répartition des chloroplastes dans l'épaisseur du limbe, présence ou absence de tissu lacuneux, c'est-à-dire d'espaces intercellulaires, dont on sait déjà qu'ils interviennent fortement dans la transmission et la diffraction du rayonnement solaire (HOWARD, 1970).

3.2. Analyse des images

Sur les figures 16-3 et 16-4 (voir cahier couleur), les formations végétales sont distinguées en fonction de l'indice NDGI. Le rouge, indice le plus élevé en valeur, correspond aux formations très vertes et totalement couvrantes; seules les bourgoutières denses sont susceptibles de donner une telle réponse. Le vert, du plus foncé au plus clair en fonction de la valeur décroissante de l'indice, représente les oryzaies et les riz cultivés, les formations arbustives denses de levées ou les vétiveraies des secteurs exondés.

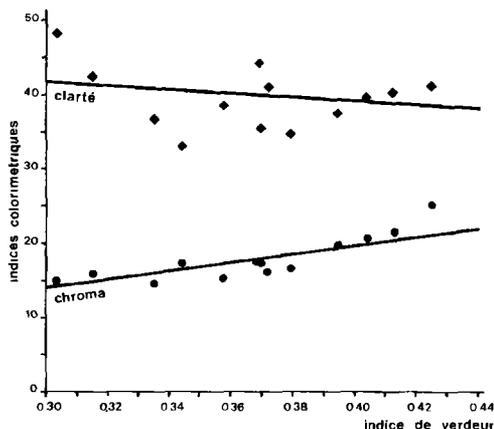


Figure 6. Corrélation entre indice de verdure et données colorimétriques (chroma et clarté)

L'orange et le jaune (indice faible) traduisent la présence d'une végétation graminéenne très discontinue au stade du jaunissement. Le blanc correspond aux sols nus, argileux et secs des levées anciennes ou des dunes insubmersibles. La comparaison des deux images (fig. 16-3 et 16-4, voir cahier couleur) révèle que l'état phénologique des formations en janvier est différent selon l'année considérée. En 1989, l'ensemble de la végétation était à un stade plus avancé qu'en 1990. Ceci apparaît très nettement dans les secteurs cultivés et les oryzaies; en 1990, ces formations sont encore très vertes.

La superposition des deux images (fig. 16-7 : 1989 en rouge, 1990 en vert, voir cahier couleur), montre que les surfaces végétalisées étaient plus étendues en 1989 qu'en 1990, comme l'attestent les plages rouges. De même, la prédominance du vert indique une activité chlorophyllienne plus intense en 1990 qu'en 1989.

Le fait que les unités végétales soient encore en pleine activité chlorophyllienne en janvier 1990 peut être mis en relation avec les modalités de l'inondation, donc avec les caractères de la crue : importance des débits, durée des hautes eaux, date de début et de fin de la crue. La moindre extension des formations végétales en janvier 1990 suggère une crue faible en 1989. Les relevés des stations hydrologiques de Kara sur le Diaka, principal défluent du Niger et de Mopti sur le Niger, confirment ces hypothèses et permettent de préciser que les modules et les débits mensuels ont été plus importants en 1988 qu'en 1989, que la durée des hautes eaux a été la même ces deux années là (93 et 94 jours) et que le début de l'inondation et de la décrue a été plus précoce en 1988 qu'en 1989 (25 juillet et 30 octobre en 1988; 11 août et 13 novembre en 1989).

4. Discussion et conclusion

L'indice de verdure NDGI et l'indice de végétation NDVI extraits des images satellitaires sont sujets à des variations importantes liées aux conditions atmosphériques au moment de l'enregistrement (QI *et al.*, 1991).

On sait que dans le Sahel la poussière est une constante de l'atmosphère. Mais lors de concentration abondante par brume sèche, le trouble atmosphérique correspond à un fort accroissement des particules d'un rayon supérieur à 0,2 µm. Ces particules jouent un rôle

prépondérant dans les longueurs d'onde de 0,443 et 1,58 μm (COUREL, 1985; CERF *et al.*, 1982), leur albédo de diffusion est de l'ordre de 0,96 à 0,94.

Actuellement la correction des effets atmosphériques pose encore d'énormes problèmes en l'absence de secteurs de calibrage radiométriquement stables; c'est la raison pour laquelle nous nous sommes assurés des conditions atmosphériques optimales (épaisseur optique inférieure à 0,3) sur les régions qui ont donné lieu aux enregistrements satellitaires utilisés.

En ce qui concerne l'étalonnage des bandes HRV, les facteurs d'amplification utilisés dans les deux cas contribuent à uniformiser correctement les données. Les vérifications de cohérence de luminance ont été effectuées sur les sols nus et les zones en eaux libres. Il est bien évident qu'en cas de variations trop importantes il est nécessaire d'appliquer un facteur de pondération.

Il apparaît donc que l'indice de verdure NDGI permet de faire une cartographie fine et diachronique des formations végétales en pleine activité chlorophyllienne. La discrimination des différentes unités s'explique par la bonne corrélation entre l'indice de verdure et le chroma. Il reste à affiner ces recherches en effectuant des mesures colorimétriques sur le matériel végétal du delta dont la teneur en chlorophylle aura été calculée à partir du poids sec et des mesures radiométriques en liaison avec la composition et la structure architecturale de la végétation. Il s'agit en effet d'établir des relations entre les pigments, le chroma et l'indice, de préciser les causes des variations du chroma et de la clarté et de leurs effets sur le NDGI et le NDVI (indice de végétation).

Cette approche fine, qui pourrait améliorer très sensiblement la fiabilité des suivis des formations végétales, doit être poursuivie et validée. En effet, les relevés botaniques effectués par nos soins en 1988 et la comparaison des images 1989 et 1990 avec les cartes des pâturages réalisées mais non publiées par le Centre international pour l'élevage en Afrique (CIPEA, Bamako, Mali) mettent en évidence les remarquables changements phytogéographiques intervenus dans le delta au cours de la dernière décennie.

5. Références

- CERF, A., FOUQUART, Y., BONNEL, B., BROGNIEZ, G., CHAOUI ROQUAI, M. et SMITH, L. 1982. Propriétés radiatives des aérosols sahéliens. La Météorologie, 6^e série, n^{os} 29-30, Paris.
- COUREL, M. F., KANDEL, R. S. and RASOOL, S.I. 1984. Surface albedo and the Sahel drought. Nature, vol. 307, n^o 5951, p. 528-531.
- 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, publication IBM France, p. 288-300.
- FELDHAKÉ, C. M. 1990. Spectral characteristics of the light band on red clover (*Trifolium pratense* L.). Environmental and Experimental Botany, vol. 30, n^o 1, p. 111-115.
- FRANÇOIS, J., RIVAS, A. et COMPERE, R. 1989. Le pâturage semi-aquatique à *Echinochloa stagnina* (Retz) P. Beauv. Étude approfondie de la plante «Bourgou» des bourgoutières situées en zone lacustre au Mali. Bulletin de recherche des Facultés agronomiques de Gembloux, vol. 24, n^o 2, p. 145-189.
- FRANÇOIS, J., RIVAS, A., HELLEMANS, Ph. et COMPERE, R. 1991. Régénération des bourgoutières en zone lacustre du Mali par semis en décrue, technique basée sur des études agrométéorologiques et écophysiologicals. Bulletin de recherche des Facultés agronomiques de Gembloux, vol. 26, n^o 1, p. 169-181.

Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour l'évaluation des formations végétales

- HIERNAUX, P. Y., DIARRA, L. et MAIGA, A. 1989. Dynamique de la végétation sahélienne après la sécheresse. Un bilan du suivi des sites pastoraux du Gourma en 1988. Document du programme AZ 192, CIPEA, Bamako, 50 p.
- HOWARD, J. A. 1970. Aerial Photo-Ecology. Faber and Faber, London, 325 p.
- QI, J., HUETE, A. R., JACKSON, R. D., MORAN, S. S. and CHEHBOUNI, A. 1991. View atmosphere soil effect on vegetation indices derived from SPOT images. Proceedings of the 5th International colloquium on physical measurements and signatures in remote sensing, Courchevel, France, ESP SP-319, p. 785-790.

17

Méthode de cartographie des systèmes de culture en région de petites exploitations du nord-est de l'Argentine

ISABELLE DUVERNOY*, CHRISTOPHE ALBALADEJO*
et CLORINDA PERUCCA**

**Institut national de la recherche agronomique, Unité de recherche sur les systèmes agraires et le développement, Auzeville, B.P. 27, 31326 Castanet Tolosan cedex, France; téléphone : (33) 61-28-52-67; télécopieur : (33) 61-73-20-77; télex : 520009 INRATSE*

***Instituto nacional de tecnología agropecuaria, Centro regional de Misiones, Belgrano 540 3300 Posadas, Provincia de Misiones, Argentina; téléphone : (54) 752-35915*

Résumé

Ce travail est une réflexion sur des méthodes de reconnaissance et de suivi cartographiques des systèmes de culture en zones de petits parcelles agricoles. La finalité pratique pour les organismes publics de développement et d'aménagement est de pouvoir caractériser l'évolution des systèmes d'exploitation, à travers la cartographie des systèmes de culture. Sur le front pionnier de la zone subtropicale humide de Misiones (province au nord-est de l'Argentine), cette caractérisation permettra de déterminer, dans des délais compatibles avec l'action, l'évolution des systèmes d'exploitation plus ou moins fortement en déséquilibre avec leurs ressources. Le travail repose sur l'hypothèse de RUTHEMBERG (1980) de correspondance entre la structure de l'assolement et la gestion de la fertilité des sols, en tant qu'indication de la durabilité des systèmes. La démarche de recherche est la suivante : 1) zonage régional et choix d'une localité (2700 ha, 100 exploitations agricoles) représentative de la dynamique agricole en cours sur le front pionnier; 2) en région où n'existe pas de cartographie de terrain, à l'exception de la topographie, utilisation de photographies aériennes pour obtenir la carte des zones essartées, chacune ayant fait l'objet d'une enquête auprès des familles agricoles pour

réaliser un inventaire exhaustif des parcelles agricoles en 1984, 1988 et 1990; 3) phase d'identification de l'occupation du sol sur des images HRV de SPOT panchromatiques et multibandes (résolution 10 m X 10 m) 1989, 1990 et 1991 par comparaison avec la cartographie de terrain; 4) phase d'analyse exploitation par exploitation (chacune est un lot de colonisation de 27 ha en moyenne). Numérisation du cadastre et superposition avec les images, en s'aidant d'une image HRV panchromatique au niveau de correction 2B. Mise en correspondance de l'occupation du sol avec une caractérisation typologique des exploitations agricoles. L'originalité de ce travail réside dans une utilisation de l'identification culture par culture, pour arriver à la reproduction d'un diagnostic au niveau des systèmes d'exploitation. L'analyse exploitation par exploitation présentée ici utilise des résultats provisoires; l'objectif étant plutôt d'exposer les aspects méthodologiques.

1. Introduction

De précédents travaux sur les systèmes de production agricole ont montré l'importance de la prise en compte, pour comprendre les dynamiques en cours et pour mettre en oeuvre tout projet de développement, de leurs diversités de mises en valeur de l'espace (JOLLIVET, 1978). Cela signifie disposer d'un moyen de discriminer des modes d'utilisation du sol différents, de les mettre en relation avec des modes de gestion différents et les représenter cartographiquement afin de comprendre leurs agencements spatiaux.

Nous utilisons l'agriculture de la province de Misiones en Argentine (fig. 1) comme modèle. Misiones est une province qui était couverte à la conquête sur 90% de son territoire par la forêt originelle. La colonisation agricole n'a vraiment commencé qu'au début du XX^e siècle et même après 1950 pour toute la région nord-est de la province et centre-est (EIDT, 1971). Elle est encore en pleine phase de colonisation par de petits exploitants agricoles (fig. 1). Les évolutions sociales (démographie, mouvements migratoires, urgence sociale, etc.), techniques (transitions entre systèmes) et écologiques (disparition de la forêt primaire, évolution de la fertilité des sols, changement de structure du paysage) sont très rapides. Ces fortes dynamiques nous permettent d'observer des phénomènes dans des délais relativement brefs, et donc de tester nos hypothèses, modéliser et mesurer des paramètres d'évolution.

Des travaux récents de notre programme (ALBALADEJO, 1987; PERUCCA, 1991) ont mis au point des méthodes d'analyse et de discrimination des exploitations agricoles basées sur leurs tendances d'évolution et leurs capacités d'équilibration. Ces méthodes permettent de porter un diagnostic sur les capacités d'évolution ou de stabilité des exploitations en se basant sur le concept d'équilibration de la théorie des systèmes (PIAGET, 1967; LE MOIGNE, 1984). Ce diagnostic lui-même peut être élaboré de façon satisfaisante à partir des aspects paysagers des exploitations.

Notre objectif, dans cette communication, est d'évaluer en quoi ce diagnostic peut être porté à partir des aspects paysagers «zénithaux» [selon une expression de PINCHEMEL et PINCHEMEL (1988) qui désigne le paysage relevé par photographies aériennes ou images satellitaires] et plus précisément d'une série d'images HRV de SPOT panchromatiques (P) et multibandes (P+XS). La finalité pratique est une généralisation du diagnostic d'équilibration des systèmes d'exploitation à l'échelle de petites régions agricoles.

La question de recherche revient donc à se demander comment réaliser un diagnostic des tendances d'évolution d'un système agraire régional à partir de documents de télédétection.

Cette question générale de recherche présente un grand intérêt pratique dans des régions comme Misiones pour lesquelles les dynamiques d'évolution sont extrêmement rapides. Dans cette province, les recensements (agricoles ou de la population) et les relevés photo-aériens

Cartographie des systèmes de culture en région de petites exploitations du nord-est de l'Argentine

- IA : zone de Apóstoles. Plaine, bonnes terres, colons installés sur des surfaces de 25 à 100 ha (maté) et changeros.
- IB : zone de Posadas. Plaine, bonnes terres, grandes exploitations d'élevage (200 à 500 ha)
- II : zone côtière du Paraná. Plaine fortement ondulée. Bonnes terres, colons plantant du maté, nombreuses plantations forestières, nombreux changeros.
- IIIA : zone d'Oberá. Montagnes, terres d'aptitude moyenne, colons installés sur des lopins de la colonisation officielle et occupants spontanés.
- IIIB : zone d'Alem. Montagnes, terres de mauvaises aptitudes agronomiques, colons de la colonisation officielle et nombreux occupants spontanés.
- IVA : zone de San Vicente. Zone de montagne, en colonisation par des occupants spontanés, terres de très mauvaises aptitudes agronomiques.
- IVB : zone d'Aristóbulo del Valle. Zone de montagne, colons et occupants spontanés. Aptitude agronomique des terres moyenne.
- IVC : zone de El Soberbio. Idem que IVA mais très isolée du reste de la Province.
- V : zone de Bernardo de Irigoyen. Intérieur fluvial relativement plane, aptitude des sols basse à moyenne, majorité d'occupants spontanés.
- IV : zones vides, montagneuses, très peu colonisées ou vierges.

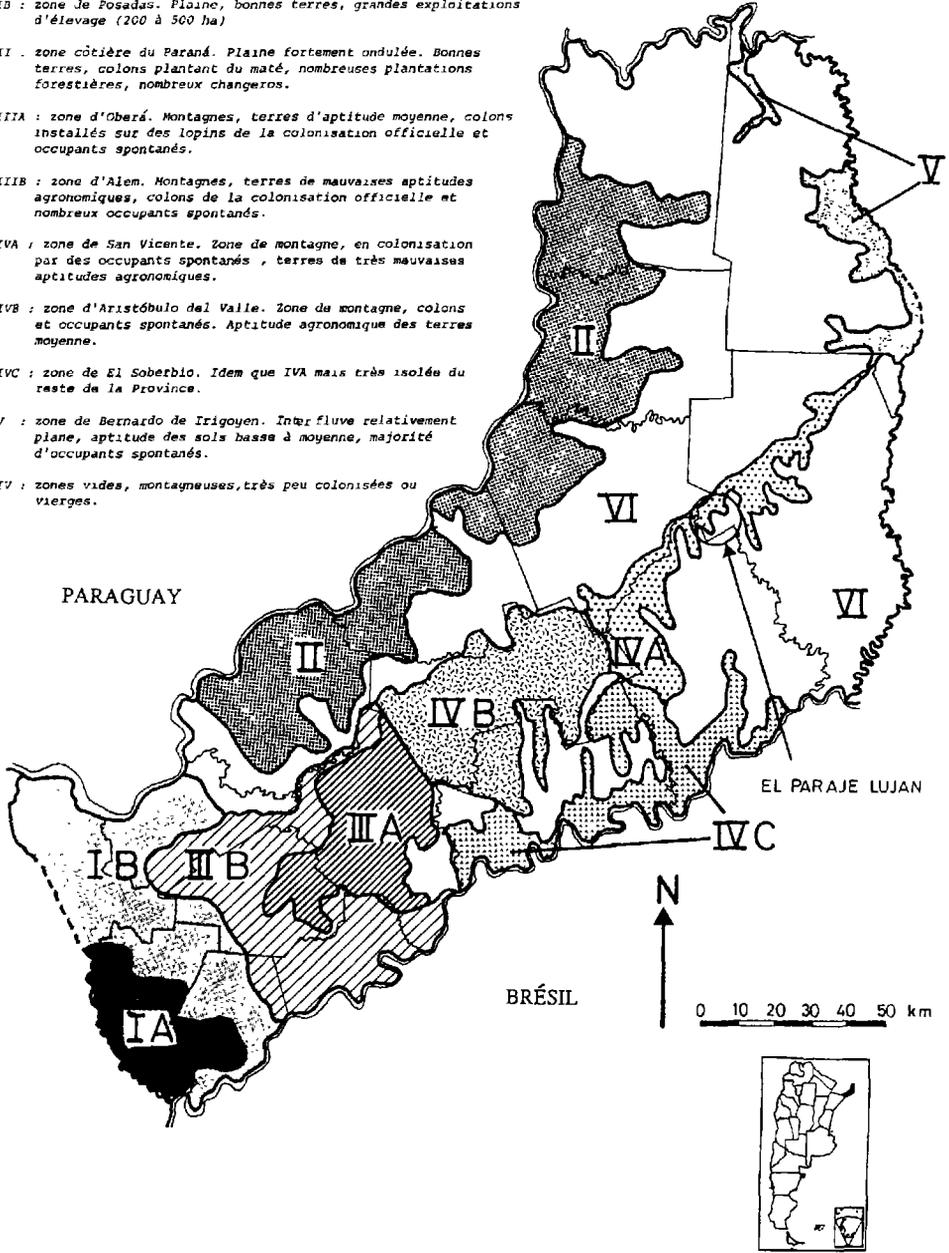


Figure 1. Les zones de développement à Misiones, Argentine

se succèdent avec une périodicité de 10 à 15 ans seulement et irrégulière car leur réalisation et leur traitement (très coûteux) dépendent de la situation économique des autorités publiques. De plus les traitements sont longs et coûteux. Pour donner un exemple, les résultats du recensement général de l'agriculture de 1988 commencent à peine, trois ans plus tard, à être publiés... Bien entendu, ces inventaires ne sont pas compatibles avec les délais de l'action, les organismes de développement doivent agir vite et doivent avoir une connaissance en temps réel de la situation d'action. Une autre difficulté de ces inventaires est leur manque d'interactivité avec les décideurs. Or nous savons que la décision n'est pas un processus linéaire et que le chercheur ne peut porter un diagnostic achevé, univoque, qui le met de fait dans une position de prise de décision à la place du décideur. Les paramètres permettant de porter un diagnostic et les seuils de classification doivent pouvoir être changés. Autrement dit les résultats de ce diagnostic régional ne doivent pas être considérés comme immuables par les décideurs, ces résultats ne sont qu'une aide à la réflexion et doivent stimuler les travaux sur le terrain. Cela implique la réalisation d'un grand nombre de diagnostics (démarche essai-erreur). Seules des images numérisées manipulées informatiquement permettent de reformuler un diagnostic porté sur l'agriculture de vastes territoires (de l'ordre de un million d'hectares). Cette rapidité de reformulation d'un diagnostic permet de tester sa solidité par rapport par exemple aux valeurs fixées aux paramètres du modèle, et donc d'évaluer sa fiabilité dans différentes situations.

Notre objet de recherche est donc un système agraire régional. Les principaux niveaux d'organisation que nous distinguons sont : la zone «agro-écologique» (dans le sens où l'entend la Farming Systems Research (COLLINSON, 1983) : zone pour laquelle les conditions agronomiques de production sont similaires) ; la localité (espace de sociabilité et d'action quotidiennes des petits agriculteurs (CITTADINI, 1989)) ; l'exploitation agricole (OSTY, 1978) ; la parcelle agronomique (MILLEVILLE *et al.*, 1982).

Notre hypothèse de base repose sur les travaux de RUTHEMBERG (1980), posant qu'une typologie de fonctionnement des systèmes d'exploitation (Farming Systems), en milieu tropical, peut être déduite des relations d'ordre entre éléments du système de culture, ce terme étant pris au sens des agronomes anglophones : cropping system (répartition physique dans l'espace des cultures d'une exploitation ou d'une collectivité (ZANDSTRA *et al.*, 1981) et des géographes et non au sens des agronomes français (SEBILLOTTE, 1982). RUTHEMBERG (1980) décrit notamment les fonctionnements des exploitations sous l'angle de la gestion de la fertilité des sols, ce qui est tout à fait cohérent avec notre souci de rendre compte des capacités d'équilibration et d'évolution des systèmes d'exploitation de Misiones.

2. Principes méthodologiques et choix d'une zone

2.1. Méthodologie

Notre analyse adoptera classiquement simultanément une démarche déductive, à partir des images numérisées, et inductive, à partir du terrain (GIRARD et GIRARD, 1989).

Sur le terrain, dans plusieurs localités d'occupation du sol contrastée, nous procéderons à des enquêtes aux chefs d'exploitation pour réaliser une typologie des systèmes de production. Simultanément sont cartographiées toutes les parcelles agronomiques des localités. Ce repérage systématique et l'analyse des aspects paysagers permettent de définir une procédure afin de reproduire la typologie (PERUCCA, 1991). Cette cartographie permet d'autre part de faire des comparaisons avec l'image.

Ce cheminement ne peut ni ne doit être suivi d'une façon linéaire. Il est un guide pour un travail en «va et vient» entre le terrain et l'image. L'analyse de celle-ci permet d'enrichir le questionnement sur les aspects paysagers, en particulier l'analyse de la structure de l'image, par analyse des éléments texturaux et structuraux (FLOUZAT, 1988), renseigne et questionne sur la signification de la structure du paysage, du système de culture.

Une phase ultérieure concernera un diagnostic global de l'agriculture non d'exploitations isolées mais de petites localités agricoles.

Cette communication rend compte d'une première phase de ce type.

2.2. Choix d'une zone

2.2.1. Choix de l'emplacement de la fenêtre HRV (60 par 60 km)

Une analyse régionale des dynamiques de l'espace de Misiones a été faite préalablement aux travaux d'analyse des localités et exploitations (ALBALADEJO, 1987). La figure 1 en donne une vision synthétique des résultats. Les zones sud et ouest de la province (I A, II) représentent les zones de colonisation publiques ou privées ayant installé des exploitations familiales de taille moyenne (50 ha), ayant des cultures pérennes (maté, reforestations en pins, etc.) et disposant d'un moyen à faible capital. La zone I B est celle des anciennes estancias d'élevage bovin-viande extensif. Les zones centre-sud (III A et III B) sont celles de la colonisation publique en damiers de 25 ha organisée pour les familles ayant moins de capacités financières. Les zones IV et surtout IV A sont actuellement en pleine phase de colonisation. Cette colonisation, qui se fait sans aucun plan privé ou de l'État (colonisation dite «spontanée»), est le fait des fils des premiers colons installés plus au sud et de paysans brésiliens mis en faillite par l'évolution de l'agriculture dans les États voisins de Rio Grande, Santa Catarina et Paraná.

Nous avons choisi cette zone IV pour la rapidité des évolutions agronomiques et sociales d'une part (colonisation en cours et très intense) et pour l'analyse d'une organisation agricole spontanée (quels systèmes de production les agriculteurs sont capables d'installer et quelles sont leurs chances de pérennité ?). Cette zone est d'autre part cruciale pour les organismes de développement de la province car s'y trouvent les réservoirs «tampons» de terres encore colonisables accueillant une population importante sans ressources. Combien de temps encore va durer ce réservoir couvrant d'importants problèmes sociaux ?

2.2.2. Choix d'une localité

ALBALADEJO (1987) a distingué différents niveaux locaux d'organisation : la picada (ensemble des essarts cultivés reliés par le même chemin de colonisation initial); le site d'aménagement (niveau potentiel d'organisation au cours d'une action reliant les familles rurales à des organismes extérieurs).

Nous avons choisi la localité du Paraje Luján (2300 ha et une centaine de familles agricoles) qui a, au cours de la recherche, réussi à constituer spontanément une association de paysans sans-terre, à faire mesurer les lots occupés par un géomètre privé et à faire légaliser les occupations du sol. Par conséquent cette localité est passée, au cours de la recherche, d'un statut d'occupation précaire (pratique d'une agriculture itinérante) à un statut plus stable faisant supposer l'émergence de nouvelles (et plus stables) formes d'exploitation. Ce site s'est donc révélé être un modèle d'analyse des tendances et possibilités d'évolution des formes d'utilisation du sol.

3. Les données de terrain et leur traitement

3.1. Cartographie de terrain

3.1.1. Documents de base

Notre question de base est la suivante : «Comment réaliser un inventaire et une localisation des ressources et contraintes de l'espace avec des documents aériens peu récents au regard de la vitesse d'évolution du milieu géographique?»

Nous avons décidé d'utiliser au mieux les quatre sources d'information suivantes (ALBALADEJO, 1987) :

1) des cartes topographiques au 1:10 000 ou au 1:20 000 qui couvrent toute la province et qui ont été établies en 1963 à partir de photographies aériennes de 1962;

2) les photographies aériennes d'une mission privée de l'entreprise CELULOSA S.A. en 1980. Nous avons préféré utiliser ces documents plutôt que les documents officiels de 1981 qui présentent deux défauts : l'échelle des clichés est d'environ 1:50 000 alors qu'elle est de 1:20 000 environ pour les photos de CELULOSA, une série de clichés a été mal effectuée en cours de vol et une partie de notre territoire de recherche n'a pas été couverte;

3) la carte cadastrale établie directement sur le terrain par le géomètre, après ententes préalables entre les agriculteurs occupant les terres de l'État;

4) les enquêtes que nous avons effectuées auprès des agriculteurs par lesquelles nous avons dressé notamment deux types de cartes pour chaque exploitation : la carte de l'assolement actuel et des contraintes agronomiques et la carte de l'assolement projeté.

3.1.2. Création de la carte

Le graphique en figure 2 montre l'enchaînement des opérations et la hiérarchie dans l'utilisation des sources d'information. La carte des assolements a été obtenue en effet par l'emboîtement de plusieurs niveaux de renseignements, emboîtement effectué grâce à la vérification entre chaque niveau de la concordance d'un certain nombre d'informations.

La carte topographique à l'échelle 1:10 000 a été établie par assemblage et agrandissement des plans dont dispose la province. Cette matrice nous a permis de superposer la carte dessinée par le géomètre et d'en vérifier la concordance (en effet les modes d'obtention de ces deux cartes ont été différents : cheminement goniométrique pour les limites cadastrales et restitution planimétrique pour la topographie). Parallèlement nous avons utilisé les clichés panchromatiques noir et blanc de l'entreprise CELULOSA S.A. pour effectuer le tracé des limites des principales formations végétales et principalement la limite forêt / friches et cultures.

Bien que représentant une situation plus ancienne, cette carte a servi de base pour l'obtention de la carte des assolements de 1985. En effet, il a apparu au cours des enquêtes que deux générations d'occupants sans titre se succèdent dans le temps. Les premiers sont de grands défricheurs et tirent un revenu de la vente des essences forestières commercialement intéressantes. Celles-ci vendues, ces premiers intrus cherchent de nouveaux espaces et cèdent la place à une deuxième génération d'occupants. Ceux-ci tirent leurs ressources principalement de l'agriculture et cultivent la partie défrichée de préférence. Les déboisements sont limités à l'obtention de terres plus fertiles pour le tabac, ce qui n'est une nécessité que plusieurs années après l'installation. Les agriculteurs de Luján font déjà partie de la deuxième génération car la forêt n'est plus attractive pour des gens cherchant à gagner de l'argent grâce à la vente du bois. Ils ont succédé à la première génération quatre ans en moyenne avant notre passage,

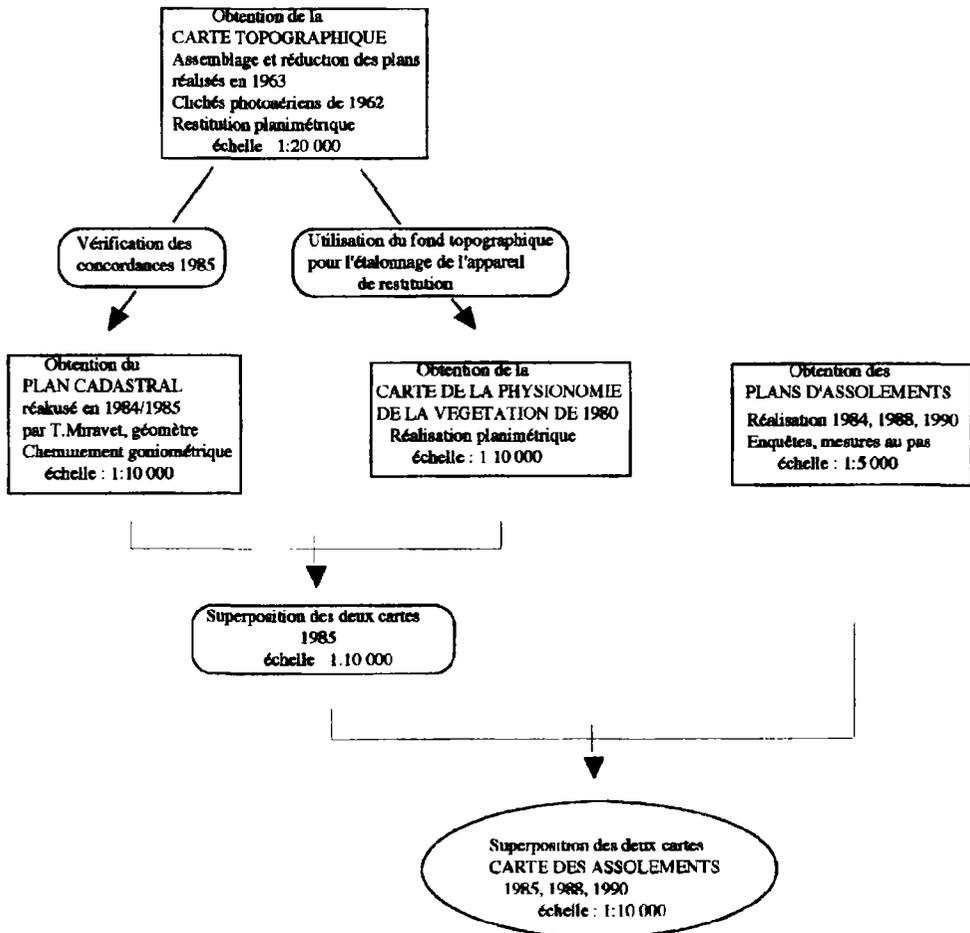


Figure 2. Enchaînement des principales étapes de la réalisation de la carte du Paraje Luján

autrement dit à peu près au même moment où CELULOSA effectuait sa mission photo-aérienne.

Par conséquent nous avons supposé que la partie déboisée depuis 1980 était relativement faible et pouvait être connue par enquête ou par déduction. Cette hypothèse nous a permis de supposer que les assolements observables en 1985 (et mesurés et dessinés sur le terrain avec chaque agriculteur) s'inscrivent géographiquement dans les zones déjà défrichées en 1980. Ce raisonnement nous a permis de dresser une carte actualisée de Luján, grâce aux enquêtes sur le terrain et ceci alors qu'il n'existait aucun document cartographique sur la zone au début de notre travail, à l'exception des cartes topographiques. Dans certains cas, les surfaces défrichées depuis 1980 nous ont été signalées par l'agriculteur, dans d'autres cas il a pu facilement se déduire quelles parties ont été défrichées mais il est indéniable que la carte que nous avons dressée n'est qu'approximative et ne répond pas aux critères habituels de précision cartographique. Ceci est d'autant plus vrai pour la carte des assolements de 1990 pour laquelle il n'a plus été réellement possible de s'appuyer sur les relevés photo-aériens de 1980.

3.1.3. Recueil des données de terrain

Notre objet n'était pas un recensement précis (au sens du géomètre) de l'ensemble des parcelles. Notre objet était de rendre compte d'une organisation de l'espace au sein de chaque exploitation : types de localisation de parcelles, de proximités, de formes en fonction des cultures pratiquées.

Sur le fond de carte ainsi créé ont été représentés les bâtiments (maisons, hangars), le dessin des cours d'eau et des chemins, les contours des lots (limites cadastrales) avec le numéro identifiant, les contours de parcelles de culture. Certains chemins ont un «statut» particulier : les «picadas». La picada est le chemin primitif de défrichement de la forêt, ce chemin est la voie de communication principale reliant les exploitations entre elles et il est entretenu par des travaux collectifs des riverains. Ces chemins servent de critère de zonage de l'espace. En effet par extension la picada désigne également la zone desservie par chaque chemin.

Pour chaque lot, la couverture végétale des parcelles est identifiée. Les couverts végétaux sont les suivants : forêt, friche, prairie, plantations d'arbres (pins, fruitiers), cultures pérennes (maté, thé, toung, citronnelle), et annuelles (tabac et cultures vivrières).

Les cultures pérennes et cultures annuelles sont souvent associées et il peut y avoir jusqu'à quatre cultures sur une même parcelle.

3.2. Traitement, utilisation des données de terrain

Les données obtenues par enquêtes auprès des agriculteurs ont servi à discriminer les exploitations entre elles selon leurs capacités d'équilibration (PERUCCA, 1991). Les exploitations agricoles sont donc considérées comme des systèmes (OSTY, 1978). Le concept d'équilibration a été introduit dans la théorie des systèmes par PIAGET (1967), puis développé par LE MOIGNE (1984). L'équilibration sert à décrire les capacités d'un système à se maintenir et à se produire, en insistant particulièrement sur les relations du système avec son environnement. Suite aux travaux de LE MOIGNE (1984), nous avons distingué quatre dimensions de l'équilibration, les capacités de stabilité, d'adaptation, de transformation et d'évolution. Nous avons hiérarchisé ces propriétés : pour être capable d'adaptation, un système doit être capable de stabilité, pour être capable de transformation, un système doit être capable d'adaptation, etc. Le concept d'équilibration est particulièrement utile dans le cas de Misiones où se pose la question de la durabilité des systèmes de production qui s'installent :

Leur apparente fragilité est-elle une étape obligatoire dans une trajectoire d'évolution ?
Comment juger de la fragilité de ces systèmes ?

3.2.1. Méthode pour produire la typologie

Plus de 30 variables ont été utilisées pour décrire les quatre grandes dimensions de l'équilibration, par exemple le nombre de bovins présents est une réserve financière contribuant à une plus grande capacité de stabilité. Le degré d'instruction du producteur et son ancienneté sur l'exploitation rendent compte de ses capacités d'apprentissage, donc d'adaptation. Certaines variables sont plus complexes, par exemple l'indice de gestion de fertilité des sols ; cet indice, calculé à partir de la somme des surfaces cultivées ou en jachère, chacune pondérée par un coefficient d'érosion des sols, rend compte des capacités d'évolution de l'exploitation (ALBALADEJO, 1987). Plusieurs méthodes ont été testées, les plus efficaces sont celles qui permettent de hiérarchiser les variables entre elles : méthode de traitement graphique de l'information (BERTIN, 1977). Les méthodes non hiérarchiques, comme l'analyse factorielle des correspondances (BENZECRI *et al.*, 1973), donnent de moins bons résultats.

La typologie des systèmes d'exploitation obtenue comprend cinq types :

Type I : les exploitations ne sont pas capables de stabilité, ce sont généralement des jeunes en tout début d'installation, très faiblement capitalisés. Leur gestion est essentiellement minière;

Type II : ces exploitations disposent de réserve mais ne sont pas capables de mobiliser de la main d'oeuvre ou de réarranger leur assolement en cas de perturbations extérieures;

Type III : ces exploitations sont capables de stabilité, mais pas d'adaptation;

Type IV : ces exploitations sont capables d'adaptation mais pas de transformation, elles ont déjà réalisé une forte transformation et disposent de très peu de terres disponibles;

Type V : elles ont une bonne capacité de transformation.

Les critères d'évolution ont été traités après la constitution des types, comme variables supplémentaires. Les dimensions précédentes ont permis de mettre en évidence des trajectoires d'évolution des exploitations agricoles.

3.2.2. Reconnaissance des types par indicateurs paysagers, relevés sur le terrain et susceptibles d'être extraits par HRV

Une première analyse des images HRV a permis le choix des variables paysagères susceptibles d'être extraites des images. Leur pouvoir de discrimination des cinq types a été testé pour chacune d'entre elles; les dix plus discriminantes ont été retenues pour analyse des propriétés de leur recombinaison. Une reconstitution des types par analyse factorielle des correspondances, à partir de dix variables aboutit à une mise en classe fortement liée à celle des systèmes de production (hypothèse d'indépendance des deux classifications rejetée avec un intervalle de confiance de 99,7%). Malheureusement la correspondance entre les deux typologies n'a pas été suffisamment claire pour faire de l'analyse factorielle des correspondances un outil opérationnel. La méthode des têtes de CHERNOFF, permettant de hiérarchiser les variables entre elles, aboutit à une meilleure correspondance entre les aspects paysagers et les types de systèmes de production. Pour chaque type de systèmes d'exploitation, l'aspect paysager a été représenté sous forme de tête de CHERNOFF (fig. 3). Chaque variable paysagère a été discrétisée en cinq classes d'effectifs égaux, afin d'éviter que les valeurs extrêmes de quelques individus n'utilisent tout le pouvoir discriminant des têtes de CHERNOFF. De cette façon, les aspects des têtes furent suffisamment semblables à l'intérieur de chaque type, et suffisamment différents entre types, pour en faire une clé de détermination basée sur une physionomie moyenne (fig. 4).

4. Reproduction du diagnostic à partir des images HRV

Les images sur lesquelles nous nous appuyons pour déterminer l'occupation du sol et extraire les indicateurs paysagers «zénithaux» sont les suivantes : 16-08-1989 image HRV P corrigée au niveau 2B, 16-08-1989 imagerie HRV XS au niveau 1B, 28-07-1990 image HRV P+XS au niveau 1B, 31-12-1990 imagerie HRV XS au niveau 1B. La résolution des images XS est de 20 m et celle des images P+XS est de 10 m. D'autre part, nous disposons du tracé des lots d'occupation (limite des exploitations agricoles) numérisé.

Toutes les images HRV ont été superposées, après traitement, à l'image panchromatique corrigée au niveau 2B. Le tracé des lots d'occupation numérisé a été transformé géométriquement de manière à être superposable à cette même image. La correspondance des surfaces entre ce tracé numérisé et les mesures du cadastre s'est avérée excellente (coefficient R carré de 0,98 pour 50 observations).

ÉPANOUISSEMENT DU VISAGE :
INSTALLATION DE CULTURES PÉRENNES

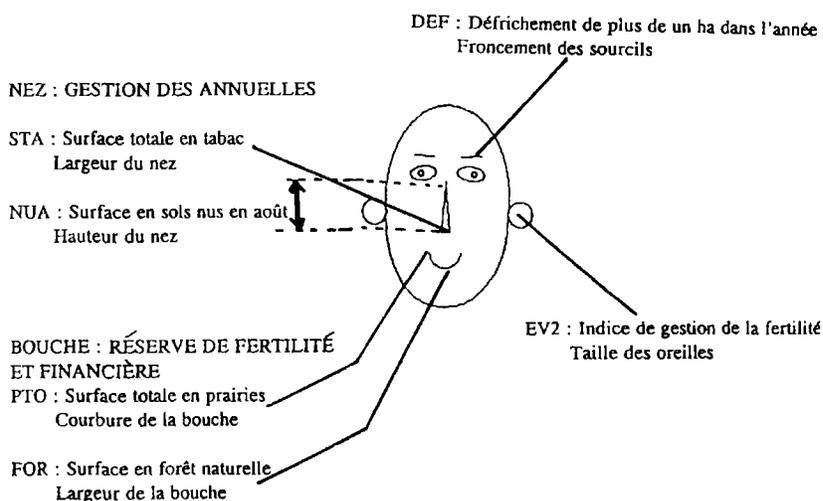
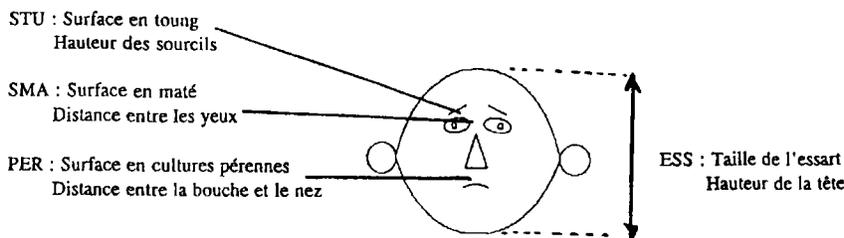


Figure 3. Légende des têtes de Chernoff pour les variables paysagères zénithales de Luján en 1990

4.1. Identification des éléments

4.1.1. Objectif

Les indicateurs paysagers recherchés sur les images sont ceux qui ont eu le meilleur pouvoir de discrimination des cinq types de systèmes d'exploitation. Il s'agit de la surface essartée (surface cultivée plus surface en friches), la surface en forêt, la surface en prairie, la surface déboisée dans l'année, la surface en sols nus en août (hiver), la surface cultivée en tabac, la surface en maté et la surface en toung. Nous avons également utilisé l'indice de gestion de la fertilité des sols calculé à partir des précédentes surfaces en leur attribuant des coefficients sur la base des déclarations des agriculteurs sur l'impact de chaque occupation du sol sur la fertilité des sols (ALBALADEJO, 1987).

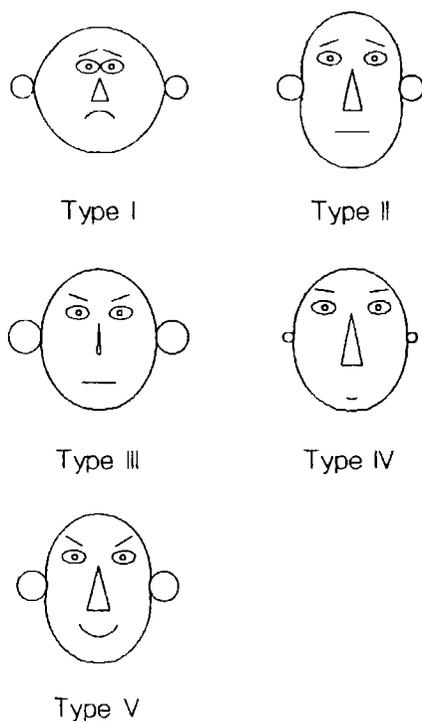


Figure 4. Aspects paysagers zénithaux moyens de chaque type de systèmes de production de Luján en 1990 (typologie manuelle)

4.1.2. Méthode

La première méthode testée pour identifier ces classes d'occupation du sol sur les images a été un simple seuillage sur les canaux bruts et sur l'indice de végétation (différence normalisée) (fig. 5). Les seuils ont été choisis en fonction de trois critères, la conformité avec le comportement spectral des surfaces enregistré lors de relevés radiométriques de terrain effectués en août 1990, la correspondance avec la cartographie du parcellaire agricole de 1990 et la délimitation d'éléments connexes. Ceci a permis d'obtenir la carte d'occupation du sol de Luján en juillet 1990 (fig. 17-6, voir cahier couleur). De l'image P+XS de juillet 1990 ont été extraites les surfaces en prairies, sols nus, forêt et surface essartée. Pour obtenir ces deux dernières, il a été nécessaire d'identifier la classe des friches, qui fait partie de la surface essartée.

L'analyse de l'imagette XS de décembre 1990 a permis d'identifier les surfaces en forêt, sols nus et la surface essartée, pour chaque lot d'exploitation. Une classe a été définie rassemblant les surfaces en friches et les cultures. En effet, il n'a pas été possible de discriminer mieux, par cette méthode, les cultures en raison de leur comportement spectral similaire aux friches sur cette image.

L'analyse de la superposition des images d'août et de décembre 1990 a complété ces traitements pour l'estimation de la surface déboisée dans l'année, de la surface cultivée en tabac, et des surfaces en cultures pérennes [maté (*Ilex paraguensis*)]. Du fait des exigences des compagnies de tabac sur la préparation des sols et la lutte contre les adventices, nous avons considéré que les surfaces en sols nus en août et décembre (durée du cycle cultural) étaient un

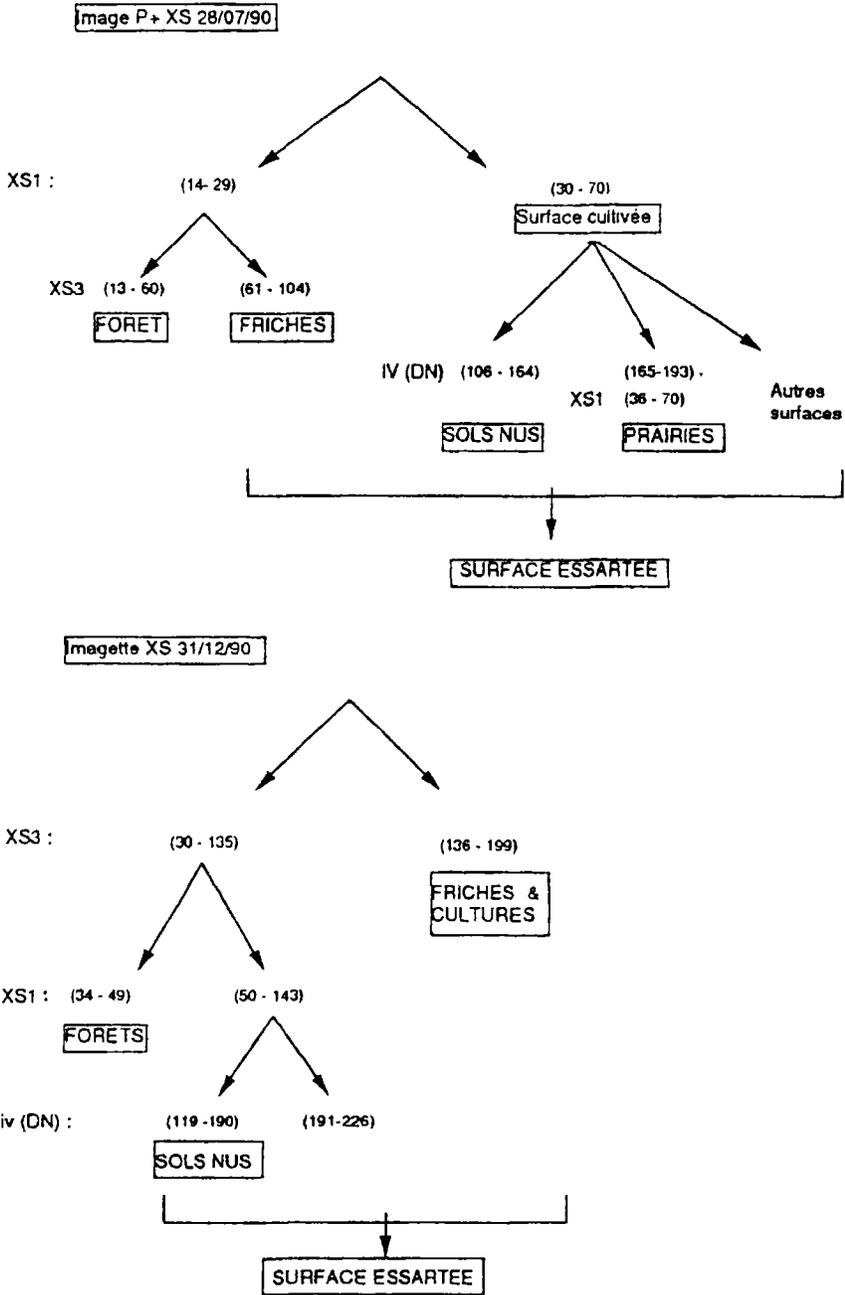


Figure 5. Représentation schématique de l'extraction des indicateurs paysagers des images par seuillage

estimateur des surfaces en tabac. Le toung étant conduit en verger et étant caducifolié, nous avons choisi les surfaces classées en sols nus en août et en cultures et friches en décembre comme estimateur de surfaces en toung. Les surfaces en maté, arbuste à feuilles persistantes, ont été estimées par les surfaces cultivées n'étant classées ni en sols nus ni en prairies en août et étant classées en friches et cultures en décembre.

La validation de cette identification a été effectuée suivant les critères suivants : concordance de forme, d'emplacement et de surface de chaque indicateur avec ceux estimés lors des relevés de terrain effectués la même année. La forme et l'emplacement de chaque surface ont été contrôlés par analyse visuelle. Cependant, deux contraintes ont été rencontrées. La première provient du fait que la taille des parcelles dans le front pionnier peut être extrêmement petite (inférieure à 0,2 ha), et on observe donc généralement des regroupements de parcelles sur les images. La seconde procède du fait que la cartographie de terrain employée pour la validation du traitement des images n'avait pas été faite expressément dans ce but et était trop schématique pour permettre réellement d'estimer la conservation de la forme des parcelles sur les images traitées. En effet, pour l'élaboration de cette carte de terrain il n'a plus été possible de s'appuyer en 1990 sur les relevés photo-aériens de 1980 pour obtenir le tracé des limites des principales formations végétales.

Les surfaces ont été comparées à celles estimées sur le terrain.

4.1.3. Résultats

Les surfaces des occupations du sol recherchées n'ont été estimées correctement que dans le cas de la forêt et des zones essartées en juillet 1990 (coefficient de régression R^2 de 0,93 pour 50 observations).

Dans le cas de la surface en forêt essartée en décembre 1990, la présence de brume et de nuages sur l'image n'a pas permis, par cette méthode, de retrouver les surfaces estimées lors de relevés de terrain. Cependant, par analyse visuelle des lots ne semblant pas avoir été affectés par ce phénomène, il a été constaté une concordance des formes des essarts entre la carte de terrain et l'image traitée.

Les surfaces en prairies n'ont pas été correctement estimées. Cependant, par vérification de la reconnaissance de la forme et de la position par analyse visuelle, pour les 20 prairies de taille au moins égale à deux hectares, 4 n'ont pas été reconnues de façon satisfaisante, 3 avaient été notées comme très enfrichées lors des relevés de terrain, et 16 ont été reconnues correctement en ce qui concerne leur forme et leur position.

Dans le cas des parcelles de tabac, en maté et en toung, les surfaces n'ont pas été estimées correctement.

4.1.4. Conclusion

Les résultats en ce qui concerne l'extraction des indicateurs paysagers des images sont globalement mauvais. Ceux-ci devraient pouvoir être améliorés par l'emploi d'autres méthodes de traitement d'images, telles que les classifications supervisées ou l'emploi d'indices de texture. D'autre part, cette analyse a été faite avec des images de résolutions différentes, l'image de plus basse résolution étant celle d'été, période où l'occupation du sol par des cultures est plus importante qu'en hiver.

De plus, il apparaît important de caractériser plus finement les classes d'occupation du sol, en différenciant éventuellement les parcelles d'une même culture en fonction de leur enfrichement et de la présence d'adventices qui peuvent avoir un impact important sur le comportement spectral de la parcelle.

4.2. Utilisation des indicateurs extraits de l'image

La finalité est de retrouver à partir des images HRV le diagnostic sur les systèmes d'exploitation. Neuf variables sur les dix ayant été testées en recombinaison pour retrouver les types de systèmes d'exploitation ont été cette fois-ci extraites des images HRV. À partir de celles-ci, une recombinaison à partir des têtes de CHERNOFF a été testée. Le codage des têtes est rigoureusement identique à celui précédemment utilisé (fig. 3), à l'exception de la variable surface en pérennes qui est absente. Chaque exploitation a été représentée sous forme de têtes de CHERNOFF après transformation des variables en classes d'effectifs égaux. Ceci a eu pour conséquence de limiter l'incidence de la mauvaise détermination des surfaces. Les moyennes de toutes les variables exprimées en hectares pour chaque type d'équilibration ont été également représentées sous forme de têtes de CHERNOFF.

Globalement la correspondance entre la physionomie des types de systèmes d'exploitation obtenue par des variables de terrain et des variables extraites des images est relativement satisfaisante, compte tenu des difficultés de détermination vues précédemment. En effet, même s'il n'y a pas eu concordance exacte entre les indicateurs trouvés sur l'image et ceux utilisés à partir des données de terrain, une physionomie générale de chaque type d'exploitation a été retrouvée (fig. 4 et 7). Les caractères distinctifs de chaque groupe ont été en général conservés. Cependant, n'a pas été retrouvée la discrimination du type III qui est caractérisé par une très faible surface en tabac et par un fort indice de gestion de fertilité des sols. Pour le type I, également, n'a pas été retrouvée la surface en tabac attendue.

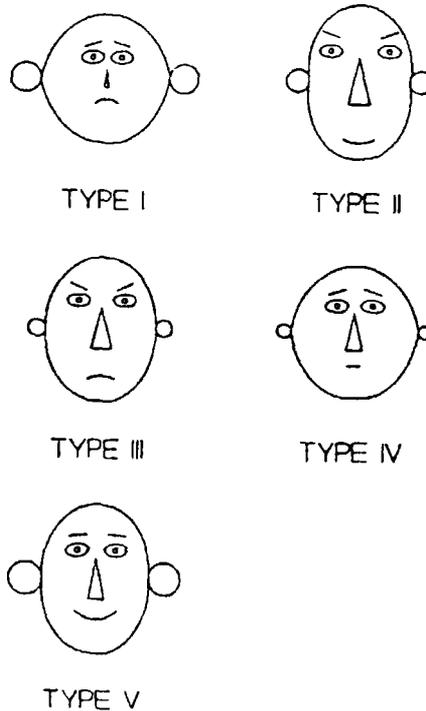


Figure 7. Aspects paysagers vus par HRV des exploitations de Luján selon chaque type d'équilibration

L'hypothèse d'indépendance entre la variable «types d'équilibration des exploitations» et la variable «aspects paysagers satellitaires», peut être rejetée avec un intervalle de confiance de 99,9% (nombre de degrés de liberté = 16). Nous n'obtenons, cependant, pas un nombre suffisant de reconnaissances correctes des types d'équilibration par les aspects paysagers satellitaires (faible corrélation) pour disposer d'un outil permettant de retrouver, à partir de l'imagerie HRV, le diagnostic sur les systèmes d'exploitation.

5. Conclusion

Les résultats à ce stade de la recherche sont encore insatisfaisants, principalement en ce qui concerne la détermination des surfaces des indicateurs paysagers sur les images. La combinaison de ces indicateurs, en vue de la reproduction d'un diagnostic, est néanmoins encourageante. C'est sur cette étape de détermination que portent les efforts actuels. Parallèlement vont être travaillées les méthodes de combinaisons d'indicateurs en vue d'améliorer la reproduction du diagnostic. Simultanément à l'interprétation des images satellitaires, les méthodes de diagnostic peuvent être affinées; nous nous sommes rendus compte, en effet, que la méthode de recherche d'indicateurs paysagers renvoyait à une analyse critique du diagnostic. Ce type d'approche ne peut pas être envisagé comme une succession linéaire entre le diagnostic et son extrapolation à des superficies étendues grâce aux images.

Par ailleurs, les méthodes de combinaison d'indicateurs extraits des images doivent le plus possible coller au modèle d'analyse, et par conséquent regrouper et hiérarchiser les variables (cluster analysis, arbres d'Hartigan).

6. Références

- ALBALADEJO, C. 1987. Aménagement de l'espace rural et activités d'élevage dans des régions de petites exploitations agricoles, l'exemple des Cévennes, sud en France et de la province de Misiones en Argentine. Thèse de doctorat. Université de Grenoble I, INRA/SAD Toulouse, 538 p.
- BENZECRI J. P. *et al.* 1973. L'analyse des données. Tome II : L'Analyse des Correspondances. Dunod, Paris, 619 p.
- BERTIN, J. 1977. La graphique et le traitement graphique de l'information. Flammarion, Paris, 277 p.
- CITTADINI, R. 1989. Le facteur local dans l'innovation technique en milieu rural. Mémoire de DEA, Université de Toulouse II, 156 p.
- COLLINSON, M. 1983. Research methodology notes. Farming Systems Newsletter, tome 12, p. 6-20.
- EIDT, C. R. 1971. Pioneer settlement in Nort-East Argentina. University of Winconsin Press, Madison, USA, 248 p.
- FLOUZAT, G. 1988. Morphologie mathématique et analyse des images de télédétection. Photo-interprétation, n° 1988-5, fasc. 1, p. 1-16.
- GIRARD, M. C. et GIRARD, C. M. 1989. Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. Masson, collection Sciences agronomiques, Paris, 260 p.
- JOLLIVET, J. (éd.) 1978. Pour une agriculture diversifiée. L'Harmattan, collection Alternatives paysannes, Paris, 421 p.

- LEMOIGNE, J.-L. 1984. La théorie du système général, théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France, Paris, 330 p.
- MILLEVILLE, P., COMBES, J. et MARCHAL, J. 1982. Systèmes d'élevage sahéliens de l'Oudalan, étude de cas. Document ORSTOM, Paris, 127 p.
- OSTY, P.-L. 1978. L'exploitation agricole vue comme un système. Bulletin technique d'information, n° 326, p. 43-49.
- PERUCCA, C. 1991. Diagnostic paysager des systèmes de production paysans de la province de Misiones, Argentine. Mémoire de DEA, Université de Toulouse II, 158 p.
- PIAGET, J. (éd.) 1967. Logique et connaissance scientifique. Gallimard, Paris, 1345 p.
- PINCHEMEL, P. et PINCHEMEL, G. 1988. La face de la terre. Armand Colin, collection U., Paris, 518 p.
- RUTHEMBERG, H. 1980. Farming systems in the tropics. Oxford University Press, Oxford, 3rd edition, 366 p.
- SEBILLOTTE, M. 1982. Les systèmes de culture. Séminaire du Département d'agronomie de l'Institut national de recherches agronomiques, Vichy, 56 p.
- ZANDSTRA, H. G., PRICE, E. C., LITSINGER, J. A. and MORRIS, R.A. 1981. A methodology for on farm cropping systems research. International Rice Research Institute, Los Baños, Philipinas, 147 p.

18

Inventaire cartographique des ressources renouvelables du Burkina Faso par téledétection

JACQUES FONTÈS* et SITA GUINKO**

**Institut de la carte internationale de la végétation (ICIV), Université Paul-Sabatier et Centre national de la recherche scientifique, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France; téléphone : (33) 61 53 02 35; télécopie : (33) 61 25 90 33*

***Institut du développement rural et Faculté des sciences et techniques, Université de Ouagadougou, Burkina Faso; téléphone : (226) 30 71 59; télécopie : (226) 30 72 42*

Résumé

La présente note développe les méthodes mises en oeuvre pour dresser la cartographie des ressources végétales du Burkina Faso. La carte produite se rattachera à la collection des cartes internationales du tapis végétal de l'ICIV au 1:1 000 000, dont les concepts sont repris. Un fragment de la carte est présenté ici avec sa légende commentée. Elle est établie sur la base des informations satellitaires MSS de Landsat, traitées par photo-interprétation classique en liaison étroite avec des levées de terrain. Son originalité réside plus particulièrement dans l'expression des potentialités ligneuses exprimées par des volumes moyens de bois sur pied à l'hectare. Cette synthèse doit compléter les connaissances trop fragmentaires des états de surface du pays. Elle est attendue comme un maillon supplémentaire pour mieux orienter les décideurs nationaux et internationaux en matière de gestion et de protection de l'environnement et du patrimoine forestier.

1. Introduction

Ce programme répond d'abord à une demande du Comité burkinabé de la recherche forestière pour une meilleure gestion du patrimoine ligneux du pays. Il vise, de plus, à stimuler les activités nationales en matière d'inventaires utilisant l'outil télédétection et à les encourager à se donner un cadre et des méthodes qui font défaut. Il répond aussi aux besoins exprimés par les institutions internationales en quête de synthèses cartographiques régionales actualisées, ceci à des fins de contrôle et de surveillance continue des ressources renouvelables (BLASCO et LEGRIS, 1979; F.A.O., 1979 et 1980; UNESCO, 1973).

Il doit se traduire par une synthèse cartographique au 1:1 000 000 qui prendra place dans la série des cartes internationales du tapis végétal et des cartes écologiques de la végétation de l'ICIV de Toulouse (GAUSSEN, 1957; BLASCO, 1988).

2. Objectifs

Il s'agit de dresser, sur la base de produits satellitaires, un bilan des états de surface de l'ensemble du Burkina Faso au début des années 90, exprimé par une carte synoptique dans laquelle doivent apparaître :

- les différents types de végétation naturelle selon une nomenclature classique d'ordre essentiellement écologique et physionomique (AUBREVILLE, 1959 et 1965; FONTÈS, 1983; GUINKO, 1984);

- les potentialités ligneuses exprimées par des volumes moyens de bois à l'hectare. Cet aspect est encore inédit pour ce type de carte et lui confère toute son originalité. Les potentialités sont comprises ici dans le sens de volume de bois sur pied exploitable;

- les taux d'occupation du sol exprimés par le ratio «surfaces cultivées - formations naturelles»;

- les grands boisements, les forêts classées, les parcs et réserves naturelles.

3. Nomenclature

Deux entités majeures doivent ressortir sur la carte : les formations naturelles et les milieux de culture associant champs de l'année et jachères.

Ces deux types de surface s'interpénètrent dans des proportions variables et selon des mosaïques plus ou moins complexes, aux limites tantôt franches, tantôt floues.

3.1. Les formations naturelles

Il faut immédiatement souligner que la majorité de ces formations ont été soumises à une pression humaine plus ou moins lointaine. Cette action se poursuit aujourd'hui d'une manière souvent exacerbée. Leurs surfaces reculent, quelle que soit la zone considérée (FONTÈS, 1986).

Elles sont traitées à 4 niveaux qui sont repris pour la stratification de la carte (fig. 1).

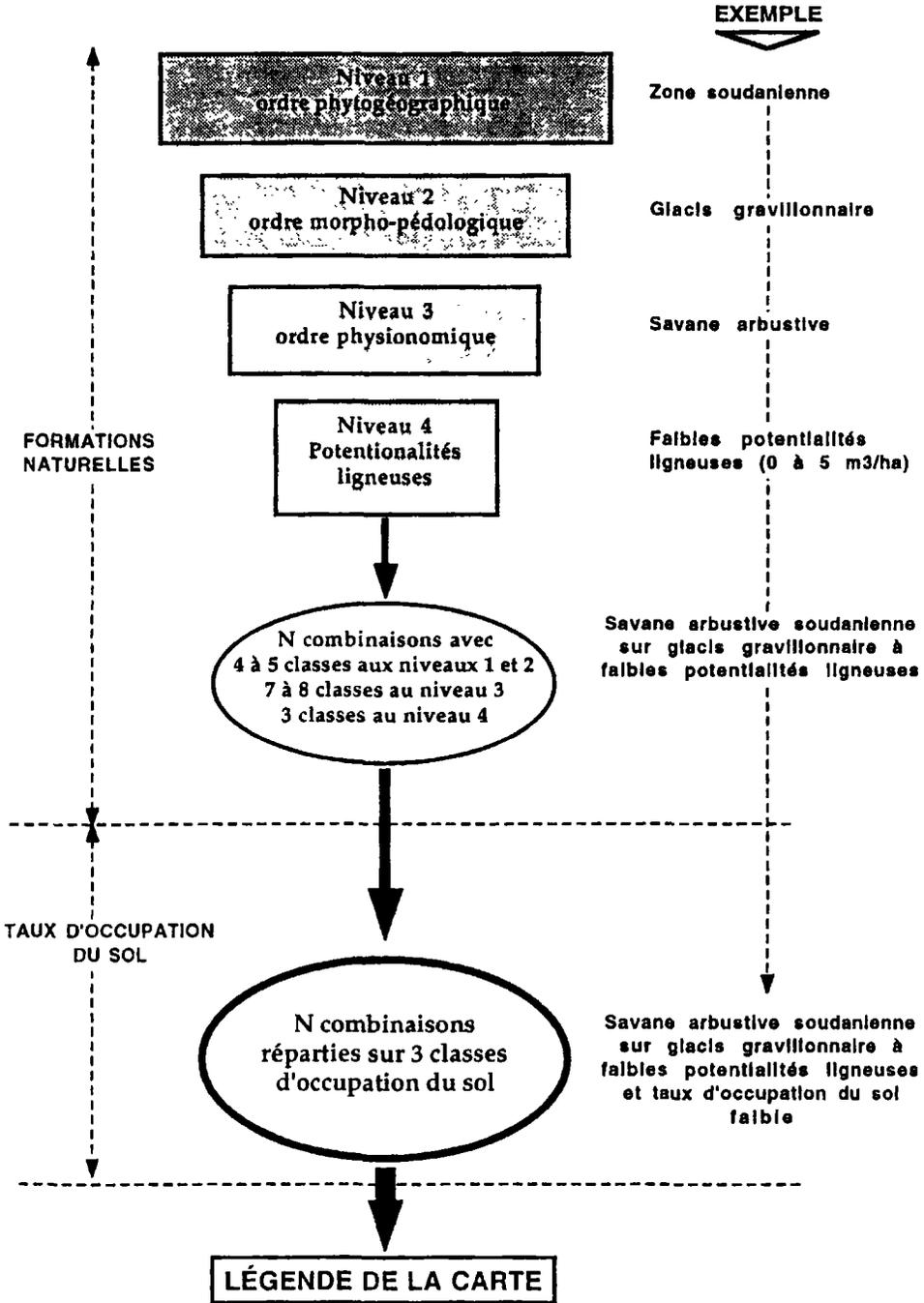


Figure 1. Schématisation de la stratification de la carte

Le premier niveau est d'ordre phytogéographique. Il s'appuie sur les travaux de GUINKO (1984) qui distinguent du nord au sud (fig. 2) :

- la zone sahéenne, subdivisée en :
 - un secteur sahéen strict,
 - un secteur subsahélien;
- la zone soudanienne subdivisée en :
 - un secteur soudanien septentrional,
 - un secteur soudanien méridional.

Cette distribution zonale s'appuie simultanément sur des faits bioclimatiques et floristiques.

Le second niveau est d'ordre morpho-pédologique. Il s'inspire en ce sens des travaux de l'Office de la recherche scientifique et technique Outre-Mer : carte pédologique de reconnaissance (ORSTOM, 1969), carte des ressources en sol (BOULET, 1976) et de la carte des milieux naturels (GUILLOBEZ, 1985).

Le Burkina Faso est un pays aux reliefs modestes et la majeure partie des surfaces s'apparente à un vaste plateau uniforme (HOTTIN et OUEDRAOGO, 1975). L'échelle finale de la carte autorise à ne considérer ici que les grandes unités physiographiques auxquelles se rattachent morphogénèse et grands types de sols : formations éoliennes, glacis, complexes orographiques ou cuirassés, vallées principales, etc.

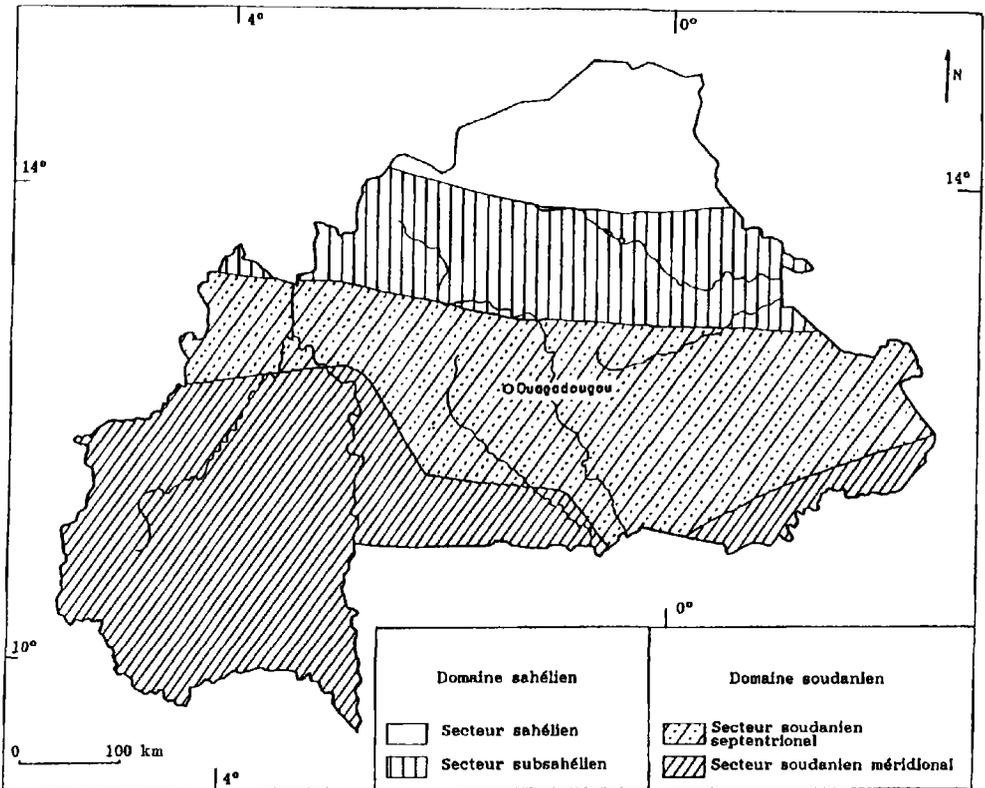


Figure 2. Territoires phytogéographiques du Burkina Faso

Le troisième niveau est d'ordre physionomique. Suivant la classification de Yangambi (AUBREVILLE, 1957; MONOD, 1957 et 1963), seront individualisées : steppes et savanes (herbeuses, arbustives, arborées ou boisées), forêts claires et galeries forestières.

Des subdivisions floristiques peuvent être introduites ici. Elles sont alors liées à la nature du sol et au degré d'artificialisation de la formation dans son contexte général bioclimatique et morphologique.

Le quatrième niveau concerne les potentialités en bois. Les différentes formations naturelles sont rattachées à l'une des trois classes de potentialités retenues dans ce programme, à savoir :

- classe 1 : forte potentialité,
- classe 2 : potentialité moyenne,
- classe 3 : potentialité faible ou nulle.

Elles doivent mettre en valeur la dégradation globale du milieu, mais surtout permettre d'organiser une gestion plus rationnelle du patrimoine forestier, plus particulièrement dans les zones que la pression démographique a le moins affectées.

Ces classes correspondent à des tranches de volume de bois sur pied par unité de surface dont les seuils ne seront définitivement affectés qu'après acquisition et traitement complet des mesures dendrométriques au sol. Dans le contexte de savanes et de steppes qui prédominent au Burkina Faso et où les volumes sont globalement faibles, la valeur de ces seuils sera basse (de l'ordre de 5 à 10 m³/ha), à l'inverse de ce qu'elle aurait pu être en pays plus forestier.

Il faut noter que la majorité du bois sur pied au Burkina Faso est du bois de feu ou du bois domestique.

3.2. Les surfaces cultivées

Les terres de culture s'organisent généralement autour des villes et villages selon des auréoles concentriques caractéristiques, des lanières le long de certains talwegs ou de vallées alluviales, en champs de brousse plus ou moins dispersés sur des glacis ou pédiplaines. Elles sont souvent associées à de vieilles jachères et à des lambeaux de formations végétales spontanées. Elles peuvent former d'immenses parcs à «karité», à *Acacia albida* ou à *Parkia biglobosa*.

La proportion respective de chacune de ces surfaces est étroitement liée à la densité des populations. Reflet fidèle de l'état et du dynamisme des paysages végétaux, cette distribution est exprimée à travers trois nouvelles classes qui figureront également sur la carte :

- taux d'occupation faible ou nul : < 10%
- taux d'occupation moyen : 10 à 30%
- taux d'occupation fort : > 30%.

Cette distinction permet de localiser immédiatement les domaines protégés et globalement stables des milieux les plus humanisés, donc les plus vulnérables.

Le seuil de 30% tient du système de culture, extensif. Un territoire où les surfaces cultivées (champs de l'année + jachères de moins de deux ans) occupent au moins 30% de l'espace, peut être déjà considéré comme fortement occupé (GUINKO *et al.*, 1991).

4. Méthodologie

On s'appuie sur des méthodes simples, applicables à l'ensemble du territoire, avec des adaptations possibles d'un domaine phytogéographique à un autre. Elles doivent nécessairement

assurer la stratification de l'espace burkinabé répondant aux objectifs fixés et compatibles avec l'échelle retenue (KÜCHLER and ZONNEVELD, 1988).

Les méthodes développées ici, d'une manière synthétique, sont relatives aux 3 phases qui ont présidé à cette réalisation, à savoir :

- l'interprétation des produits satellitaires ou phase 1,
- les relevés de terrain ou phase 2,
- la validation ou phase 3.

4.1. Interprétation des produits satellitaires ou phase 1

Les images satellitaires constituent la base matérielle de ce programme. Leur traitement consiste en l'interprétation visuelle semi-supervisée de 17 images MSS de Landsat, à l'échelle du 1:500 000, disponibles en «compositions colorées trois canaux» sur support papier.

La bonne adéquation entre leur résolution spatiale et l'échelle du produit cartographique final, leur disponibilité à des dates acceptables justifient leur choix dans ce programme (GUELLEC, 1980 et 1982; KÜCHLER and ZONNEVELD, 1988).

Pour compléter les images MSS de moindre qualité, une dizaine d'images HRV de SPOT (compositions colorées au 1:100 000) ont été acquises et traitées de façon similaire.

Le traitement des images est réalisé en s'appuyant sur des critères de différenciation classiques qui introduisent les contrastes : teinte, forme, structure et texture, ainsi que des critères d'environnement.

L'interprète raisonne en fonction de la date de prise de vue qui correspond à un stade phénologique précis, tant des groupements végétaux naturels que des cultures. Les images sont choisies si possible à une date avancée de la saison sèche, époque où le tapis herbacé fournit une réponse chlorophyllienne faible ou nulle, où les récoltes, déjà réalisées, laissent les champs de l'année à nu, et où, enfin, les ligneux sont encore feuillés (FONTÈS, 1983).

Les thèmes simples sont immédiatement interprétés : cordons ripicoles, cours d'eau libre, réseau hydrographique en général, mares et lacs, massifs rocheux, complexes cuirassés, feux de brousse, sols nus cultivés ou érodés. L'identification des espaces cultivés est facilitée par superposition de fonds routiers et démographiques à l'image. Leur rattachement aux classes d'occupation du sol est réalisé grâce à l'utilisation d'une grille-point planimétrique calibrée, puis, progressivement, grâce à l'oeil exercé de l'interprète.

La stratification des images se poursuit à l'intérieur de surfaces ainsi délimitées et dont l'hétérogénéité traduit différents degrés de recouvrement du sol et niveaux d'activité chlorophyllienne de la végétation.

Les surfaces-images les plus complexes sont traitées suivant la méthode classique de délimitation par «élimination convergente» qui permet d'individualiser, par étapes successives, des unités de complexité croissante : on délimite ainsi à chaque étape, deux ensembles opposés, correspondant sur l'image à deux aspects extrêmes par la teinte, la texture ou la structure, entre lesquels, par différence, on conserve un troisième ensemble, généralement hétérogène, pour lequel, après élimination des deux premiers, la même démarche va être entreprise (CABAUSSEL, 1967).

On parvient de la sorte à stratifier progressivement l'ensemble de la zone couverte par l'image en individualisant des entités (ou groupes) homogènes. Celles-ci sont matérialisées sur calque (d'interprétation) par des unités d'égale apparence sensées représenter le même objet au sol mais aussi des objets différents, de même parenté spectrale. Ces unités sont immédiatement confrontées, si nécessaire, à la documentation existante ou à des produits de meilleure résolution : photographies aériennes et images satellitaires HRV qui assurent une

bonne transition avec la phase-terrain, voire même une parfaite identification. Leurs limites et leur affectation ne deviennent définitives qu'après les reconnaissances et mesures au sol que complètent des survols aériens sur les sites d'accès difficile ou de qualité-image médiocre.

4.2. Relevés de terrain ou phase 2

Ils sont étroitement liés à la première phase d'interprétation. Ils sont réalisés à trois niveaux d'observation (fig. 3).

Le premier niveau est celui de la zone couverte par l'image MSS. On s'efforce autant que possible d'organiser la prospection sur une seule image, compte tenu des variations spectrales bien connues d'une image à l'autre.

Le second niveau est celui des unités isophènes de l'image qui correspondent à des surfaces de 2 km² (taille minimale de représentation cartographique au 1:1 000 000, soit un rectangle de 1 x 2 mm) à plusieurs dizaines de km².

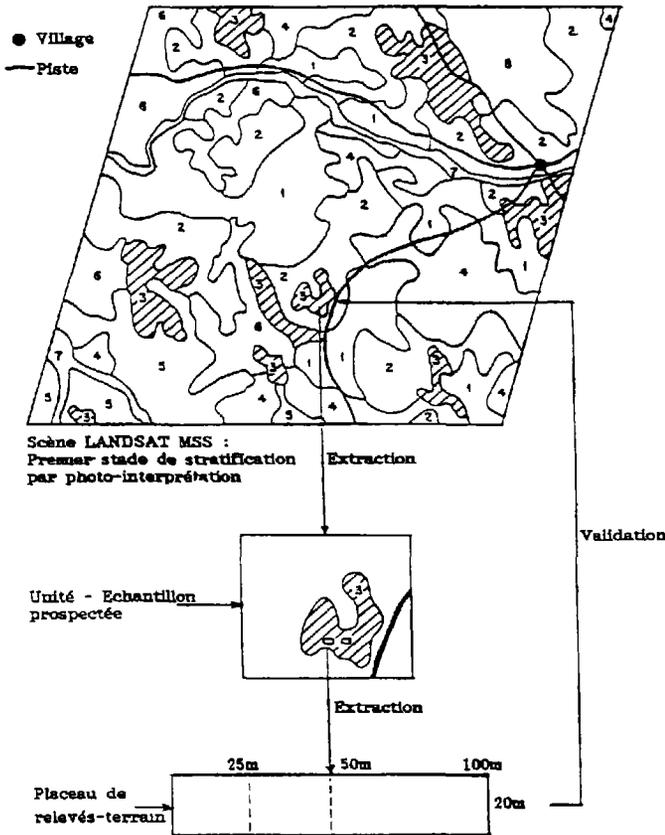


Figure 3. Schématisation d'une stratification de scène Landsat et d'un échantillonnage pour validation

Le troisième niveau est celui des placeaux de 500 à 2 000 m², aires rectangulaires de 25, 50 ou 100 m de long sur 20 m de large choisis à l'intérieur des unités-échantillons dont ils sont représentatifs.

4.2.1. Le premier niveau

Tout au long de la zone prospectée, des observations générales de type physionomique, floristique (espèces dominantes) ou concernant l'activité humaine sont consignées et calées précisément dans l'espace à l'aide de repères topographiques et du compteur kilométrique du véhicule.

4.2.2. Le second niveau

Dans un groupe d'égale apparence, sont sélectionnées, selon des considérations d'ordre morpho-pédologique, une ou plusieurs unités sur lesquelles des observations plus précises sont réalisées.

Le taux d'échantillonnage (proportion des surfaces sélectionnées par rapport aux surfaces du groupe) varie de 10 à 20% suivant l'hétérogénéité des unités.

Ce taux répond à une norme exigée par l'échelle cartographique.

4.2.3. Le troisième niveau

Le site des placeaux est défini au départ en fonction du réseau routier, des possibilités d'accès et de points remarquables (confluences, villages, reliefs, etc.) pointés sur les cartes de l'Institut géographique national au 1:200 000 et 1:500 000, pour faciliter leur emplacement sur le terrain et alléger les délais d'exécution.

Le positionnement des placeaux ne devient définitif qu'après s'être assuré de leur bonne représentativité au sein de la formation considérée.

Leur nombre est lui-même fonction de la diversité végétale. Dans une unité qui présente plusieurs faciès de végétation, ce nombre peut être multiplié par 2 ou par 3.

Ces choix relèvent naturellement de l'expérience de l'observateur à percevoir immédiatement les nuances qui existent au sein d'une formation végétale et que l'image satellitaire ne traduit pas.

4.2.4. Relevés et mesures proprement dits

À chaque niveau, sont appréhendés les paramètres qualitatifs et quantitatifs des peuplements herbacés et ligneux qui répondent à la nomenclature adoptée et induisent naturellement l'aspect visible sur image.

L'attention portée au peuplement herbacé concerne sa composition floristique majeure, sa hauteur et son taux de recouvrement apparent, variables indispensables pour le rattachement de la formation aux deux types physionomiques essentiels : steppes et savanes.

Le peuplement ligneux est décrit à l'échelle de l'unité d'après le type physionomique dominant, arboré ou arbustif, la composition floristique majeure et le taux de recouvrement apparent.

À l'échelle du placeau, tous les individus ligneux, arbres, arbustes, arbrisseaux et sous-arbrisseaux, sont comptabilisés, par genre et espèce. Seuls, les individus de diamètre de tige supérieur à 2,5 cm sont renseignés d'après la hauteur totale, le diamètre de la ou des tiges principales et le diamètre de la couronne.

Ces paramètres dendrométriques introduits dans des tarifs de cubage vont permettre d'apprécier le volume de bois sur pied sur chaque placeau, et par extrapolation, celui de la formation considérée.

La mesure des couronnes doit logiquement permettre d'évaluer les taux de recouvrement au sol de la formation puis de les corrélérer avec la signature spectrale sur image. Toutes les couronnes ont été mesurées à l'exception des formations extrêmes, soit très ouvertes, soit fermées pour lesquelles il n'y a plus de relation stricte entre couverture végétale et réponse spectrale.

Pour les petits ligneux de diamètre inférieur à 2,5 cm, on s'attache simplement à comptabiliser le nombre de sujets, par espèce. L'intérêt est ici d'ordre dynamique puisqu'ils représentent la régénération naturelle.

4.3. Validation des relevés de terrain

La phase de prospection au sol permet d'arrêter pour la carte une légende (sub)définitive sur laquelle s'appuie toute la phase cartographique finale, celle de la restitution notamment que l'on n'évoquera pas ici.

Le traitement méthodique des données de terrain, qualitatives et quantitatives confirme (ou infirme) l'interprétation des images et peut assurer simultanément l'extrapolation des observations et l'affectation des unités aux classes de la légende. Les corrections des erreurs d'identification, de limites et de regroupements sont apportées et complètent celles enregistrées sur le terrain.

Le calcul des volumes de bois sur pied détermine le rattachement des unités cartographiques aux classes de potentialités ligneuses.

Les calculs des recouvrements sont également réalisés et corrélés à l'aspect visible des images, la teinte plus spécialement. Les derniers doutes et imprécisions sont levés par des appuis au sol et des survols aériens supplémentaires ou par la consultation de missions récentes de photographies aériennes et d'images HRV.

5. Discussion

Différents problèmes se posent classiquement lorsque l'on aborde de tels programmes. En simplifiant, on peut dire qu'ils sont liés :

- aux produits de télédétection,
- à l'échelle de restitution,
- à la prospection au sol.

5.1. Les produits de télédétection

La bonne compatibilité entre la résolution des images MSS et celle de la carte ne peut naturellement pas masquer le décalage d'échelle important qui existe avec le niveau de perception au sol.

Un effort de synthèse constant doit donc être fourni de la part des opérateurs passant de la basse résolution de l'image à la haute résolution du terrain, et vice-versa.

Cet effort est nettement atténué en intercalant les niveaux intermédiaires de perception : photographies aériennes, survols aéroportés, images HRV ou TM, malheureusement pas toujours disponibles.

Un autre problème essentiel est celui de l'acquisition des données et de la date de «prise de vue».

Dans ce projet, l'acquisition de la couverture MSS a été largement facilitée par sa présence au Centre régional de télédétection de Ouagadougou. Elle est récente puisque la majorité des images sont de 1987 et cadrent bien la période d'observation optimale pour les thèmes abordés, le début de la saison sèche.

Toutefois, la qualité médiocre de certaines images, liée aux facteurs d'occultation que sont les brumes sèches, les aérosols et les feux de brousse d'une part et, d'autre part, la variation de la restitution observée entre images voisines, s'ajoute aux difficultés déjà évoquées.

5.2. L'échelle de restitution

Elle induit la nomenclature ou légende de la carte dans laquelle les classes de végétation retenues doivent être à la fois, suffisamment larges et «mixtes» comme peut l'être, par exemple, une mosaïque de «savanes arbustives et arborées soudaniennes». La difficulté réside donc dans les regroupements, souvent imposés, de certains types de végétation. Ces regroupements ne sont pas toujours au goût de l'écologue et du forestier qui souhaiteraient conserver plus de détails. Mais on aborde alors un autre type d'échelle qui n'est plus le nôtre.

5.3. La prospection au sol

L'un des problèmes fondamentaux auxquels le cartographe est sans cesse confronté est celui du repérage au sol quand on passe de l'image au terrain et inversement.

Au Burkina Faso, l'uniformité des paysages et la faible densité du réseau routier, ne facilitent pas les positionnements précis. L'effet immédiat est le rallongement des prospections au sol, mais surtout la difficulté de validations et d'extrapolation des résultats.

Il est clair que dans la perspective de production cartographique qui est la nôtre, ces problèmes doivent être résolus quels que soient les moyens mis en oeuvre. Dans de nouveaux programmes, l'acquisition d'un système de positionnement ou GPS prendrait ici toute sa valeur.

6. Conclusion

La carte sera éditée à Toulouse au cours du second semestre de 1992. Nous en présentons ici un extrait accompagné de sa légende (fig. 18-4, voir cahier couleur). Il faut noter l'importance du choix des couleurs qui, séparément, ont une signification écologique et biologique particulière. Les couleurs dites «chaudes», comme le jaune, l'orangé ou le beige, représentent les milieux les plus chauds et les plus secs (secteurs phytogéographiques septentrionaux), généralement moins occupés et plus pauvres. Elles rassemblent donc les formations végétales les plus xérophiles. Certains verts ou bruns froids, s'adressent aux milieux plus humides, plus denses en végétation et souvent plus cultivés. Se superposent aux couleurs, des trames et figurés conventionnels, évocateurs de phénomènes précis. La trame-point exprime la densité des arbres et arbustes qui traduit les potentialités ligneuses que l'on a cherché à mettre en valeur. Les hachures verticales représentent les zones d'occupation humaine, leur largeur en indique le taux.

Mise en oeuvre par une équipe d'enseignants, ingénieurs et chercheurs, elle a fait appel à des méthodes simples qui ne retirent en rien la part de son originalité.

Elle se doit d'être une carte dynamique, en favorisant des applications à vocation de développement, notamment :

- le lancement d'une cartographie à plus grande échelle susceptible de fournir aux scientifiques et aux décideurs des outils de travail en prise plus directe avec leurs besoins;
- l'intégration à une base de données permettant aux utilisateurs des données satellitaires de la nouvelle génération, le suivi permanent des états de surface et l'étude des changements globaux à l'échelle planétaire. Ce qui suggère que de tels programmes cartographiques soient étendus à de nouveaux pays.

7. Références

- AUBREVILLE, A. 1957. Accord à Yangambi sur la nomenclature des types africains de végétation. Bois et forêts des tropiques, n° 51, p. 23-27.
- AUBREVILLE, A. 1959. Définitions physiologiques, structurales et écologiques des forêts claires en Afrique. Extension géographique. Comité scientifique pour l'Afrique au sud du Sahara, n° 52, p. 81-92.
- AUBREVILLE, A. 1965. Conceptions modernes en bioclimatologie et classification des formations végétales. Adansonia, série 2, vol. 1, 5, 3, p. 297-306.
- BLASCO, F. 1988. The international vegetation map (Toulouse, France). in A.W. Küchler and I.S. Zonneveld. Vegetation mapping. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, chap. 31, p. 443-460.
- BLASCO, F. et LEGRIS, P. 1979. Projet pilote pour la surveillance continue de la couverture forestière tropicale à partir des informations fournies par les satellites. Food and Agriculture Organisation, Rome, Projet du Programme Environnement des Nations Unies, n° 258-132, 97 p.
- BOULET, R. 1976. Notice et cartes des ressources en sol de la Haute-Volta en 5 coupures au 1:500 000. Office de la recherche scientifique et technique des territoires Outre-Mer, Paris.
- CABAUSSEL, G. 1967. Photo-interprétation et synthèse écologique. Essai d'application à la feuille de Grenoble (1:100 000). Documents pour la carte de la végétation des Alpes, Laboratoire de biologie végétale de l'Université de Grenoble, p. 127-172.
- F.A.O. 1979. Carte écologique du couvert végétal du Bénin et du Togo (basée sur des images Landsat), au 1:5 000 000. Système mondial de surveillance continue de l'environnement, UNESCO, 2 coupures.
- F.A.O. 1980. Global environment monitoring system. Pilot project on tropical forest cover monitoring Benin, Cameroon, Togo. Project Implementation Methodology, results and conclusion, Rome, 99 p.
- FONTÈS, J. 1983. Essais cartographiques de la végétation par télédétection; quelques exemples pris en Haute-Volta. Thèse de 3^e cycle, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 179 p. + annexes.
- FONTÈS, J. 1986. Forest resources in four sahelian countries. International union of societies of foresters. Newsletter, n° 23, p. 4-5.
- GAUSSEN, H. 1957. Les cartes de la végétation. Institut français de Pondichéry, Section scientifique et technique, Pondichéry, tome 1, fasc. 2, p. 51-87.
- GUELLEC, J. 1980. Possibilités d'utilisation d'images Landsat améliorées, à l'échelle du 1:200 000 pour la connaissance des forêts. Interprétation et cartographie des types de végétation ligneuse et d'occupation du sol en zone soudano-guinéenne. Bois et forêts des tropiques, n° 193, p. 41-56.

- GUELLEC, J. 1982. Analyse visuelle d'images Landsat et exploitation des informations recueillies dans le cadre d'études forestières en zone tropicale. Actes du Symposium international de la Commission VII, Toulouse, p. 433-442.
- GUILLOBEZ, S. 1985. Milieux naturels du Burkina Faso. Carte au 1:1 000 000. Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières.
- GUINKO, S. 1984. Végétation de la Haute-Volta. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux III, 394 p. + annexes.
- GUINKO, S., BANDRÉ, E. et OUADBA, J. M. 1991. Carte de l'occupation des sols et des risques de dégradation, au 1:1 000 000, du Burkina Faso. Atlas du Burkina Faso, Projet BKF/89/005, F.A.O., 1 coupure + notice, 42 p.
- HOTTIN, G. et OUEDRAOGO, D. F. 1975. Carte géologique de la république de Haute-Volta au 1:1 000 000 et notice explicative. Ministère du commerce, de développement et des mines, Direction de la géologie et des mines, République de Haute-Volta, 58 p.
- KÜCHLER, A. W. and ZONNEVELD I. S. 1988. Vegetation mapping. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, vol. 10, 635 p.
- MONOD, T. 1957. Les grandes divisions chorologiques de l'Afrique. Comité consultatif tropical africain/Conseil scientifique pour l'Afrique, publication n° 24, Londres, 145 p.
- MONOD, T. 1963. Après Yangambi (1956) : notes de phytogéographie africaine. Bulletin de l'Institut français d'Afrique noire, Dakar, tome XXV, série A, 2, p. 594-655.
- ORSTOM 1969. Cartes pédologique de reconnaissance en 5 coupures au 1:500 000, Paris.
- UNESCO 1973. Classification internationale et cartographie de la végétation. Série Écologie et conservation, Paris, n° 6, 93 p.

19

Utilisation du capteur aéroporté MEIS II pour l'évaluation des dommages causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Nouveau-Brunswick

MARIO HINSE, OLGA DUPONT et GILBERT FAFARD

Groupe de technologie forestière appliquée d'Edmundston, Centre universitaire Saint-Louis-Maillet (CUSLM), Université de Moncton, 165, boul. Hébert, Edmundston, Nouveau-Brunswick, Canada E3V 2S8; téléphone : (506) 737-5050; télécopieur : (506) 737-5373

Résumé

Il existe dans l'est du Canada un insecte qui cause des pertes énormes de bois pour les industries forestières. Pour le seul contrôle de cet insecte, communément appelé la tordeuse des bourgeons de l'épinette [*Choristoneura fumiferana* (Clem.)], la province du Nouveau-Brunswick dépense plusieurs millions de dollars annuellement afin de minimiser les dégâts. Au cours de l'été 1989, des images numériques ont été acquises avec le capteur aéroporté MEIS II (Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner) au-dessus d'un secteur forestier du nord-ouest du Nouveau-Brunswick. L'objectif du programme de recherche est d'évaluer le potentiel des images MEIS pour l'estimation de la défoliation courante, causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, et de développer un programme opérationnel pour optimiser les opérations d'arrosage et de protection des peuplements de conifères. Introduits dans un modèle de prédiction, le canal 2 de MEIS et le rapport des bandes 7/5 (bande rouge/bande infrarouge) se sont avérés les variables les plus significatives pour la prédiction de la défoliation courante. La précision du modèle s'élève à 80,6% en utilisant des limites de classes de défoliation courante trouvées statistiquement et un pourcentage de 54,3% en utilisant des limites définies par le Ministère des ressources naturelles et de l'énergie du Nouveau-Brunswick.

1. Introduction

La foresterie représente un secteur d'activité des plus importants au Nouveau-Brunswick. L'un des principaux soucis de l'industrie forestière et des instances gouvernementales est de pourvoir à la protection de la forêt comme source d'approvisionnement de matières ligneuses. Cependant, il existe dans l'est du Canada un prédateur qui cause des pertes énormes de bois pour les industries. Pour le seul contrôle de cet insecte, communément appelé la tordeuse des bourgeons de l'épinette [*Choristoneura fumiferana* (Clem.)], la province dépense plusieurs millions de dollars annuellement afin de minimiser les dégâts. Plusieurs programmes de recherches ont été mis sur pied afin de quantifier et de localiser les dommages causés par cet insecte. Dans le cadre de ses activités, le Groupe de technologie forestière appliquée d'Edmundston a été mandaté pour réaliser une recherche sur ce sujet, en utilisant la télédétection comme source de données.

Au cours de l'été 1989, des images numériques ont été acquises avec le capteur aéroporté MEIS II (Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner) au-dessus d'un secteur forestier du nord-ouest du Nouveau-Brunswick. L'objectif du programme de recherche est d'évaluer le potentiel des images MEIS pour l'estimation de la défoliation courante, causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, et de développer un programme opérationnel pour optimiser les opérations d'arrosage et de protection des peuplements de conifères. La défoliation courante se définit comme celle qui apparaît durant l'année en cours, contrairement à la défoliation cumulative qui représente la défoliation totale que subit un arbre d'une année à l'autre.

Des études récentes ont démontré le potentiel des capteurs aéroportés pour l'évaluation des dommages causés par les insectes (LECKIE, 1987) et pour la gestion des ressources forestières en général (TILL *et al.*, 1988). Les résultats de ces études ont permis l'ouverture de nouvelles voies de recherches pour l'application des images numériques en foresterie.

La présente étude décrit les principales étapes de traitements numériques apportées aux images MEIS dans le but de rencontrer les objectifs proposés. De plus, le développement et les résultats d'un modèle de prédiction sont présentés afin de caractériser trois niveaux de défoliation courante dans les peuplements de conifères en utilisant les données du capteur MEIS II.

2. Secteur d'étude

Le secteur d'étude est localisé au nord-ouest de la province du Nouveau-Brunswick et sur une partie du territoire de la réserve de Rimouski de la province de Québec (fig. 1). Le secteur couvre un corridor d'environ 4 km de largeur par 73 km de longueur, ce qui représente une superficie approximative de 292 km². La forêt est principalement composée de sapins baumiers [*Abies balsamea* (L.)], d'épinettes [*Picea glauca* (Moench.) et *Picea mariana* (Mill)] et de feuillus tolérants [érables (*Acer saccharum* (Marsh) et *Acer rubrum* (L.)), hêtre (*Fagus grandifolia* (Ehrh)) et bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* (Britton))]. Cette zone est comprise dans les domaines forestiers (écorégions) de la rivière Verte et des Hautes terres des Maritimes (LOUCKS, 1961). L'altitude moyenne du secteur est de 375 m et se caractérise par un relief de pentes modérées. Le choix de cette zone a été principalement guidé par la gamme de niveaux de défoliation courante qu'on pouvait y rencontrer.

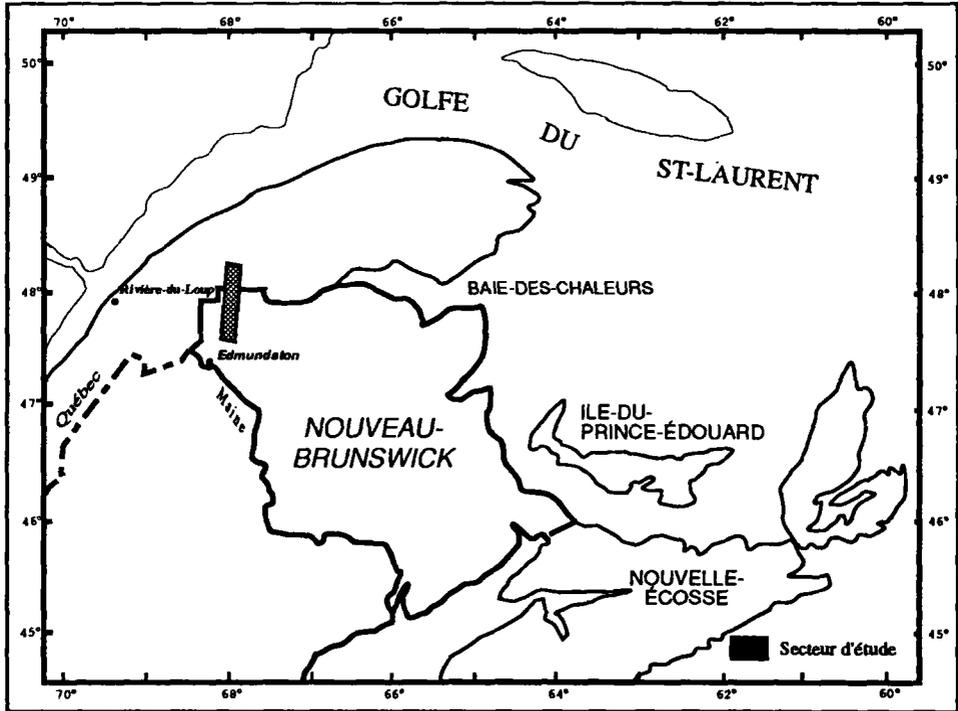


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

3. Description des données

3.1. Données du capteur MEIS II

Les images MEIS ont été acquises le 8 juillet 1989. Cette date correspondait au pic de la coloration relative à la défoliation courante causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Cette coloration rouge persiste habituellement pendant une courte durée au cours du mois de juillet (de 2 à 3 semaines), puis les aiguilles atteintes par la tordeuse tombent sous l'effet de la pluie et du vent.

Deux lignes de vol avec un recouvrement de plus de 60% ont servi à délimiter le territoire d'étude. De nouveaux filtres spectraux ont été utilisés lors de cette campagne d'acquisition. Ces filtres ont été spécialement conçus pour la détection des dommages causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Le tableau I résume les différents paramètres d'acquisition du capteur MEIS II qui ont servi lors de l'enregistrement des données.

3.2. Mesures au sol

Durant la même période, une campagne de mesures au sol a été réalisée afin de quantifier le pourcentage de défoliation sur des parcelles expérimentales. L'estimation de la défoliation courante est effectuée par une méthode oculaire. Cette méthode consiste à observer la couronne des arbres, avec une lunette d'approche depuis le sol, et ainsi évaluer le pourcentage

Tableau I. Description des données MEIS II (filtre de la tordeuse des bourgeons de l'épinette)

Canaux	Longueur d'onde (bande centrale)	Région spectrale	Gain	Paramètre	Ligne de vol 1	Ligne de vol 2
1	1034,1	(IR)	1	Date	8-7-1989	8-7-1989
2	593,0	(V)	8	Heure	15h00	15h15
3	876,1	(IR)	2	Altitude(m)	4176	4145
4	525,0	(J-V)	16	Rés. spat. (m)	2,9	2,9
5	780,2	(PIR)	1	Azimut capteur	16°	196°
6	447,9	(B)	8	Zénith solaire	31,8°	30,1°
7	666,5	(R)	8	Élév. solaire	58,2°	59,9°
8	553,2	(V)	8	Azimut solaire	133,7°	139,5°

de défoliation courante. McLEAN et LIDSTONE (1982) ont démontré que cette méthode oculaire a une précision relative de $\pm 10\%$. Les mesures ont été effectuées sur 41 parcelles comprises dans le secteur d'étude. Dix échantillons ont été rejetés soit à cause de la présence de nuages ou soit qu'ils se retrouvaient trop près de la bordure de l'image. Un total de 31 échantillons ont été utilisés pour établir la relation entre les données de défoliation courante mesurées au sol et les valeurs numériques enregistrées par le capteur MEIS.

4. Prétraitement des données MEIS

4.1. Étalonnage des données

Les valeurs numériques des images MEIS II ont été préalablement transformées en valeur de luminance apparente. Cette transformation des données permet d'étalonner chacun des canaux du capteur pour l'effet du «gain» appliqué lors de l'acquisition des données. L'équation appliquée est (McCOLL *et al.*, 1983) :

$$L_{\lambda} = Ng \cdot [(1/R \cdot G) \cdot (F/E)] \quad (1)$$

où :

L_{λ} = luminance apparente ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$);

R = sensibilité spectrale ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$);

F = fréquence de balayage (Hz);

Ng = niveau de gris (0-255);

G = gain;

E = temps d'exposition.

4.2. Correction des effets directionnels

Comme c'est souvent le cas avec les capteurs aéroportés qui ont un grand angle d'ouverture, il est nécessaire de corriger les variations d'illumination dues aux effets directionnels. Ces

effets apportent des variations d'illumination à travers les images qu'il est nécessaire de corriger afin d'obtenir un profil d'illumination constant dans les images. La méthode de correction utilisée est basée sur l'application d'une fonction polynomiale développée à partir de valeurs de luminance de sites de conifères en santé (Dupont *et al.*, 1991).

4.3. Normalisation des données

L'étalonnage des données ainsi que la correction des effets d'illumination ont été appliqués sur les deux lignes de vol. Malgré ces corrections, il n'est toutefois pas possible de comparer les sites de conifères d'une ligne de vol à une autre. La normalisation est un processus qui permet la comparaison des données d'images acquises selon des conditions différentes (tab. I). La normalisation que nous avons appliquée est basée sur deux paramètres statistiques, soit la moyenne et l'écart-type de sites (des conifères) extraits sur les deux lignes de vol (JOLY, 1986). L'équation est la suivante :

$$\text{Norm } P(i,j) = (E_r/E_p) \cdot (P(i,j) - m) + M \quad (2)$$

où :

Norm $P(i,j)$ = image normalisée;

$P(i,j)$ = image à normaliser;

E_r = écart-type de l'image de référence;

E_p = écart-type de l'image à normaliser;

M = moyenne de l'image de référence;

m = moyenne de l'image à normaliser.

5. Prédiction de la défoliation courante

5.1. Élaboration du modèle de prédiction

Le modèle de prédiction a été construit à l'aide des données de terrain décrites au point 3.2. Une étude statistique préliminaire des données de terrain nous a permis de déterminer trois classes de défoliation courante. L'intérêt de cette analyse préliminaire est qu'on a pu assigner de nouvelles limites de classes de défoliation courante basées sur les mesures relevées sur le terrain soit : faible (0-35%), modérée (36-65%), sévère (66-100%). Ces limites diffèrent de celles couramment utilisées par le Ministère des ressources naturelles et de l'énergie (MRNE) du Nouveau-Brunswick, soit les classes : santé (0-10%), faible (11-30%) modérée (31-70%) sévère (71-100%).

La première étape dans l'élaboration du modèle a consisté à introduire dans une régression de type «stepwise» les 8 bandes du capteur MEIS ainsi que 12 autres néo-canaux composés de rapports de bandes soit les rapports : (7/5), (7/3), (7/3+5), (7/2), (8/2), (7/1), (3/1), (7/3), (7-5/7+5), (7-2/7+2), (8-2/8+2), (7-3/7+3). Dans le modèle, les bandes MEIS agissent comme les variables indépendantes et la défoliation mesurée sur le terrain comme la variable dépendante. Étant donné la taille de l'échantillon (N=31), nous n'avons retenu que les modèles à 1 ou 2 variables.

5.2. Résultats

Il existe une relation linéaire multiple entre les valeurs numériques de luminance des peuplements de conifères et les valeurs de la défoliation courante mesurées sur le terrain. Le canal 2 de MEIS et le rapport des bandes 7/5 (bande rouge/bande infrarouge) se sont avérés les variables les plus significatives dans le modèle de prédiction de la défoliation. L'équation de la régression multiple est :

$$\text{DEFOL} = (0,75 \cdot \text{BND2}) + (7,14 \cdot \text{BND7/5}) - 61,9 \quad (3)$$

où :

DEFOL = défoliation courante prédite;

BND2 = bande 2 du capteur MEIS (593 nm);

BND7/5 = rapport des bandes 7 et 5 (666,5 nm / 780,2 nm).

L'erreur-type associée à cette équation est de 19% avec un R^2 de 0,74. La figure 2 présente une comparaison entre la défoliation actuelle et la défoliation prédite par le modèle. Les deux systèmes de classification sont présentés à la figure 2, soit celui proposé par l'analyse statistique et celui utilisé par le MRNE du Nouveau-Brunswick. Le pourcentage de précision du modèle est calculé en fonction du nombre total de points des valeurs prédites qui correspond aux mêmes catégories que les valeurs mesurées sur le terrain.

Ce pourcentage de précision s'élève à 80,6% en utilisant les limites de classes trouvées statistiquement et un pourcentage de 54,3% en utilisant les limites définies par le MRNE. Par la suite, l'équation 3 a été appliquée sur l'ensemble des données afin d'obtenir une image numérique de la défoliation courante. Cette pseudo-image a été filtrée et étalonnée en fonction des classes de défoliation courante trouvée statistiquement (0-35%), (36-75%) et (76-100%). Cette pseudo-classification permet une visualisation rapide du degré de défoliation courante des peuplements de conifères.

5.3. Validation du modèle de prédiction

Pour le moment, nous ne disposons d'aucunes données de terrain autre que celles introduites dans le modèle afin de valider nos résultats. Cependant nous avons à notre disposition une série de photographies obliques (35 mm) acquises lors du survol. Chaque photographie a pu être localisée sur notre territoire d'étude. Ces photographies ont été préalablement interprétées afin de déterminer le pourcentage de défoliation courante qu'on pouvait y déceler. Une fois ces pourcentages déterminés, nous les avons confrontés aux valeurs de notre pseudo-image de défoliation courante. Le résultat de cette comparaison indique une précision de 70% pour le modèle de prédiction (avec 24 sites échantillons, N=24).

6. Discussion et conclusion

Ces résultats encourageants nous indiquent que la télédétection peut jouer un rôle déterminant dans la prédiction des dommages causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Des techniques de modélisation telles que présentées par cette recherche s'avèrent un outil fort intéressant pour les gestionnaires de la forêt. Les résultats de cette étude ont une implication déterminante en ce qui concerne l'utilisation des données du capteur MEIS II pour le développement d'un programme opérationnel d'arrosage et de protection des forêts au

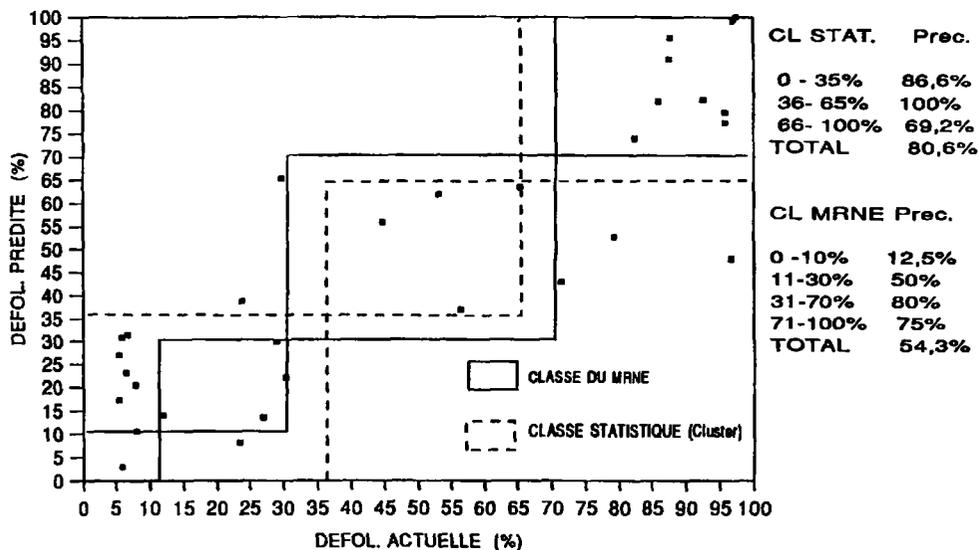


Figure 2. Comparaison entre la défoliation actuelle et la défoliation prédite; régression multiple bande 2 et (bande 7/bande 5)

Nouveau-Brunswick. L'application d'un modèle de ce genre constitue une méthode simple et relativement précise par rapport aux méthodes traditionnelles (*sketch mapping*) d'évaluation des dégâts causés par la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Cette pseudo-image numérique de la défoliation courante s'intègre rapidement au système d'information géographique du MRNE du Nouveau-Brunswick afin d'obtenir toute l'information nécessaire au programme d'arrosage et de l'aménagement forestier. Le dynamisme déployé par le MRNE du Nouveau-Brunswick et la division de Forêt Canada/Maritimes nous laisse optimistes tant qu'à l'application de cette nouvelle technique d'évaluation de la défoliation courante au cours des prochaines années.

7. Références

- DUPONT, O., HINSE, M. and FAFARD, G. 1991. MEIS Budworm Project : Preprocessing Operation - Radiometric Correction for the Illumination Effects. Internal Report, Forestry Canada-Université de Moncton, Edmundston, N.B., 50 p.
- LECKIE, D.G. 1987. Factors Affecting Defoliation Assessment Using Airborne Multispectral Scanner Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 53, n° 12, p. 1665-1674.
- JOLY, G. 1986. Traitements des fichiers-images. Télédétection satellitaire, n° 3, Paradigme, Caen, France, 150 p.
- LOUCKS, O. L. 1961. A Forest Classification for the Maritimes Provinces. Proceedings of the Nova Scotian Institute of Science, vol. 25, Part 2, p. 85-176.
- McCOLL, W. D., NEVILLE, R. A. and TILL, S. M. 1983. Multi-detector electro optical imaging scanner MEIS II. Proceedings of the 8th Canadian Symposium on Remote Sensing, Montréal.

- McLEAN, D. A. and LIDSTONE, R. G. 1982. Defoliation by spruce budworm : estimation by ocular and shoot-count methods and variability among branches, trees, and stands. *Canadian Journal of Forestry Research*, vol. 12, p. 582-594.
- TILL, S. M., GRAY, R. G. and AHERN, F. J. 1988. Remote Sensing for Forest Resource Management : CCRS Advances in Electro-Optical and Radar Imaging Systems. *Proceedings of the 16th ISPRS Congress*, vol. 27, Part 9, Kyoto, Japan, p. VII-232-239.

20

Cartes écologiques de la végétation et télédétection satellitaire

ÈVE JANODET et FRANÇOIS BLASCO

URA 688 du Centre national de la recherche scientifique / Institut de la carte internationale de la végétation (ICIV), Université Paul-Sabatier, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex, France; téléphone : 61-53-02-35; télécopieur : 61-25-90-33; télex : UNIPSAB 521 880 F

Résumé

Après une présentation générale des cartes de la végétation, cet article rappelle les principes d'utilisation de la télédétection spatiale pour leur réalisation. Trois grandes familles de cartes sont examinées. Les capteurs de la série AVHRR de NOAA, à grand champ, c'est-à-dire à faible résolution géométrique, donnent des informations très générales, presque exclusivement phénologiques, utilisables pour des cartographies à petite échelle (inférieure au 1:5 000 000). Pour réaliser des cartes à échelle moyenne, du 1:1 000 000 au 1:250 000, on utilise couramment des données de satellites du type MSS de Landsat, qui fournissent des informations de type phénologique et physionomique. Enfin, les capteurs dits «de nouvelle génération» comme TM de Landsat et HRV de SPOT, dont la résolution géométrique est de l'ordre de quelques décimètres, permettent d'établir des cartes à des échelles beaucoup plus grandes (du 1:100 000 au 1:50 000). Les classifications prennent alors aussi en compte des critères floristiques ou dynamiques. Les résultats obtenus font clairement apparaître les progrès considérables réalisés dans l'utilisation des capteurs à haute résolution géométrique. Mais il n'existe actuellement pas de méthode satisfaisante d'analyse des données AVHRR pour dresser des cartes globales de la végétation.

1. Introduction

La cartographie de la végétation en régions intertropicales a connu un essor remarquable depuis les années 60 (KÜCHLER, 1967). Avec l'apparition de l'imagerie numérique et le grand nombre de données satellitaires mises à notre disposition depuis les années 70, il est évident que les méthodes et les moyens mis au service de la cartographie ont considérablement évolué.

La comparaison des cartographies traditionnelles en milieu intertropical, établies à partir de photographies aériennes, et des cartographies issues de l'interprétation et des traitements des données satellitaires permet de mettre en évidence les problèmes rencontrés et les progrès réalisés dans l'utilisation des capteurs à haute et basse résolutions géométriques.

2. Quelques rappels fondamentaux

2.1. Diversité des conceptions cartographiques

Il est extrêmement difficile, encore aujourd'hui, de donner une définition unique de ce qu'est une carte de la végétation. Chaque pays, chaque organisation internationale ont leurs propres méthodes et systèmes de classification, en fonction de leurs objectifs, de la taille de la région cartographiée ou des moyens mis en œuvre.

En simplifiant, on peut subdiviser les cartes de la végétation en deux grandes classes : celles qui tiennent compte des paramètres du milieu et du dynamisme des peuplements et celles dans lesquelles la physionomie et la flore de ces mêmes peuplements sont presque exclusivement prises en compte. La figure 1 illustre ce propos. On conçoit ainsi des cartes avant tout floristiques et des cartes essentiellement dynamiques et écologiques. Il est clair que les données sur la flore, sur la physionomie de la végétation et sur l'utilisation de ces ressources par l'homme conduisent à la production de cartes relativement statiques, dites «cartes d'utilisation du sol». De telles cartes ne sont en fait qu'une représentation spatiale d'inventaires. L'emploi de telles cartes est limité, car elles n'informent que sur l'état de la végétation selon un petit nombre de critères (floristiques, physionomiques) et à une date donnée (GAUSSEN, 1957). Il paraît plus intéressant de se demander ce qui conditionne cet état et comment il pourrait évoluer. Il s'agit donc d'analyser la végétation en termes dynamiques. On doit alors prendre en compte les paramètres physiques et biotiques du milieu et les types de végétation correspondants, plus ou moins perturbés et donc à différents stades de leur évolution, progressive ou régressive. On établit ainsi des cartes écologiques de la végétation, auxquelles Gausсен associe la notion de «séries de végétation».

Il va aussi de soi que la diversité des cartes de la végétation est intimement liée à celle des échelles de représentation. Par exemple, lorsqu'on cartographie une île telle que la Grande Comore au 1:20 000, il est possible de distinguer un nombre élevé de phytocénoses. Mais cette île, à une échelle mondiale, c'est-à-dire à très petite échelle, n'apparaît même pas.

On trouvera plus de détails sur la réalisation des cartes de la végétation dans KÜCHLER et ZONNEVELD (1988).

De manière classique les cartes de la végétation étaient réalisées à l'aide de la couverture aérienne de la région étudiée, qui permettait d'extrapoler des connaissances et des relevés de terrain sur des surfaces limitées. La télédétection spatiale a fourni un nouveau moyen d'observer la surface terrestre et des méthodes de cartographie de la végétation ont été

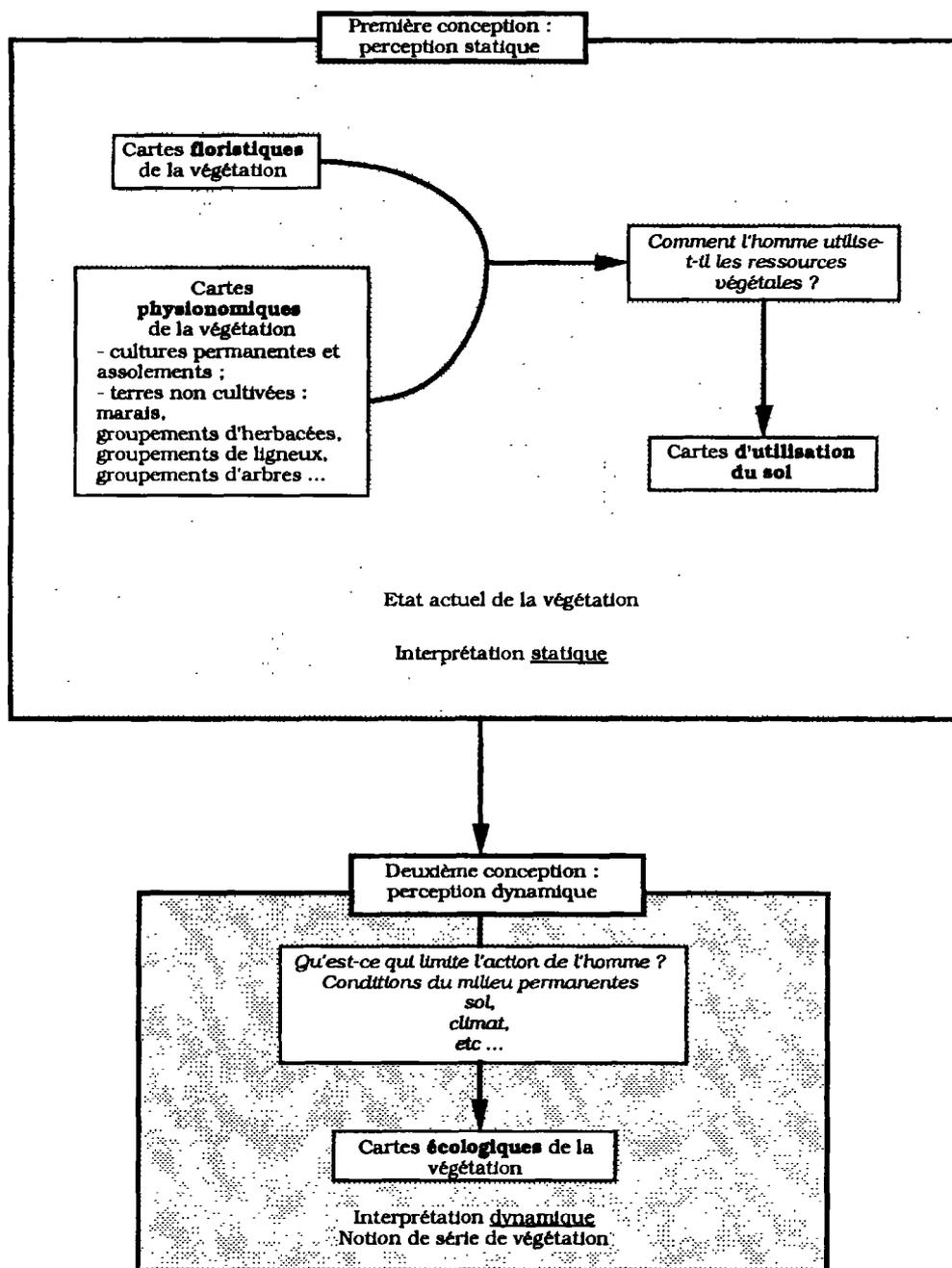


Figure 1. Les cartes de la végétation (JANODET, 1990, voir GAUSSEN, 1957)

développées autour de cet outil. Elles sont très similaires dans leur démarche aux méthodes classiques, mais l'imagerie satellitaire a introduit des procédures nouvelles liées notamment à la taille du champ de vision et à la nature numérique des données.

2.2. Principaux apports de la télédétection spatiale à la cartographie végétale

2.2.1. Comportement spectral des végétaux

La réalisation de cartes de la végétation à l'aide de données de télédétection spatiale repose sur la possibilité de reconnaître, à partir de leurs caractéristiques radiométriques, des types de végétation selon des critères de classification «traditionnels».

Les principes de l'utilisation de la télédétection spatiale pour l'observation et la cartographie de la végétation peuvent être résumés de façon relativement simple. Les spécialistes de la végétation s'intéressent essentiellement à deux ou trois bandes spectrales dont sont équipés les principaux capteurs satellitaires. La bande visible rouge (VIS), dans les longueurs d'onde de 0,6 à 0,7 μm environ, est intéressante car elle inclut les longueurs d'onde du rayonnement photosynthétiquement actif : elle correspond à la zone de forte absorption par les pigments photosynthétiques des plantes. Dans la bande proche infrarouge (PIR), de 0,7 à 1 μm environ, on observe un minimum d'absorption des radiations par les végétaux, mais un maximum de réflexion due aux propriétés anatomiques des feuilles, notamment aux cuticules et aux discontinuités des mésophylles. De plus, au delà de 1,4 μm , le comportement spectral des végétaux est fonction de leur teneur en eau. Un végétal en bon état sanitaire présente de fortes diminutions de sa réflectance autour de 1,45 μm et de 1,9 μm . Au contraire, un stress hydrique provoque une atténuation de ces bandes d'absorption.

L'allure des courbes de réflexion et d'absorption du spectre lumineux par les végétaux, présentée dans la figure 2, est toujours la même. On observe cependant des variations en fonction des paramètres suivants. Des individus d'espèces différentes présentent des réponses spectrales différentes. *A fortiori* il faut distinguer les comportements spectraux de peuplements monospécifiques et plurispécifiques. La télédétection doit donc permettre de différencier des couverts végétaux selon leur composition spécifique, c'est-à-dire sur des critères floristiques. De plus, des feuilles isolées, des feuillages ou des ensembles d'individus, simples ou en mosaïque, n'ont pas le même comportement spectral. La configuration géométrique du couvert, par exemple l'orientation des feuilles, le pourcentage de couverture du sol (que l'on assimile souvent abusivement à l'indice de surface foliaire), la structure et la hauteur des végétaux, ont une influence sur les réponses spectrales. Un second critère de différenciation des couverts végétaux sera donc la physionomie des peuplements observés. Enfin, au cours de leur développement, les végétaux présentent des caractéristiques foliaires et de photosynthèse différentes, notamment en relation avec les variations saisonnières du climat. La phénologie des végétaux est donc aussi un facteur de variation du comportement spectral.

La cartographie de la végétation repose donc sur l'étude des variations spatiales et temporelles des réponses radiométriques des végétaux, comme l'illustrent les figures 3a et 3b.

2.2.2. Quelques avantages de l'utilisation de la télédétection satellitaire

Les avantages de l'utilisation de la télédétection satellitaire sont en fait communs à tous ses usages dans les domaines de la cartographie.

La possibilité de visualiser et de traiter des surfaces importantes est très intéressante. Cette vue synoptique est notamment un avantage pour établir des cartographies nationales, régionales ou même globales, c'est-à-dire à l'échelle de la planète.

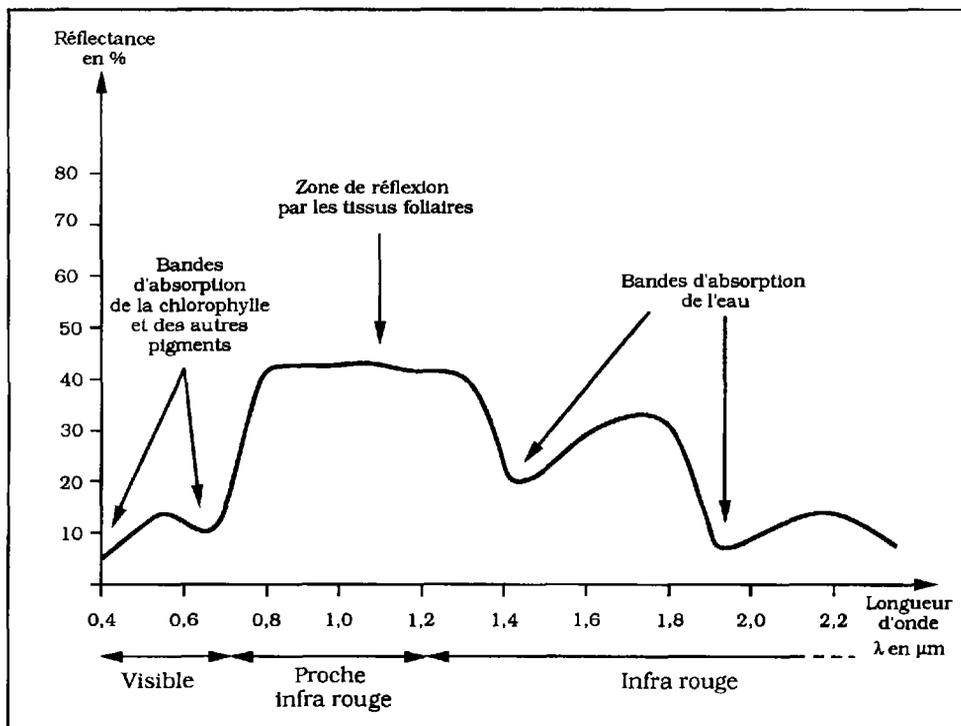


Figure 2. Courbe théorique de réflectance de la végétation verte

De plus, la rapidité d'acquisition et de traitement des données d'origine satellitaire diminue les délais de réalisation des cartes et augmente donc leur validité temporelle. L'acquisition régulière de données radiométriques permet de répéter les procédures de traitements et de cartographie avec des fréquences assez élevées. Ceci s'avère indispensable pour le suivi de l'évolution des surfaces, par exemple lors d'une évaluation de la déforestation. Cette cartographie périodique et comparative est d'autant plus performante que les données sont sous forme numérique et intégrables dans une base de données de type système d'information géographique.

Enfin, le coût de la cartographie est diminué. L'évaluation du coût d'une méthode de cartographie est complexe et doit tenir compte des paramètres suivants. Le coût d'acquisition des données est celui des photographies aériennes, des données radiométriques satellitaires ou des produits dérivés. Le coût de traitement des données concerne l'interprétation visuelle et les traitements numériques, dont la réalisation sera plus ou moins difficile selon les régions concernées, en fonction de la topographie, des types de végétation, etc. Dans le cas de l'utilisation de données de télédétection spatiale, vient s'ajouter à ce coût l'amortissement des matériels de visualisation et informatiques de traitement des données. Le coût des enquêtes de terrain est aussi très important. De cette connaissance de terrain dépend l'exactitude de l'interprétation des photographies et des données satellitaires. Enfin, il faut tenir compte du coût de la restitution cartographique et des produits imprimés.

Le tableau I, proposé par BLASCO (1990), établit la comparaison des coûts de cartographies forestières pour deux méthodes, l'une faisant appel à des photographies aériennes et l'autre à des données de type HRV de SPOT. Il semble probable que le coût par km² est de 50% inférieur lorsque les études de la végétation sont menées à partir de données satellitaires à haute résolution.

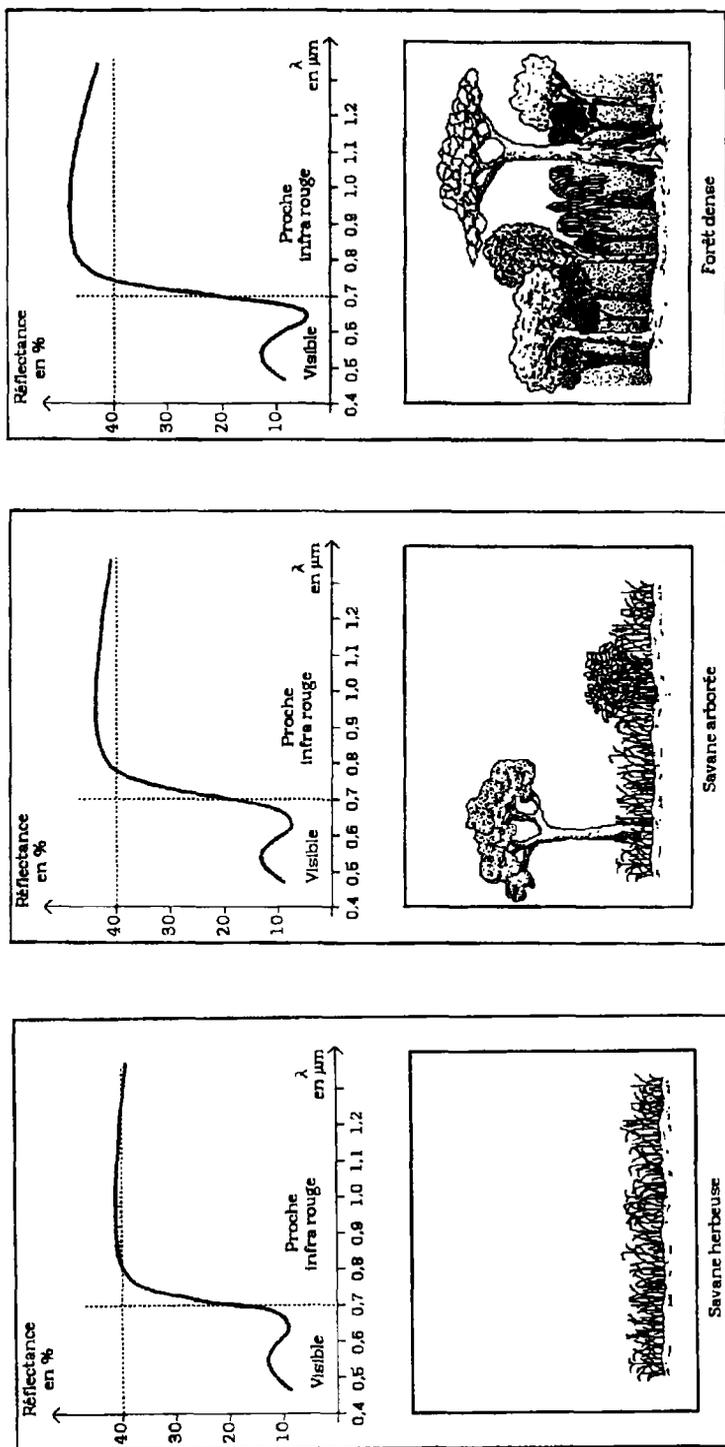


Figure 3a. Exemples d'utilisation des variations des réponses radiométriques pour la discrimination des couverts végétaux

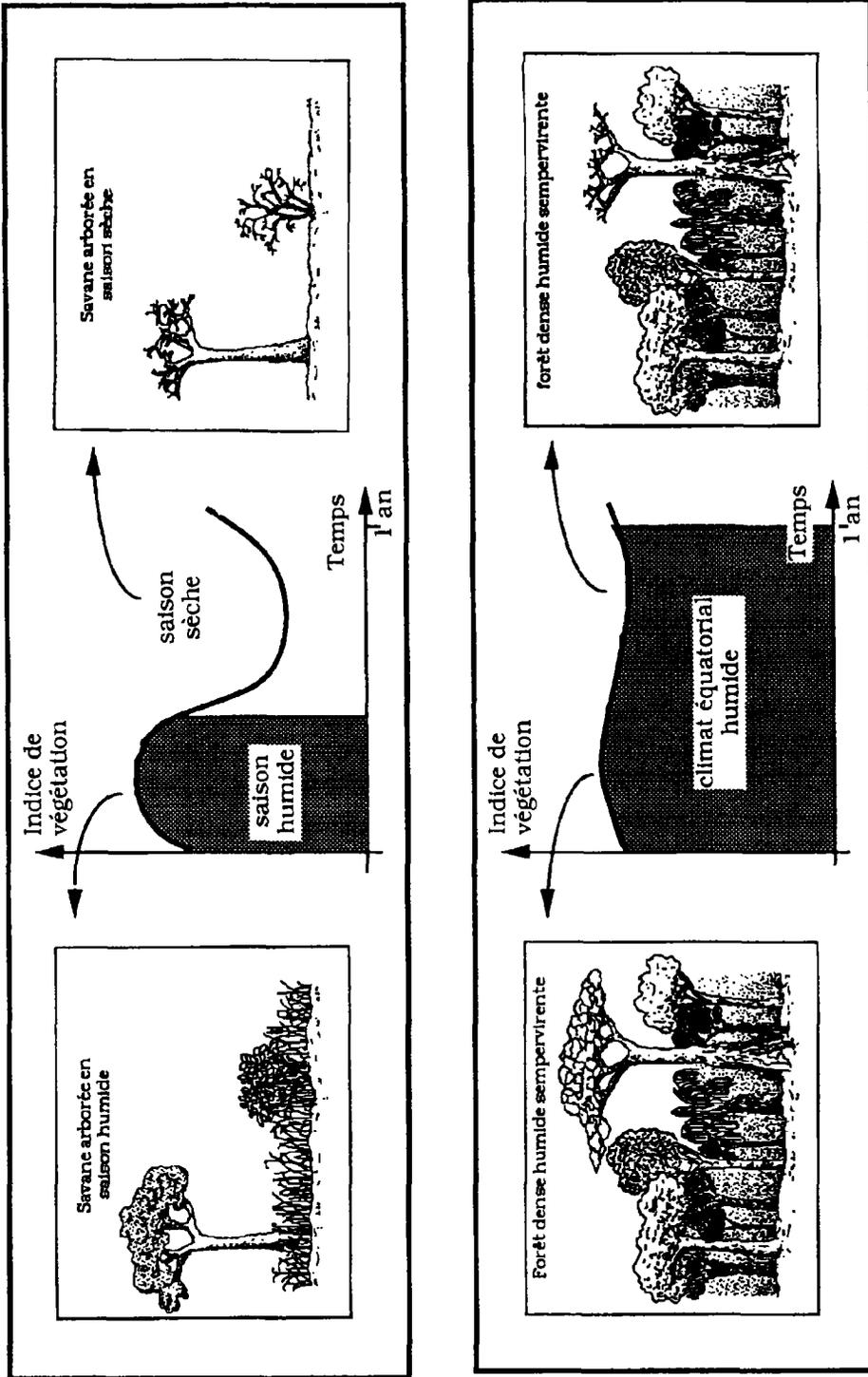


Figure 3b. Exemples d'utilisation des variations temporelles des réponses radiométriques pour la discrimination des couverts végétaux

Tableau I. Synthèse comparative des coûts de cartographie forestière à partir de photographies aériennes et de données satellitaires (BLASCO, 1990)

Coût		Photographies aériennes 3600 km ²			Télédétection satellitaire SPOT XS 3600 km ²		
1.	Données	18 missions photo 1:100 000 : 13 500 \$US Traitement : 1 100 \$US Impression :			Film papier : 366 \$US CCT : 1 950 \$US		
		Total : 14 600 \$US 4,05 \$US/km ²			Total : 2 316 \$US 0,64 \$US/km ²		
		Durée (jours)	Coût par unité de temps	Coût total par km ²	Durée (jours)	Coût par unité de temps	Coût total par km ²
2.	Traitement numérique				5	400	0,56
3	Enquêtes de terrain	10	360	1	10	360	1
4.	Interprétation visuelle	15	140	0,58	10	140	0,39
5.	Produits	15	100	0,42	15	100	0,42
	Statistiques	5	100	0,14	5	100	0,14
	Sous total (2 à 5)	45	700	2,14	45	100	2,51
	TOTAL (1 à 5)			6,19			3,15

En ce qui concerne des cartographies à petite échelle, les problèmes se posent différemment en raison de la nécessité de disposer de méthodes et d'instrument autorisant une perception globale. Leur fiabilité fait actuellement l'objet d'études approfondies.

3. Notion d'échelles et discrimination des classes de végétation

3.1. Notion d'échelles spatiales

La télédétection satellitaire possède des limites comme tout moyen mis à disposition des spécialistes pour réaliser des cartes.

Ces limites sont principalement dues aux caractéristiques des données satellitaires et donc des capteurs qui les fournissent. Ainsi chaque type de capteur satellitaire peut être utilisé de façon optimisée pour un certain type de cartes, et notamment pour une certaine échelle de représentation.

En cartographie, la notion d'échelle spatiale est très importante. Voici comment MALINGREAU et BELWARD (1991) analysent cette question en tant que spécialistes de la télédétection.

L'échelle spatiale intrinsèque est celle du processus écologique ayant lieu au sol, dont on se préoccupe. Elle dépend de la taille des individus impliqués dans le phénomène dont on observe la traduction radiométrique.

L'échelle spatiale de mesure de ce phénomène est fonction des instruments. En télédétection spatiale, il s'agit de la résolution géométrique, c'est-à-dire de la taille de la surface au sol d'où dérivent les mesures faites par le capteur.

Enfin, l'échelle géographique est l'échelle de la restitution cartographique. C'est donc le ratio entre les distances sur la carte et les distances sur le terrain.

La non-concordance des échelles intrinsèque et de mesure peut être une source de confusion lors de l'interprétation des données satellitaires. Ce que détectent les capteurs

satellitaires, à une échelle de mesure donnée, peut être relié au paramètre ou au processus écologique étudié, à une échelle intrinsèque différente. La question est de savoir comment les critères radiométriques utilisés en télédétection spatiale traduisent les différents critères de classification utilisés habituellement (critères floristiques, physionomiques, phénologiques, de fonctionnement, etc.).

Le développement de nouveaux concepts peut alors s'avérer nécessaire. De plus, il est judicieux d'examiner les relations entre les différentes échelles de manière statique mais aussi dans leurs évolutions temporelles. Pour résumer ce point très complexe mais fondamental, la difficulté majeure, non résolue à ce jour, est de savoir comment on passe d'une mesure physique, spatiale, à la perception d'un phénomène.

3.2. Niveau de perception et discrimination permise : principes

L'adéquation, ou la non-adéquation, entre l'échelle intrinsèque et l'échelle de mesure détermine donc un niveau de perception de la végétation, que l'on pourrait qualifier «d'échelle limitante».

Selon les critères d'observation et de classification retenus pour la cartographie, on pourra alors distinguer plus ou moins de classes de végétation, en fonction des caractéristiques des données satellitaires utilisées.

Dans le cas de traitement de données satellitaires, les résultats de la cartographie vont aussi dépendre de la performance des outils mathématiques et informatiques utilisés. Par exemple, l'interprétation visuelle de l'image tient compte de la texture et de la structure des «objets radiométriques». Mais ces analyses de texture et de structure sont encore difficilement réalisables par des traitements automatisés des images (reconnaissance des formes)

4. Grands types de cartographies végétales et outils satellitaires associés

4.1. Cartographie à petite échelle

La cartographie à petite échelle, c'est-à-dire inférieure au 1:5 000 000 ou au 1:1 000 000, vise à étudier des zones biogéographiques ou des grands biomes. Il s'agit de cartes établies à des échelles régionales, continentales, voire globales. Du fait de ces dimensions, les capteurs les plus adaptés à ces cartographies sont les capteurs à grand champ, qui permettent de couvrir la surface étudiée avec un nombre limité de scènes (tab. II).

Le radiomètre AVHRR (Advanced very high resolution radiometer) de la NOAA (National oceanic and atmospheric administration) fournit ainsi des données journalières sur tout le globe, avec une résolution de 1,1 km (données HRPT - High resolution picture transmission - et LAC - Local area coverage -) ou 4 km (données GAC - Global area coverage) au nadir. Ses caractéristiques sont présentées sur le tableau II. À une telle échelle de mesure, on ne peut évidemment détecter que des phénomènes concernant un ensemble important de végétaux : un pixel de 1,1 km de côté représente au sol une surface de 121 hectares! Un pixel AVHRR est donc la résultante d'une intégration complexe de données élémentaires sur le terrain.

L'interprétation et le traitement des données AVHRR à une seule date montrent des résultats assez limités. Les discriminations entre classes de végétation peuvent être améliorées avec un suivi temporel des réponses radiométriques ou d'indices calculés tels que le NDVI (Normalised difference vegetation index, ou indice de végétation différentiel normalisé).

Tableau II. Caractéristiques des principaux capteurs satellitaires, échelles et niveaux de perception associés

Instrument Satellite (altitude)	Canal	Bande spectrale	Résolution	Répétitivité Champ	Perception Échelle	Discrimination
AVHRR NOAA (860 km)	1	0,58 à 0,68 μm	HRPT, LAC : 1 km GAC : 4 km GVI : 15 km	Quotidienne 3000 km par 3000 km	Globale et régionale De 1:1 000 000 à 1:10 000 000	Forêt/non forêt Phénologie
	2	0,725 à 1,1 μm				
	3	3,55 à 3,95 μm				
	4	10,5 à 11,3 μm				
	5	11,5 à 12,5 μm				
MSS Landsat (915 km)	4	0,45 à 0,6 μm	56 m par 79 m	18 jours 180 km par 180 km	Nationale De 1.200 000 à 1·1 000 000	Phénologie Physionomie
	5	0,56 à 0,7 μm				
	6	0,67 à 0,8 μm				
	7	0,78 à 1,1 μm				
TM Landsat (705 km)	1	0,45 à 0,52 μm	30 m par 30 m	16 jours 180 km par 180 km	Locale De 1·50 000 à 1:200 000	Phénologie Physionomie Physiographie Groupe floristique dominant
	2	0,53 à 0,61 μm				
	3	0,62 à 0,69 μm				
	4	0,78 à 0,91 μm				
	5	1,57 à 1,78 μm				
	6	10,4 à 12,6 μm	120 m par 120 m			
	7	2,10 à 2,35 μm				
HRV SPOT (833 km)	1	0,500 à 0,590 μm	20 m par 20 m	26 jours 60 km par 60 km		
	2	0,615 à 0,680 μm				
	3	0,790 à 0,890 μm				
	P	0,510 à 0,730 μm	10 m par 10 m			

Ainsi, on peut citer les travaux de TUCKER *et al.* (1985a) et de TOWSHEND et JUSTICE (1986) sur l'Afrique et les travaux de TOWSHEND *et al.* (1987) sur l'Amérique du Sud, qui permettent de distinguer une dizaine de classes de végétation sur chaque continent. GOWARD *et al.* (1987) ont aussi utilisé ces données pour comparer les végétations d'Amérique du Nord et d'Amérique du Sud.

La description des profils temporels d'indices de végétation a été reprise récemment par VIOVY (1990) sur des données GVI (Global vegetation index, à 15 km de résolution au sol) de 1983 à 1988, sur l'Afrique de l'Ouest. L'utilisation de l'intelligence artificielle et de la modélisation de l'évolution *a priori* des couverts végétaux (modèles de Markov décrivant trois états - repos, croissance et sénescence - et les transitions possibles) a permis à l'auteur de distinguer sept classes de savanes.

L'instrument AVHRR de NOAA, bien qu'initialement destiné à la météorologie, a donc trouvé des applications en cartographie végétale, à des échelles petites, dans lesquelles les classifications se limitent le plus souvent à la discrimination de grands biomes. Il est possible, grâce à la répétitivité de l'observation, d'acquérir des informations phénologiques sur ces biomes relativement précises.

4.2. Cartographie à moyenne échelle

Elle concerne surtout l'étude des formations végétales, à une échelle nationale, soit du 1:250 000 au 1:1 000 000 environ.

C'est typiquement le cas de la série des cartes internationales du tapis végétal et des cartes écologiques du couvert végétal, au 1:1 000 000, établies par l'Institut de la carte internationale

de la végétation (I.C.I.V.) pour l'Organisation des nations unies pour l'agriculture et contre la faim dans le monde (F.A.O., 1989). On peut aussi citer différentes cartes réalisées par SCET-International ou le CIRAD, dans le cadre d'études de potentialités forestières ou de pâturages - Guinée Bissau (SCET-INTERNATIONAL, 1978), Sénégal (SCET-INTERNATIONAL *et al.*, 1979), Djibouti (CIRAD-IEMVT, 1987), Mali (SCET-INTERNATIONAL *et al.*, 1988), Guinée (SCET-AGRI *et al.*, 1989), etc. Ces cartes ont été établies à partir de données satellitaires du capteur MSS (Multispectral scanning system) dont les caractéristiques figurent sur le tableau II.

En ce qui concerne la cartographie forestière, alors que les données satellitaires AVHRR ne permettent de distinguer que la végétation forestière de ce qui n'en est pas, les données MSS conduisent à la différenciation de plusieurs types de forêts selon leur physionomie, essentiellement sur des critères de densité.

L'exemple de la cartographie de la F.A.O. (1980) sur le Bénin, le Togo et le Cameroun est intéressant par la démarche employée. Cette méthode a aussi été décrite sur des travaux de cartographie en Asie (F.A.O., 1989). L'interprétation visuelle d'images Landsat a permis d'identifier moins de dix classes de végétation sur les critères physionomiques précédemment cités. Les cartes finales présentent cependant une trentaine de classes de végétation. Elles ont été conçues à l'aide d'une stratification écologique de la zone d'étude (BALTAÏE, 1980) : en considérant de manière interactive la distribution de ces classes identifiables à partir des images satellitaires et celle des principaux facteurs du milieu (topographie, climat, sol). Ces cartes sont donc des cartes écologiques de la végétation, au sens où l'entendait GAUSSEN (JANOÏET, 1990).

Avec l'étude de l'évolution temporelle de ces données radiométriques MSS, on peut aussi caractériser des composantes d'un couvert (strates herbacées, arbustives et arborées) si leur phénologie est contrastée (GIRARD et GIRARD, 1989). On allie donc dans ce type de cartographie des critères de discrimination phénologiques et physionomiques.

4.3. Cartographie locale

À une échelle de cartographie plus grande, par exemple entre 1:50 000 et 1:100 000, on peut s'intéresser à l'étude des étages et séries de végétation, qui fait appel à des notions de floristique. L'étage de végétation correspond à une unité de végétation caractérisée par des espèces dominantes, installées sur une certaine amplitude altitudinale. La série de végétation représente la succession de groupements végétaux, en lieu donné, depuis le sol nu jusqu'à la végétation dite climacique.

Les étages et séries de végétation pourront être distingués à partir d'évolutions phénologiques différentes, en réponses à des conditions climatiques différentes ou des compositions floristiques et des physionomies différentes. Ceci est possible sur des images TM (Thematic Mapper) et HRV (Haute Résolution Visible). Mais les observations satellitaires ne peuvent pas remplacer les données de terrain, notamment les connaissances botaniques.

À des échelles encore plus grandes, supérieures au 1:50 000, on étudie les communautés végétales. Il s'agit d'un ensemble de végétaux supérieurs structuré et généralement homogène occupant une superficie de terrain homogène dans ses conditions physiques et biologiques (DELPECH dans GIRARD et GIRARD, 1989). Du fait de la taille des objets étudiés, l'utilisation de la télédétection n'est possible qu'avec une résolution élevée et des bandes spectrales assez étroites pour permettre une distinction la plus fine possible des réponses radiométriques.

On utilise pour ce type de cartographie de la végétation les capteurs dits de «nouvelle génération», type TM et HRV. Leur résolution géométrique est de 30 à 10 m au sol (tab. II).

On conçoit donc tout d'abord qu'il devient possible, avec de telles données, de distinguer des formations végétales de structures particulières. Par exemple, on peut différencier des plantations de jeunes hévéa, en ligne, des surfaces de forêt secondaire (JANODET, 1989), ou bien encore des figures «étroites» telles que des formations ripicoles ou des zones forestières morcelées. En milieu soudanien, le décalage phénologique entre ligneux et herbacés conduit à cartographier différentes classes de savanes (LAVENU *et al.*, 1988).

De plus, le suivi du comportement spectral au cours du temps permet de caractériser des unités de végétation dominées par une ou plusieurs espèces (GIRARD et GIRARD, 1989). Mais ici encore, la reconnaissance des espèces ne peut se faire que par la connaissance du terrain.

5. Vers un nouveau type de cartographie

De plus en plus, les cartes de végétation sont établies avec des objectifs précis, tels que le suivi de la déforestation, des potentialités pastorales, etc.

La télédétection apporte alors la possibilité d'effectuer des révisions périodiques de l'état des surfaces. Ainsi, la F.A.O. développe actuellement une méthodologie d'évaluation de la déforestation à partir des données MSS, TM et HRV, intégrées dans un système géographique d'information (F.A.O., 1991).

De plus, on établit maintenant des cartes de production végétale, à petite ou moyenne échelle à partir de données AVHRR (TUCKER *et al.*, 1983, 1985b et 1986) ou à échelle locale (DE WISPELAERE *et al.*, 1988). C'est une première étape dans l'utilisation de l'information radiométrique dans la réalisation de cartes selon une nouvelle typologie de classification, prenant en compte par exemple la productivité primaire brute.

Demain sans doute, on pourra cartographier des éléments essentiels du fonctionnement de la biosphère continentale. On s'éloigne donc de la vision classique de la végétation selon des critères phénologiques, physiologiques et floristiques. En effet, la télédétection spatiale est peut-être mieux adaptée à la perception de processus globaux qui gouvernent notre environnement.

6. Conclusion et perspectives

Des progrès considérables ont été réalisés dans l'utilisation de la télédétection spatiale pour la cartographie de la végétation, surtout avec les capteurs dits «de nouvelle génération», à haute résolution géométrique. Cependant, on n'a pas encore exploité toutes les possibilités offertes par les données satellitaires. De vastes domaines de recherche restent à explorer, que ce soit pour améliorer les données mêmes (prétraitements et corrections) ou pour développer leurs utilisations, face à de nouvelles exigences scientifiques.

Un premier effort doit porter sur la compréhension et l'interprétation de la donnée radiométrique pour l'étude de la végétation. Notamment à petite échelle, on a besoin de développer de nouveaux concepts permettant d'appréhender des phénomènes écologiques à des dimensions éloignées de celles de l'écophysiologie classique. Dans le contexte actuel des

préoccupations globales, il serait bon de définir de nouvelles typologies végétales, mieux adaptées aux usages qu'on en fait dans des domaines comme la climatologie. Par exemple, les calculs de flux gazeux entre la biosphère et l'atmosphère nécessiteraient des cartes dont le système de classification rend compte des productions et des consommations de CO₂ (dioxyde de carbone) par les peuplements végétaux, plutôt que de leur floristique.

D'autre part, on ne connaît pas encore toutes les performances des données satellitaires disponibles. Pour les données à petite échelle en particulier, on peut citer le cas des données AVHRR. Les travaux réalisés jusqu'à présent avaient négligé les canaux thermiques du capteur. Or ces canaux semblent permettre une meilleure discrimination des différents types de forêts (LAPORTE, 1990; ACHARD, 1989; ACHARD and BLASCO, 1990).

On n'a pas parlé ici de la télédétection dans le domaine des micro-ondes passives et actives (ERS-1 a été lancé le 17 juillet 1991). Ces domaines sont pourtant importants, en particulier du fait que les brumes et les nuages ne les affectent pas, et pour étudier la composante verticale de la végétation, grâce au pouvoir de pénétration de certaines longueurs d'onde.

Enfin, comme dans tout domaine utilisant la télédétection spatiale, les progrès réalisés dans les traitements de l'image seront aussi fondamentaux : en ce qui concerne les corrections des données (notamment vis à vis des perturbations atmosphériques), mais aussi sur les traitements eux-mêmes (reconnaissance des formes, analyse de la texture des images, analyse de séries temporelles, etc.).

Mais actuellement, la télédétection spatiale reste souvent, dans le domaine de la cartographie de la végétation, un moyen d'extrapoler sur de grandes surfaces une connaissance de terrain localisée dans l'espace, ou d'orienter les recherches à effectuer au sol, au même titre que les anciennes photographies aériennes. L'utilisation de la donnée radiométrique même n'en est qu'à ses débuts.

7. Références

- ACHARD, F. 1989. Étude des rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 243 p.
- ACHARD, F. and BLASCO, F. 1990. Analysis of vegetation seasonal evolution and mapping of forest cover in West Africa with the use of NOAA AVHRR HRPT data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56, n° 10, p. 1359-1365.
- BALTAXE, B. 1980. The application of Landsat data to tropical forest surveys. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 120 p.
- BLASCO, F. 1990. Guidelines on use of Landsat and SPOT for land use and forest change. Provisionnal version, F.A.O., Rome, 63 p.
- CIRAD - IEMVT 1987. La végétation et les potentialités pastorales de la République de Djibouti. Maisons-Alfort, 1:250 000.
- F.A.O. 1980. Global environment monitoring system, pilot project on tropical forest cover monitoring. Benin-Cameroon-Togo, project implementation : methodology, results, conclusion. Rome, 99 p.
- F.A.O. 1989. Classification and mapping of vegetation types in tropical Asia. Rome, 169 p.
- F.A.O. 1991. Procedure for interpretation and compilation of high resolution satellite data for assessment of forest cover state and change. Rome, 33 p.
- GAUSSEN, H. 1957. Les cartes de végétation. Bulletin de la Société d'histoire naturelle de Toulouse, tome I, fascicule 2, Institut français de Pondichéry, p. 51-76.

- GIRARD, M. C. et GIRARD C. M. 1989. Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. Collection Sciences agronomiques, Editions Masson, Paris, 260 p.
- GOWARD, S. N., DYE, D., KERBER, A. and KALB, V. 1987. Comparison of north and south american biomes from AVHRR observation. Geocarto International, vol. 1, p. 27-39.
- JANODET, E. 1989. Télédétection et cultures industrielles : choix de site de plantation. École nationale du génie rural des eaux et des forêts (Paris), Société GEOSYS, Toulouse, 32 p.
- JANODET, E. 1990. Comparaison de deux cartes écologiques de la végétation du Cameroun. Centenaire Henri Gaussen, Toulouse, 3-7 juin 1991, Université Paul-Sabatier.
- KÜCHLER, A. W., 1967. Vegetation mapping. Ronald Press Company, New-York, 472 p.
- KÜCHLER, A. W. and ZONNEVELD, I. S. (ed.) 1988. Vegetation mapping. Handbook of vegetation science, Lieth (ed.), vol. 10, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 635 p.
- LAPORTE, N. 1990. Étude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation tropicale : utilisation de données satellitaires NOAA AVHRR sur l'Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 231 p.
- LAVENU, F., BLASCO, F., PODAIRE, A., DESCHAMPS, P. Y., et ANOH, J. C. 1988. Études des formations de savanes dans la zone soudanienne, le secteur nord ouest du parc de la Comoe, Côte d'Ivoire. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats, Centre national d'études spatiales, CEPADUES Éditions, Toulouse, p. 429-445.
- MALINGREAU, J. P. and BELWARD, A. S. 1991. Scale considerations in vegetation monitoring using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*.
- SCET-AGRI, BDPA et CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL / CIRAD 1989. Potentialités et possibilités de relance de l'activité forestière. Synthèse régionale et nationale - République de Guinée. Paris, carte au 1:700 000.
- SCET-INTERNATIONAL 1978. Mapa da ocupação dos solos, Republica da Guinée Bissau. Paris, carte au 1:200 000.
- SCET-INTERNATIONAL et CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL / CIRAD 1979. Couverture végétale et formations forestières, Sénégal. Paris, carte au 1:500 000.
- SCET-INTERNATIONAL, DIRECTION DES EAUX ET FORÊTS DU MALI et CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL / CIRAD 1988. Cartes des formations végétales - Mali, feuilles des cercles de Kati et de Kolokani (province de Koulikoro) et des cercles de Koutiala et Yorosso (province de Sikasso). Paris, carte au 1:200 000.
- TOWSHEND, J. R. G. and JUSTICE, C. O. 1986. Analysis of the dynamics of african vegetation using normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 11, p. 1435-1445.
- TOWSHEND, J. R. G., JUSTICE, C. O. and KALB, V. 1987. Characterization and classification of south american land cover types using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, n° 8, p. 1189-1207.
- TUCKER, C. J., VANPRAET, C. L., BOERWINKEL, E. and GASTON, A. 1983. Satellite remote sensing of total dry matter production in the Senegalese Sahel. *Remote Sensing of Environment*, vol. 13, p. 369-375.
- TUCKER, C. J., TOWSHEND, J. R. G. and GOFF, T. E. 1985a. African land cover classification using satellite data. *Science*, vol. 227, n° 4685, p. 369-375.
- TUCKER, C. J., VANPRAET, C. L., SHARMAN, M. J. and VAN ITTERSUM, G. 1985b. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, p. 223-249.
- TUCKER, C. J., JUSTICE, C. O. and PRINCE, S. D. 1986. Monitoring the grassland of the Sahel 1984-1985. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 11, p. 1571-1581.

- VIOVY, N. 1990. Étude spatiale de la biosphère terrestre : intégration de modèles écologiques et de mesures de télédétection. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 213 p.
- DE WISPELAERE, G., PEYRE DE FABREGUES, B. et GACHET, R. 1988. Évaluation de la biomasse herbacée en zone sahélienne dans la région du sud Tamesna (Niger) : «Perspectives et limites d'utilisation des données SPOT». SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats, Centre national d'études spatiales, CEPADUES Éditions, Toulouse, p. 139-151.

21

Suivi par télédétection spatiale d'une forêt dense tropicale humide soumise à des pressions agricoles

KOUAKOU ÉDOUARD N'GUESSAN

*Faculté des sciences et techniques, Université d'Abidjan, 22 B.P. 582, Abidjan 22,
Côte d'Ivoire*

Résumé

Dans cette étude, nous avons déterminé et cartographié, à l'aide de l'imagerie satellitaire, les types d'occupation agricole clandestine à l'intérieur de la réserve forestière du Haut-Sassandra dans le centre-ouest de la Côte d'Ivoire. Nous avons ainsi pu caractériser l'évolution des formations forestières naturelles en l'espace de deux années grâce à des données multibandes HRV de SPOT (K45 J336) datant du 26-12-1986 et du 23-12-1988. Ces données ont été analysées visuellement et par traitement numérique, puis complétées par plusieurs missions de vérification et validation sur le terrain. Notre démarche méthodologique a consisté dans une première phase à établir une carte de la forêt classée du Haut-Sassandra à ces deux époques par photo-interprétation des compositions colorées classiques et améliorées réalisées à partir des canaux XS3, XS2 et XS1 après étalement de la dynamique et seuillage. Cette première étape a permis de choisir des sites-tests assez représentatifs des différentes unités thématiques d'occupation de sol dans la forêt et ses environs. Ces sites-tests ont été visités sur le terrain, leur végétation a été notée et 97 enclaves agricoles ont été déterminées. Une enquête socio-économique et démographique a été également menée dans toutes les enclaves agricoles à l'intérieur de la forêt et aux environs auprès des chefs d'exploitations et des populations riveraines. Toutes ces informations recueillies sur le terrain ont permis de corriger les résultats de l'interprétation visuelle et surtout d'effectuer une classification automatique supervisée de 12 classes représentant les types de végétation et d'utilisation du sol. Ceci a permis de réaliser des cartes au 1:100 000 et 1:50 000 de la forêt classée du Haut-Sassandra et surtout de mettre

en évidence l'évolution de la dégradation de la couverture forestière et des occupations agricoles clandestines de plus en plus croissantes à l'intérieur de cette forêt.

1. Introduction

La Terre dispose d'une couverture forestière d'environ 4,5 milliards d'hectares correspondant à peu près au tiers de la surface des terres émergées. Dans cet ensemble, les forêts tropicales couvrent environ 2 milliards d'hectares dont 16% (350 millions) sont localisés en Afrique. Ces forêts tropicales sont en nette diminution. La régression des forêts tropicales et plus particulièrement celle de la forêt dense d'Afrique de l'Ouest constitue aujourd'hui une préoccupation majeure. La disparition progressive de ce massif côtier Ouest africain est devenue d'ores et déjà une réalité incontestable. La Côte d'Ivoire n'a pas échappé à ce phénomène (LANLY, 1969). Ainsi, l'on se rappelle qu'elle possédait à la fin du siècle dernier la plus belle forêt de la région avec une superficie de l'ordre de 15 millions d'hectares. Aujourd'hui, les estimations les plus optimistes donnent une superficie de 2,6 millions d'hectares d'une forêt très fractionnée par l'agriculture itinérante et appauvrie par une exploitation très sélective du bois.

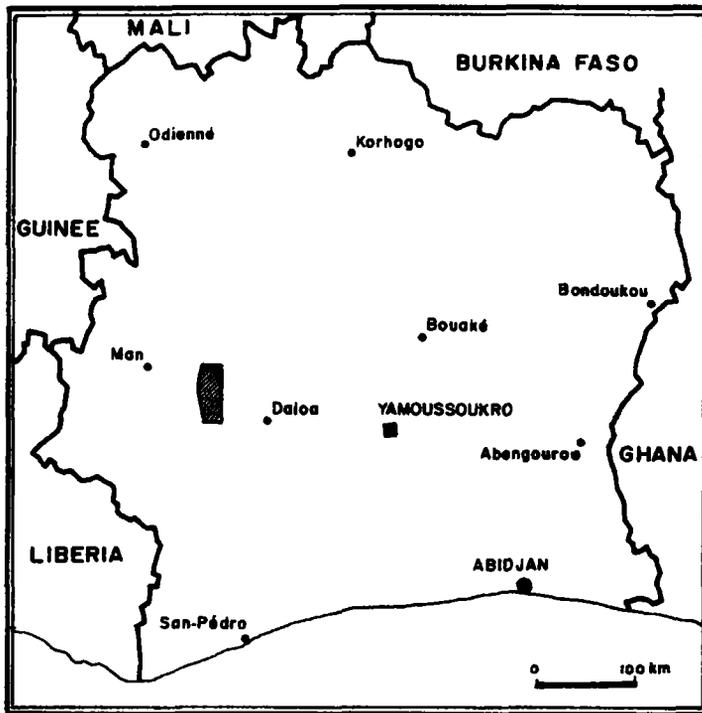
Face à cette situation, un certain nombre d'actions prioritaires ont été préconisées dans le cadre de la réhabilitation du patrimoine forestier ivoirien. Il s'agit de l'identification, de la redéfinition et du suivi par télédétection des forêts classées, de l'aménagement naturel des forêts naturelles et de l'espace rural dans les zones où les massifs forestiers sont menacés. C'est dans cette optique prioritaire d'aménagement des forêts naturelles du projet sectoriel, qui prévoit la redélimitation de 1 500 000 ha de forêts classées, qu'a été entreprise l'étude de la forêt du Haut-Sassandra.

Il s'agit, dans une première phase, à l'aide de l'imagerie satellitaire, de repérer, cartographier et analyser les limites actuelles de la forêt, les strates forestières ou types de formations végétales de même que les incursions agricoles les plus importantes. Il s'agit ensuite de préciser et d'évaluer l'ampleur exacte des incursions agricoles en forêt à partir d'enquêtes socio-économiques à l'intérieur et en périphérie de la forêt.

2. Le cadre de l'étude

La forêt classée du Haut-Sassandra est située par 7° de latitude nord et 7° de longitude ouest, dans la région centre-ouest du pays. Ce massif forestier délimité et classé en novembre 1974 couvrait à cette période une superficie de 102 400 hectares. Sa limite ouest est caractérisée par le fleuve Sassandra, à l'est par un tracé artificiel parallèle à la piste de Zoukougbeu-Daniafla, au nord et au sud par des tracés artificiels perpendiculaires au Sassandra (fig. 1).

Du point de vue morphologique, elle s'étend sur un glacis pénéplané encadré à l'ouest par le fleuve Sassandra et à l'est par la rivière Bolo. Ce massif se situe dans une région où le climat est une forme de transition entre le climat équatorial à quatre saisons et le climat tropical à deux saisons. La durée de la saison sèche est de 5-6 mois de novembre à mars ou avril. La pluviométrie annuelle varie entre 1 250 et 1 550 mm avec un déficit hydrique cumulé de 400 mm par an. Du point de vue de la végétation, ce massif forestier appartient au secteur mésophile du domaine guinéen caractérisé par la forêt dense semi-décidue à *Celtis spp* et *Triplochiton scleroxylon* (ADJANOHOUN et GUILLAUMET, 1971). Les formations



 **Forêt classée du Haut Sassandra**

Figure 1. Carte de situation de la forêt classée du Haut Sassandra

végétales sont généralement pluristratifiées avec une strate supérieure composée d'arbres de hauteur supérieure à 30 m, une strate moyenne d'arbres mesurant entre 10 et 30 m; une strate inférieure d'arbres de moins de 10 m. On rencontre parfois une formation dégradée à deux strates, la strate supérieure ayant disparu, ou une formation de recrû forestier à une seule strate.

3. Matériel et méthode

3.1. Matériel

Nous avons utilisé, pour réaliser cette étude, deux types de données. Le premier type de données est constitué par des données satellitaires.

Ce sont des images à haute résolution HRV de SPOT et TM de Landsat : HRV 45-336 du 26 décembre 1986 et du 26 décembre 1988 couvrant les deux tiers inférieurs de la forêt classée; HRV 45-335 du 23 décembre 1986 et du 23 décembre 1988 couvrant le tiers supérieur de la forêt; ainsi qu'un quart d'image TM 197/55 Q3 du 4 décembre 1986 couvrant la totalité de la forêt.

Ces données satellitaires sont sous forme de rubans magnétiques et de tirage papier de compositions colorées classiques des images HRV niveau 1B (XS3 en rouge, XS2 en vert, XS1 en bleu) et TM4, TM7, TM3 pour TM.

Le deuxième type de données est constitué de données de terrain recueillies à partir des observations sur les principaux types de formations végétales et essences forestières du 01 au 10 février 1988 et du 22 mai au 22 juin 1988 ainsi que des enquêtes socio-économiques réalisées dans les enclaves agricoles à l'intérieur et à la périphérie de la forêt.

Enfin, nous disposons également de cartes thématiques de cette forêt élaborées à la suite des survols aériens effectués en 1986 par la SODEFOR (Société de développement de la forêt) et des cartes topographiques de l'IGCI (Institut géographique de Côte d'Ivoire) de 1971.

3.2. Méthode

La démarche méthodologique utilisée dans cette étude est la même que celle de nos travaux précédents (N'GUESSAN, 1988, 1990). Elle comprend le traitement et l'analyse des images satellitaires (HRV et TM) de même que les missions de contrôle sur le terrain et les enquêtes socio-économiques de l'activité agricole en périphérie et à l'intérieur du massif forestier classé. Les différentes étapes suivantes ont été effectuées :

- interprétation visuelle des compositions colorées standard ou améliorées;
- mission de contrôle dans la forêt classée;
- traitement numérique automatique;
- enquêtes socio-économiques.

La phase d'interprétation visuelle a consisté à analyser par photo-interprétation tous les tirages photographiques des compositions colorées des images HRV du 26 décembre 1986 et du 23 décembre 1988 ainsi que de l'image TM du 4 décembre 1986 afin d'identifier et de caractériser les principales unités de végétation et d'occupation de la forêt classée du Haut-Sassandra.

Cette phase a permis d'élaborer une carte de la forêt avec les différents types de formations végétales plus ou moins conservées, les cultures, les zones dégradées, les parcs à bois et sols nus.

La phase de contrôle terrain effectuée lors des missions d'observations dans la forêt a permis de vérifier et de noter plusieurs points-tests représentant toutes les unités thématiques présentes dans le massif forestier.

Ensuite, une classification automatique supervisée par la méthode barycentrique a été effectuée.

Enfin, les enquêtes démographiques et socio-économiques ont été réalisées auprès des paysans installés dans la forêt et ceux situés à sa périphérie.

Toutes les exploitations agricoles enclavées dans la forêt classée et limitrophes de celle-ci étaient donc concernées par ces enquêtes.

Ainsi, à l'intérieur de la forêt classée, l'étude a combiné une enquête auprès des chefs d'exploitation sur un questionnaire bien adapté et le relevé topographique des parcelles cultivées. On a enquêté auprès de 97 chefs d'exploitation; les contrôles effectués ont montré que l'exhaustivité a été bien respectée. Par contre, en zones limitrophes de la zone classée, l'enquête s'est appuyée sur les seules déclarations des chefs d'exploitation; les données portant sur ces superficies dans ces cas peuvent comporter de grandes imprécisions. On a recensé 456 chefs d'exploitation. La zone enquêtée est une bande bordant la limite de la forêt, dont la largeur comprise entre 0,5 et 1,5 km, varie selon la proximité des campements par rapport à la forêt classée et selon la configuration du tracé de la limite.

4. Résultats et discussions

4.1. Interprétation des images satellitaires

L'interprétation des compositions colorées et des classifications réalisées à partir des images datant de 1986 et 1988 permet de noter les types de formations forestières et la dégradation de ceux-ci au profit des enclaves agricoles localisées dans la forêt.

La validation de l'interprétation des compositions colorées améliorées de l'image de 1986, effectuée grâce à l'observation des différents types physionomiques lors des contrôles de vérités-terrain sur les sites-tests, a permis d'élaborer un document cartographique de la forêt du Haut-Sassandra dans laquelle ont été discriminés la forêt dense à canopée fermée et à canopée ouverte, les mosaïques forêt-cultures, les défrichements agricoles et les plantations forestières industrielles de *Terminalia ivoriensis* et *Terminalia superba* et de *Pinus sp.* Déjà à cette époque (1986), les résultats montrent l'existence des infiltrations des paysans clandestins dans le sud de la forêt autour du village V12 très fortement cultivé aujourd'hui et dans le nord, aux environs de la scierie de la société d'exploitation forestière SIFCI (Société industrielle forestière de Côte d'Ivoire).

Les images HRV de 1988 ont servi à faire une classification supervisée automatique par la méthode barycentrique. Pour cela, plusieurs sites-tests représentant toutes les unités thématiques ont été choisis et vérifiés. Ces sites-tests ont été les parcelles d'entraînement assez homogènes pour appliquer la classification. L'évaluation de la classification par la matrice de confusion donne 95% de pixels bien classés sur les parcelles d'entraînement.

La carte simplifiée d'occupation des sols élaborée à partir des traitements appliqués à ces images correspond à la figure 2.

Le tableau I indique les surfaces des types d'occupations du sol dans la forêt classée d'après les images de 1988.

Cette répartition montre que, dans la forêt classée du Haut-Sassandra, la forêt physionomiquement «intacte» (la forêt à canopée fermée) ne représente que 43% de la surface, concentrée dans la moitié nord du massif; la forêt affichant des signes structuraux de surexploitation (forêt à canopée ouverte et forêt dégradée) couvre plus de 30% de la surface, surtout dans la moitié sud du massif. On doit noter aussi que la forêt sur sols hydromorphes occupe une proportion importante (21%) de la surface, surtout au nord du massif. Enfin, les incursions agricoles sont en nette progression par rapport à la situation de 1986 et sont presque exclusivement concentrées dans l'enclave sud-ouest (2 700 ha sur les 3 450 ha relevés). Les incursions agricoles de la partie moyenne de la forêt sont récentes et en pleine extension.

4.2. Les enquêtes démographiques et socio-économiques dans les enclaves agricoles de la forêt

À partir des résultats fournis sur l'occupation des sols dans la forêt classée, les enquêtes réalisées dans chaque exploitation agricole incluse ou limitrophe de la forêt avaient pour objet de recenser précisément les exploitations enclavées, de décrire la dynamique de l'occupation agricole et d'identifier des zones de repli pour l'activité agricole. Cela est d'autant plus important que la connaissance des occupations à l'intérieur de la forêt classée est en effet un préalable à toute opération d'aménagement sylvicole. Le recensement a eu un volet démographique par le dénombrement des résidents permanents et temporaires et un volet foncier par la mesure des superficies cultivées, transcrit sous forme cartographique (plan de terroir des enclaves agricoles au 1:10 000).

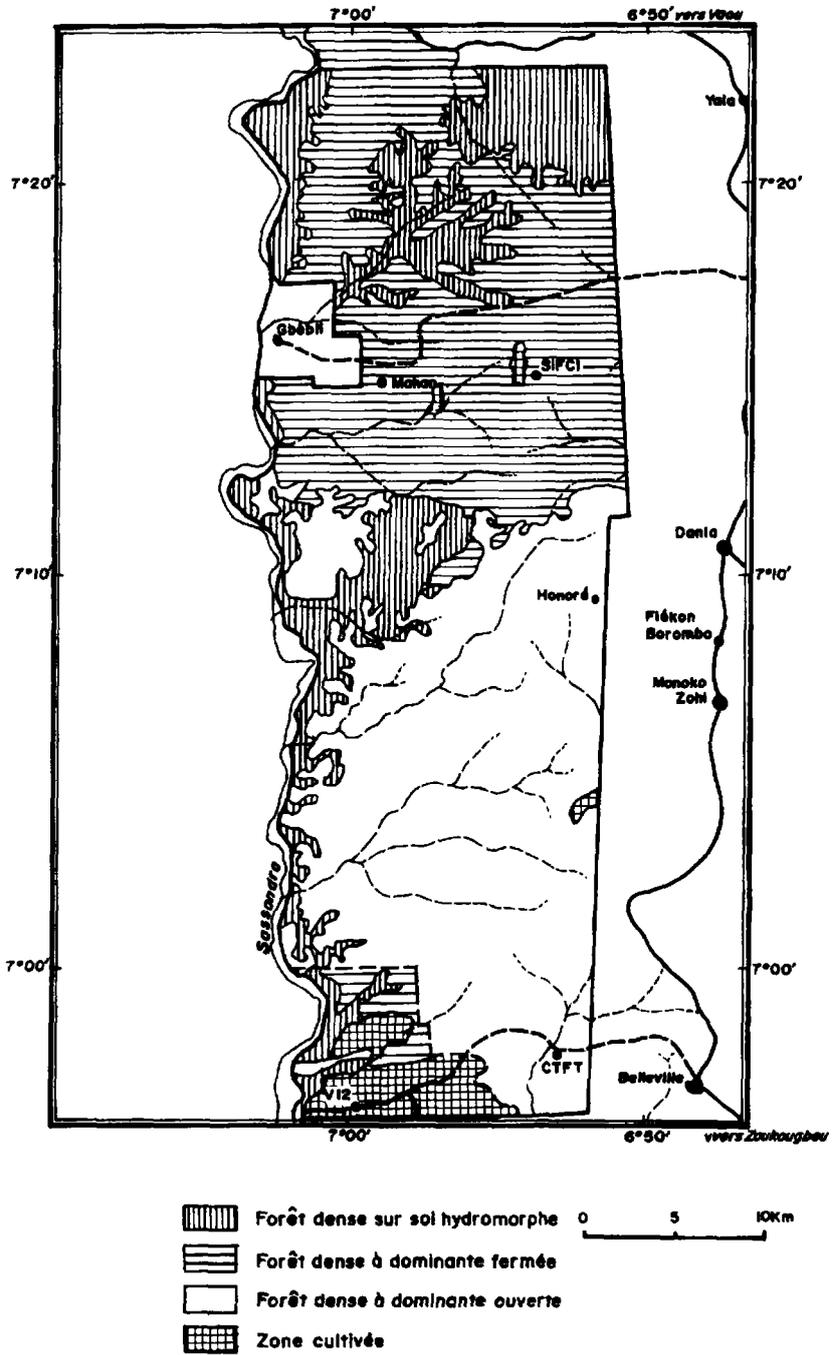


Figure 2. Carte simplifiée d'occupation des sols de la forêt du Haut-Sassandra

Tableau I. Répartition des surfaces en hectares des types d'occupation du sol dans la forêt classée d'après les images de 1988

Type de peuplement	Forêt sans enclave		Enclave du sud-ouest		Forêt avec enclave	
	ha	%	ha	%	ha	%
Forêt à canopée fermée	43 977	46	602	9	44 579	43
Forêt à canopée ouverte	28 412	30	1 558	22	29 970	29
Forêt dégradée	1 671	2	228	3	1 899	2
Forêt sur sol hydromorphe	20 528	21	1 307	18	21 835	21
Mosaïque forêt-culture	94	<1	2 542	36	2 636	3
Mosaïque culture-forêt	133	<1	671	10	804	1
Culture	14	<1	89	1	103	0
Reboisement	396	<1	18	<1	414	0
Sols nus, inselbergs	688	1	0	0	688	1
Villages, campements	45	<1	85	1	130	0
Total	95 958	93	7 100	7	103 058	100

Au niveau démographique, la pression autour de la forêt classée a été estimée à partir de la population des 456 exploitations limitrophes recensées dans les zones enquêtées.

L'étroitesse des zones enquêtées (0,5 à 1,5 km de large) et la fréquente dissociation des plantations et des lieux d'habitation rendent délicate l'évaluation d'une densité de population. Cependant, les résultats obtenus (tab. II) sont suffisamment homogènes entre eux et concordants avec les données issues des derniers recensements démographiques dans la région pour pouvoir être considérés comme satisfaisants.

Cette enquête montre que la densité de la population en périphérie immédiate de la forêt est de 31 habitants par kilomètre carré.

Au niveau des enclaves agricoles à l'intérieur des limites de la forêt classée, l'étude s'est faite en deux étapes. Dans un premier temps, l'interprétation des images satellitaires a permis de localiser :

- les portions de limites non respectées;
- les zones cultivées à l'intérieur de la forêt;
- les infrastructures et les campements, à l'intérieur et en périphérie de la forêt.

Dans un deuxième temps, une enquête socio-économique dans les sites repérés par télédétection a permis de préciser et d'évaluer les caractéristiques des incursions agricoles. À l'intérieur de la forêt, une enquête exhaustive auprès de tous les chefs d'exploitation a permis, avec un relevé topographique de toutes les parcelles cultivées, de connaître avec précision la situation des incursions à la date de l'enquête.

Les résultats obtenus sont présentés au tableau III.

L'analyse de ces données montre qu'en dehors de la grande enclave du sud-ouest de la forêt :

- les incursions agricoles à l'intérieur du territoire classé représentent une surface de 391 ha;
- ces incursions, qui ont débuté de façon significative en 1978, se sont surtout développées depuis 1984 et continuent de s'étendre à un rythme accéléré;
- les nouvelles installations se situent actuellement en pleine forêt (entre Gbeubli et Pelezi), avec le risque important de voir la forêt coupée en deux tènements séparés par une zone cultivée, alors que les incursions les plus anciennes se cantonnaient aux bordures de la forêt.

Tableau II. Résultats des enquêtes dans les villages limitrophes de la forêt

Zone (villages de rattachement)	Superficie en km ²	Nombre d'exploitations recensées	Population	Densité en h/km ²
Nord (Vaou, Diafla)	21	87	715	34
Nord-est (Yala, Pelezi, Bohinou)	18	54	531	30
Sud-est (Dania, Fiokon, Monoko, Belleville, Gnime)	26	80	836	32
Sud (V12)	34	170	926	27
Ouest (Gbeuli)	14	65	421	30
Total périphérie	113	456	3429	31

Tableau III. Résultats des enquêtes dans les enclaves agricoles à l'intérieur de la forêt;

* = exploitations dont le siège est à l'extérieur de la forêt, mais dont les terres sont à l'intérieur de la forêt

Campement	Pop. totale	Nombre d'expl.	Cacao en ha	Café en ha	Vivrier en ha	Total en ha
SIFCI	145	33	67,7	0,12	23,15	90,97
Trouvougbeu	186	34	47,6	11,60	18,16	77,36
Mahan Robert	31	5	15,6	1,32	1,45	18,37
Taya	31	5	21,0	12,00	2,50	35,50
Honoré	13	1	6,9			6,90
Amani-Kouadiokro	95	8	97,0		2,90	99,90
Djarabana		(6)*	59,0			59,00
CTFT	16	2				2,56
Total	517	88	314,8	25,04	50,72	390,16
			81%	6%	13%	100%

Dans la grande enclave du sud-ouest de la forêt, on peut distinguer deux zones différentes :

- au sud, la zone (une bande de 1500 à 2000 m de large au sud-ouest de la forêt, jusqu'à la vallée de la lobo à l'est) est presque complètement cultivée, sauf l'extrémité orientale où la forêt est bien conservée;

- au nord, une vaste zone est en cours de colonisation : sur la cartographie du couvert végétal réalisée à partir des images satellitaires de 1986, cette zone apparaît peu cultivée, sauf dans son extrémité méridionale.

À l'extérieur de la forêt classée du Haut-Sassandra, les résultats du sondage effectué tout le long des limites du territoire classé au cours de l'enquête socio-économique confirment les données obtenues par interprétation des images satellitaires : le territoire est fortement cultivé (en général plus de 75% de la surface), laissant peu de terrain disponible pour de nouvelles installations.

En conclusion, sur les incursions agricoles en forêt classée du Haut-Sassandra, on peut retenir que :

- les limites de la forêt ont été relativement bien respectées, sauf aux endroits où le bornage était défectueux (Amanikouadiokro et enclave sud-ouest),
- les incursions agricoles peuvent se répartir en trois catégories :
 - deux enclaves limitrophes relativement étendues, compactes, anciennes et stables à Amanikouadiokro et dans la zone attribuée aux émigrants de Buyo;
 - des enclaves internes, moyennes, diffuses, relativement récentes et en pleine extension;
 - une vaste zone limitrophe, compacte, récemment colonisée au sud-ouest de la forêt.

5. Conclusion

Dans cette étude, l'utilisation des données satellitaires multidates a permis de montrer la progression des incursions agricoles et la dégradation des strates forestières dans la réserve forestière du Haut-Sassandra en l'espace de deux ans. L'imagerie satellitaire permet de repérer et cartographier les limites récentes du massif et les enclaves agricoles les plus importantes de même que les principales strates forestières.

Les enquêtes de terrain ont permis de préciser et d'évaluer l'ampleur exacte des incursions agricoles en forêt et d'apprécier les capacités d'accueil des paysans en périphérie de la forêt.

Cela est important pour l'aménagement de cette forêt. En localisant les portions de limites non respectées et les zones cultivées à l'intérieur, l'analyse des images satellitaires a permis de bien mener des études d'enquêtes socio-économiques dans la forêt et sa périphérie et de mettre en évidence les pressions agricoles sur cette réserve forestière.

6. Références

- ADJANOHOON, E. et GUILLAUMET, J. L. 1971. La végétation *in* Avenard, J. M. *et al.* Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, n° 50, p. 157-262.
- LANLY, J. P. 1969. Régression de la forêt dense en Côte d'Ivoire. Bois et forêt des tropiques, Nogents-sur-Marnes, n° 127, p. 45-59.
- N'GUESSAN, E. 1988. Cartographie des forêts classées par télédétection. Carte de la forêt du Haut-Sassandra. *in* Proceedings of the 22th International Symposium on Remote Sensing of Environment, ERIM, p. 445-465.
- N'GUESSAN, E. 1990. Étude de l'évolution de la végétation du «V Baoulé» contact forêt/savane en Côte d'Ivoire. *in* Lafrance, P. et Dubois, J.-M. M. (réd.) Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Journées scientifiques de Thiès, 21-24 novembre 1989, Éditions AUPELF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 181-196.

22

Cartographie d'une forêt spécifique à partir de données satellitaires TM de Landsat et HRV de SPOT : la forêt alluviale de la Robertsau

CHRISTIANE WEBER*, JACKY HIRSCH* et AZIZ SERRADJ**

**URA 902 CNRS / Groupement scientifique de téledétection spatiale, 12, rue Goethe, 67000 Strasbourg, France; téléphone : (33) 88-35-82-31; télécopieur : (33) 88-35-84-46*

***COSTEL, Université de Haute-Bretagne (Rennes II), 6, avenue Gaston-Berger, 35043 Rennes cedex, France; téléphone : (33) 99-33-51-24; télécopieur : (33) 99-33-51-75*

Résumé

Cette étude a été faite avec le concours de l'Office national des forêts, sur un espace particulier : la forêt de la Robertsau (Strasbourg). À l'aide de plusieurs images satellitaires, nous avons tenté d'analyser les caractéristiques de ce milieu forestier. Les résultats satisfaisants concernant la discrimination des essences forestières, obtenus grâce à l'intégration de plusieurs images : TM de Landsat (juillet 1984), HRV de SPOT multibande (juin 1986) et panchromatique (septembre 1986), permettent d'envisager la poursuite de l'étude à une échelle plus grande par la constitution d'un système d'information dédié aux préoccupations forestières à la fois des administrations et des diverses instances locales qui en ont la charge.

1. Introduction

L'Alsace depuis quelques années tente de protéger au mieux une des particularités de son territoire, la forêt rhénane (COLLECTIF, 1977; LERAT, 1990). La protection de ce patrimoine forestier décidée par le Comité interministériel d'aménagement du territoire (CIAT) du 23

février 1976, a été concrétisée par un plan de protection des forêts rhénanes qui a été adopté au travers du schéma régional d'orientation et d'aménagement de l'Alsace en 1977. L'établissement de documents administratifs procède du grand intérêt écologique de ces forêts et de la concurrence entre les différentes formes d'occupation du sol (en particulier l'implantation de zones industrielles portuaires). Entre 1977 et 1990 de nombreux travaux ont été réalisés pour assurer une meilleure connaissance de la densité forestière et des caractéristiques écologiques du milieu. L'introduction des images satellitaires au niveau du suivi de la démarche fournit un apport considérable aux actions de préservation du milieu.

2. Présentation du milieu

Les caractéristiques de la forêt rhénane sont bien entendu liées aux comportements du Rhin, ou en tout cas l'étaient jusqu'à la canalisation du fleuve. Il y a plus d'un siècle le Rhin s'étalait en bras anastomosés sur plusieurs kilomètres de largeur isolant des îles d'importance diverse au couvert végétal humide. Au cours des années, cet écosystème renfermant des richesses exceptionnelles en faune et en flore provenant de régions multiples (Europe centrale, Méditerranée, Alpes, etc.) s'est appauvri.

Les actions anthropiques avec notamment les travaux de correction et de régularisation du XIX^e siècle ont entraîné un abaissement de la nappe phréatique au sud de l'Alsace (la plus importante d'Europe), un accroissement des dépôts de limons lors des inondations au nord, ainsi qu'un isolement des forêts extérieures à la digue des hautes eaux. La canalisation du fleuve en 1950, la création d'usines hydroélectriques et de barrages, la prolifération d'implantations industrielles et l'extension des agglomérations ont conduit à une disparition progressive du patrimoine forestier.

Seuls 6 800 ha subsistent sur les 15 000 ha de 1930. Ces témoins résiduels doivent être protégés d'une disparition totale, d'autant plus que l'évolution actuelle est fortement induite par les actions que l'homme continue de perpétuer (défrichements, assèchement progressif du milieu, artificialisation des forêts par introduction d'espèces plus productives, etc.).

La forêt urbaine de la Robertsau, n'est qu'une faible partie de l'ensemble de la forêt rhénane (329 ha) cependant, en plus d'un intérêt écologique et scientifique important, elle constitue un milieu récréatif et un atout primordial au cadre de vie des Strasbourgeois.

La sauvegarde des forêts alluviales depuis 1976 passe par un classement qui a pour but le maintien de l'état boisé par une réglementation interdisant tous les défrichements, fouilles, dépôts, etc. contrôlant la circulation et le stationnement ainsi que le renforcement du caractère rhénan par une gestion adaptée du milieu naturel. Ce classement par décret des forêts concerne actuellement 1800 ha afin que soient conservées les spécificités écologiques, biologiques et physiques du milieu.

3. Objectifs de l'étude

Cette analyse a pour but la caractérisation du milieu forestier ello-rhénan, connu pour la richesse écologique et l'hétérogénéité de ses essences, par l'utilisation de données satellitaires multicapteurs et multitudes.

Une évaluation des capacités des différents capteurs a été tentée en fonction de deux critères : d'une part, le choix d'un même enchaînement méthodologique; d'autre part l'étude

de la stabilité des résultats obtenus, notamment au travers de la conservation des sites de «vérités terrains». L'intégration des données panchromatiques aux données multibandes nous a permis d'améliorer la résolution spatiale, et d'obtenir une meilleure appréciation visuelle des éléments de structure. La confrontation avec les sites de reconnaissance sur le terrain et les avis des forestiers nous a permis de valider pas à pas les résultats de cette analyse.

4. Présentation du matériel

Le matériel utilisé est :

- images : TM de Landsat (juillet 1984), HRV de SPOT multibandes (juin 1986) et panchromatique (septembre 1986);
- cartes : feuille du parcellaire 1:20 000, report de localisation des séries de rajeunissement 1:5 000;
- photographies aériennes infrarouge couleur; mission «Inventaire forestier national» de juin 1986;
- relevé de terrain, mission 1987 pour la ville de Strasbourg sur le parcellaire forestier de l'Office national des forêts;
- relevé de terrain et travaux de classification d'un étudiant de l'École nationale du génie rural des eaux et forêts (Direction départementale de l'agriculture).

5. Présentation du corpus méthodologique

Ainsi qu'il a été signalé, nous avons délibérément choisi d'opérer de la même façon sur les différentes images, afin de pouvoir évaluer les apports de l'image HRV et de l'image TM.

Pour assurer la comparabilité des données radiométriques, nous avons dû bien entendu ramener les données TM à la résolution spatiale de HRV panchromatique.

Cette opération peut être effectuée selon deux méthodes : multiplication de pixels et interpolation. La multiplication de pixels a l'avantage de préserver le caractère radiométrique intact mais présente l'inconvénient d'altérer la résolution spatiale. En revanche, selon le type d'interpolation utilisé, les valeurs radiométriques peuvent être légèrement ou fortement modifiées avec une résolution spatiale nettement meilleure que celle obtenue avec le zoom.

Nous avons choisi l'interpolation bicubique. Cette fonction d'échantillonnage, qui utilise une approximation bicubique des 16 voisins les plus proches du pixel concerné (fig. 1), permet d'améliorer la précision en modélisant l'image localement par une surface polynomiale. Cette interpolation affecte très légèrement les hautes fréquences de l'image initiale.

Après cette étape de mise en homogénéité spatiale des données, une correction géométrique de l'image TM sur celle de HRV panchromatique a été effectuée.

Afin d'utiliser la complémentarité des données TM (haute résolution spectrale) et panchromatique (haute résolution spatiale), nous avons procédé à l'intégration des données en nous inspirant des travaux de CHAVEZ *et al.* (1991), CLICHE et BONN (1985) et WELCH et EHLERS (1987).

Le critère d'intégration que nous avons retenu est le coefficient de corrélation entre les canaux TM et panchromatique de HRV.

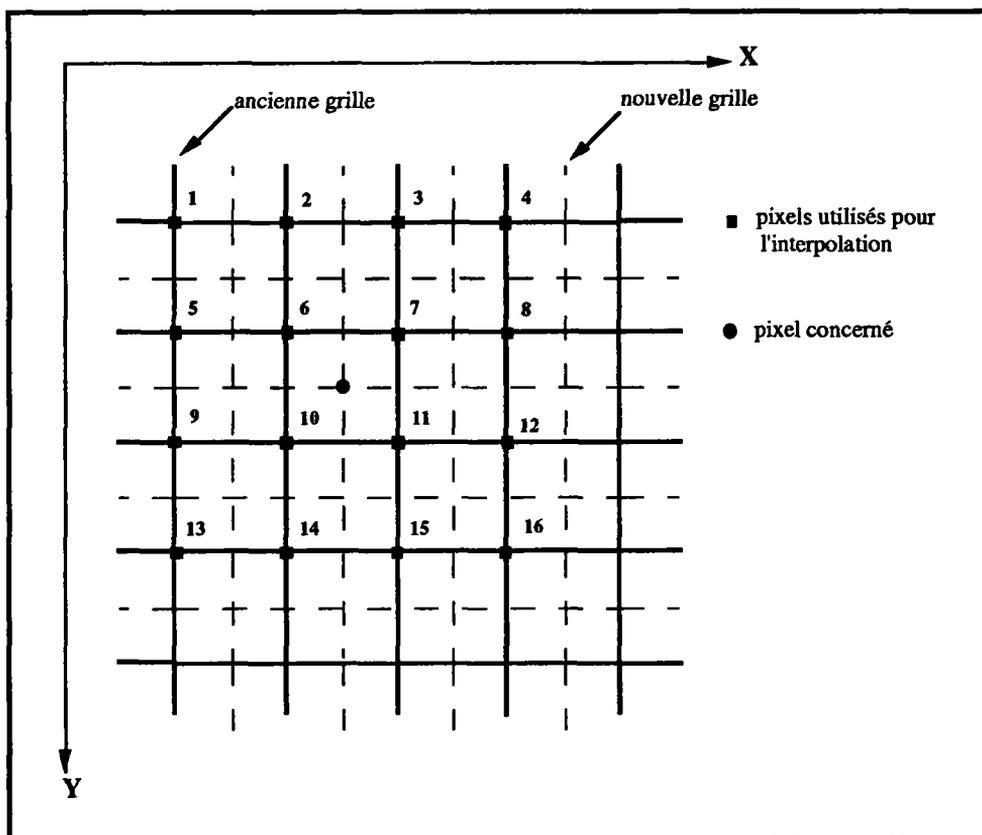


Figure 1. Surface locale d'interpolation

Ainsi, la valeur du canal panchromatique est intégrée proportionnellement à la corrélation qu'il a avec le canal TM considéré selon l'équation suivante (tab. I) :

$$PI_n(x,y) = [(TM_n(x,y) \cdot (1-Coef_n))^2 + (Pan(x,y) \cdot Coef_n)^2]^{1/2}$$

où

PI_n = pixel résultant de l'intégration de TM_n et du panchromatique;

$n = 1, 2, 3, 4, 5$ et 7 (numéros des canaux);

TM_n = valeur numérique du pixel (x,y) du canal n ;

$Coef_n$ = coefficient de corrélation du canal panchromatique avec le canal TM_n .

L'intégration du canal panchromatique de HRV n'est pas effectuée de façon systématique avec des coefficients standards (CLICHE and BONN, 1985). Elle se caractérise plutôt par un apport adapté du canal panchromatique en fonction de son coefficient de corrélation avec le canal TM concerné. Une corrélation nulle n'entraîne aucune transformation du canal TM considéré.

Tableau I. Coefficients de corrélation entre le canal panchromatique et les canaux TM originaux

Canaux	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Coefficients de corrélation	0,40	0,50	0,51	0,01	0,32	0,47

En consultant le tableau II, on remarque que les canaux TMP (avec panchromatique intégré) ont subi une translation des distributions; les moyennes et les écarts types sont plus faibles que ceux des canaux originaux (TM). Les coefficients de variation restent relativement stables, à part pour les canaux 3 et 7 pour lesquels l'effet saisonnier entre les deux dates peut jouer fortement au niveau des réponses spectrales des zones de cultures.

Tableau II. Paramètres statistiques des distributions

Variable	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation
TM1	69,16	10,33	0,149
TMP1	42,49	5,94	0,139
TM2	28,22	6,59	0,233
TMP2	19,20	4,08	0,212
TM3	25,02	9,66	0,385
TMP3	18,18	5,08	0,279
TM4	76,58	25,65	0,334
TMP4	74,58	25,18	0,337
TM5	55,77	20,19	0,362
TMP5	38,73	12,92	0,333
TM7	19,43	10,30	0,530
TMP7	16,28	5,18	0,318

Comme nous travaillons avec des valeurs numériques et non avec des valeurs de luminance, cette translation des distributions ne perturbera pas les analyses de classification qui seront effectuées plus tard.

La réalisation de compositions colorées en cyan, magenta et jaune sur les canaux originaux (combinaisons 4, 2, 1 et 5, 2, 1) et sur les canaux avec panchromatique intégré homologues (fig. 22-2, voir cahier couleur) fait ressortir une très nette discrimination du couvert végétal forestier. On peut remarquer que les compositions colorées réalisées avec les canaux TMP accentuent cette discrimination sans doute à cause de la complémentarité des capteurs d'une part et de la diachronie d'autre part.

Cette discrimination du couvert est confirmée par les schémas discriminants obtenus, après l'analyse statistique des échantillons soumis à la classification. En effet, comme le montrent les schémas discriminants et les positions des points moyens des groupes (fig. 3 et 4), on remarque que les points moyens des groupes sont plus éloignés les uns des autres sur le schéma discriminant des données avec panchromatique intégré que sur celui des canaux originaux.

La classification de type supervisée par analyse discriminante pas à pas, nous a permis une discrimination des essences forestières. Le taux de classement fourni par la matrice de confusion est pour ces classes supérieur à 80%.

Les 35 échantillons retenus pour la classification ont été choisis par rapport à un descriptif parcellaire et une étude menée par un étudiant de l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts (ENGREF). Les mêmes échantillons ont été utilisés pour les deux images afin d'observer la stabilité des vérités-terrain et la transférabilité des résultats. Plusieurs problèmes ont nécessité un approfondissement du fait de la différence de dates entre TM et HRV (1984

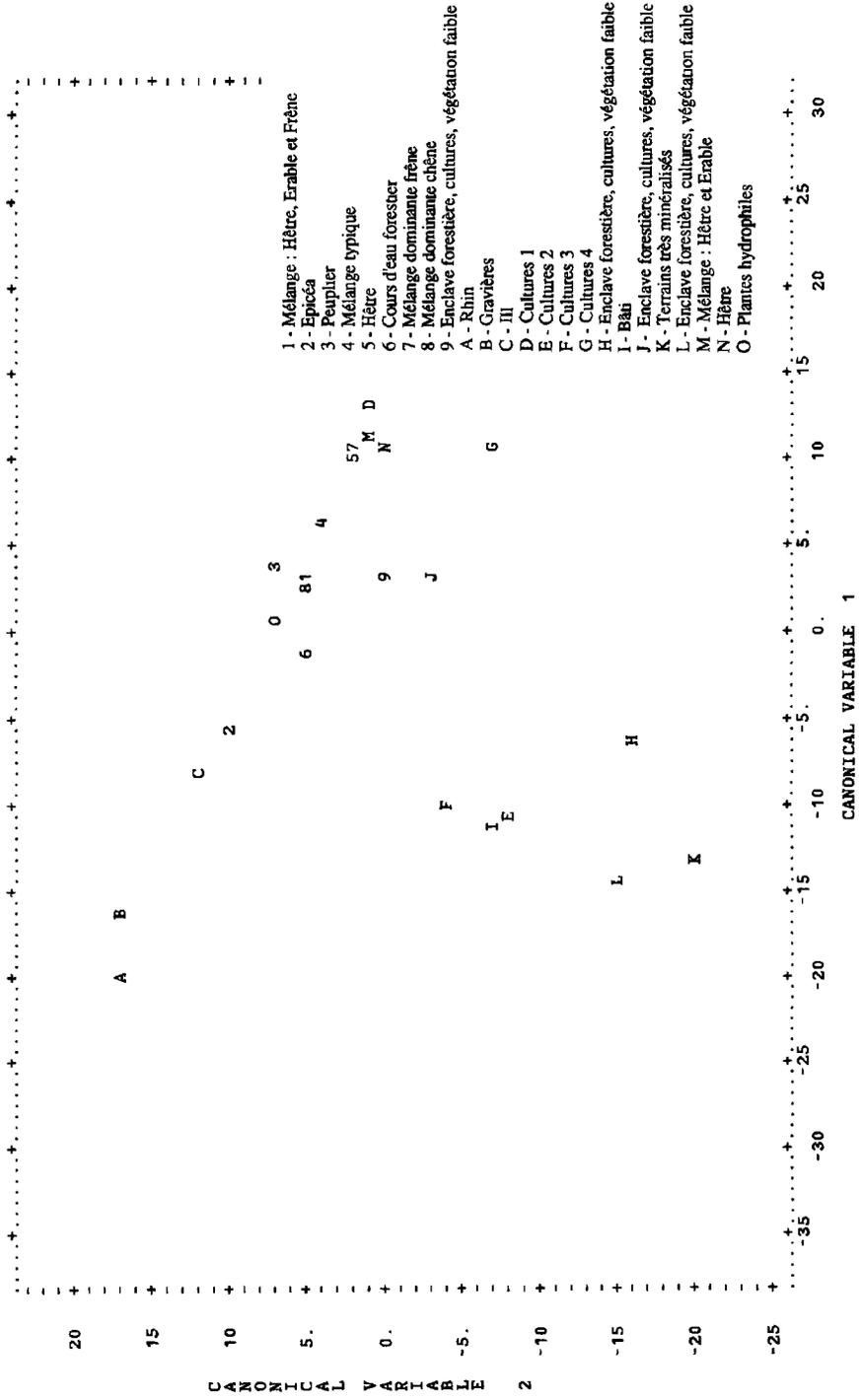


Figure 3. Schéma discriminant et position des points moyens des groupes : données TM originales

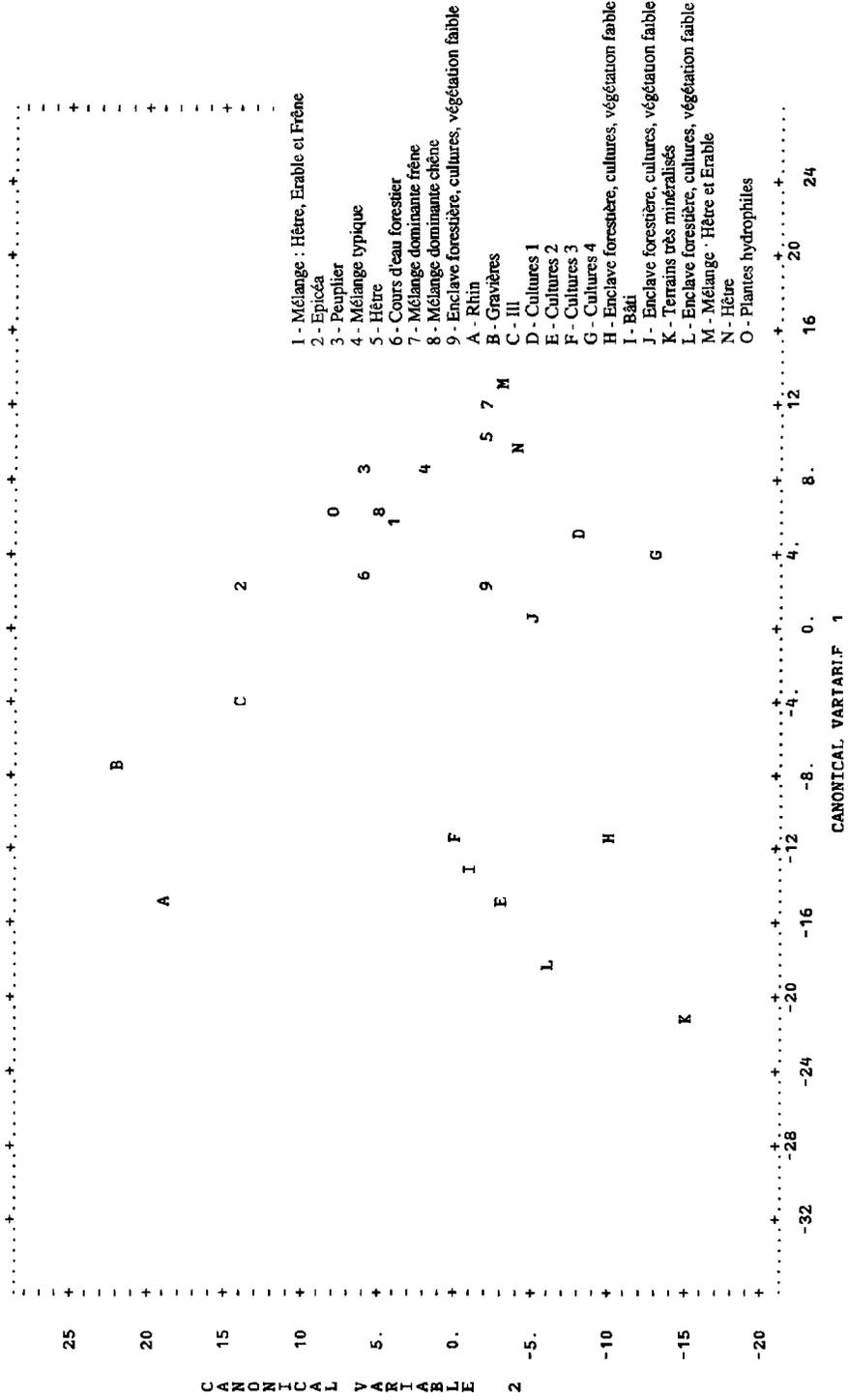


Figure 4. Schéma discriminant et position des points moyens des groupes : données TM avec HRV panchromatique intégré

et 1986) et de l'écart des états végétatifs (juin et juillet) entre les deux images. De plus, début 1986, des travaux ont démarré au nord-est de cette forêt, travaux d'irrigation par récupération d'anciens lits de divagation du Rhin et par creusement d'un nouveau lit. Cette opération avait pour but la «réhumidification» des zones dites inondables entre le Rhin et la digue des hautes eaux, afin de lutter contre l'assèchement des terres et donc le dépérissement des essences spécifiques. Ceci a bien évidemment perturbé la comparaison dans cette partie de l'espace traité.

6. Résultats

Étant donné la complexité du couvert forestier de la Robertsau il nous a semblé intéressant d'utiliser deux types de capteurs aux capacités différentes. Les résultats de la classification nous ont permis de caractériser 10 groupes d'essences ou de mélanges forestiers et 6 divers, que nous avons validés par la suite sur le terrain, avec l'aide des forestiers (tab. III).

Tableau III. Groupes thématiques retenus; le mélange typique de la forêt ello-rhénane (n° 7) se compose d'essences diverses, avec présence d'au moins trois strates arborées et arbustives, avec des lianes, de la clématite ou du tamier.

N°	Essences	Surface en ha
1	Épicéa	14,24
2	Hêtre	15,74
3	Mélange à dominante hêtre	21,13
4	Mélange à dominante hêtre et érable	14,60
5	Mélange hêtre, érable et frêne	31,73
6	Mélange à dominante frêne	47,08
7	Mélange typique	172,90
8	Mélange à dominante de chêne	62,31
9	Peuplier	16,94
10	Plantes hydrophiles	9,75
11	Cours forestiers	29,86
12	Eau : Rhin, gravières et Ill	3,86
13	Cultures diverses	10,52
14	Enclaves forestières et cultures	27,17
15	Fortes emprises minérales	2,31
16	Emprises bâties	3,45

6.1. L'introduction du canal panchromatique de HRV

Dans un premier temps cette intégration a permis une bonne séparation du milieu forestier par rapport au reste de l'espace analysé. La précision géométrique du canal nous a été d'une grande utilité pour discerner les aménagements forestiers, chemins ou chenaux.

Malgré le décalage temporel, ce canal a permis de mettre en évidence graphiquement des structures spatiales plus homogènes, notamment par l'élimination d'un grand nombre de pixels isolés. Un autre apport de ce canal réside dans la diminution des pixels de mélange liés aux phénomènes de bordure (brusques changements de radiométrie).

6.2. Bandes spectrales de HRV ou TM, voire les deux?

Dans les deux cas, les indices de végétation (simple et normalisé) expliquent relativement bien les structures spatiales que l'on retrouve dans les résultats des classifications.

Les capacités spectrales de TM permettent l'individualisation d'un plus grand nombre d'essences que ne le font les canaux HRV. Ceci est confirmé par la plus grande variabilité de l'indice de végétation sur l'image TM.

Une première différenciation entre les types de boisements est discernable de manière fine : en effet les boisements de type futaie naturelle, par leur effet granuleux, se démarquent très nettement sur les compositions colorées des parcelles plantées (perchis essentiellement) qui elles apparaissent lisses. Cette distinction caractérise bien une différence de structure du boisement et se retrouve sur les deux types de capteurs, avec même une plus grande netteté sur HRV. En revanche TM permet une différenciation d'un plus grand nombre d'essences ou de mélanges d'essences caractéristiques au sein de l'ensemble des futaies naturelles; c'est le cas des hêtres par exemple, qui de par la taille du houppier ne permet pas ou peu de strates de sous-bois.

6.3. La complémentarité des deux images

Pour bénéficier de cette complémentarité, nous avons utilisé tous les canaux (six canaux de TM et trois de HRV) avec le panchromatique intégré dans une analyse de classification supervisée. Hormis les problèmes liés à la diachronie dans la partie NE de la zone analysée, cette opération n'a pas entraîné de perturbation, la séparabilité du couvert forestier a été augmentée. La sensibilité plus grande aux phénomènes structuraux et géométriques de HRV a facilité la mise en évidence des cours d'eau forestiers malgré leur taux de recouvrement.

La validation des résultats par nos partenaires forestiers, a été faite par vérification sur le terrain des classes obtenues. Les résultats ont été considérés comme satisfaisants à 80%. Étant donné la spécificité du milieu et sa très forte variabilité spatiale, il était difficile de créer un échantillonnage de confrontation (témoins de référence).

Afin que ces premiers résultats puissent être utilisés dans une pratique quotidienne, des évaluations de surfaces par essences forestières et parcelles de gestion ont été produites, après intégration de la base cartographique des parcelles forestières (tab. III).

7. Conclusion

Dans une forêt aussi riche en essences végétales où les parcelles homogènes sont de petite taille, il nous a semblé intéressant d'utiliser la plus fine résolution spectrale possible. En égard du choix des vérités-terrain disponibles (peu de surfaces «pures») et des groupes à discriminer les résultats peuvent être considérés comme satisfaisants. Les spécificités de cette forêt ello-rhénane ont pu être individualisées suffisamment pour que des opérations de calcul de surface et de cartographie puissent être envisagées de manière efficace pour les spécialistes du terrain.

Des collaborations plus formelles devraient pouvoir être concrétisées par la mise en place d'un système d'information géographique. Cette approche devrait être étendue à d'autres zones forestières de la forêt rhénane.

8. Références

- CHAVEZ, P. S. Jr., SIDES, S. C. and ANDERSON, J. A. 1991. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data : Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, n° 3, p. 295-303.
- CLICHE, C. and BONN, F. 1985. Integration of SPOT Panchromatic Channel into Its Multispectral Mode for Image Sharpness Enhancement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, n° 3, p. 313-316.
- COLLECTIF 1977. Rapport des actes administratifs de la Région Alsace, Présentation du Plan de protection de la forêt rhénane. Région Alsace, 2^e trimestre, n° 10
- LERAT, F. 1990. La politique de protection des espaces naturels en France. *in* Protection et gestion des milieux naturels et forestiers, Colloque européen, Strasbourg, Éditeur SNICEF, Nîmes, p. 20-26.
- WELCH, R. and EHLERS, M. 1987. Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 53, n° 3, p. 301-303.

PARTIE V

Méthodologie d'extraction des données cartographiques

23

Traitement contextuel en post-classification pour l'élaboration d'une spatio-carte destinée à la gestion et à l'aménagement du territoire

MARC BINARD et BÉNÉDICTE COLLETTE

Service universitaire de recherches fondamentales et appliquées en cartographie et en études spatiales (SURFACES), Département de géographie, Université de Liège, 7, place du 20-Août, 4000 Liège, Belgique; téléphone : (32) (41) 665313; télécopie : (32) (41) 665693

Résumé

La technique classique, permettant de supprimer à la fois le pointillisme caractéristique des classifications ainsi que la présence de mixels au contact de deux affectations, consiste à faire passer un filtre majoritaire. Cette homogénéisation présente cependant l'inconvénient de supprimer certains pixels des classes faiblement représentées telles que celles du réseau routier et de l'habitat dispersé par exemple. Le recours aux méthodes de morphologie mathématique offre l'avantage d'obtenir cette généralisation en contrôlant le contexte dans lequel un pixel, d'une affectation donnée, est remplacé par un pixel appartenant à une autre affectation. Cette opération est réalisée grâce à la création d'un masque sur les affectations à filtrer. Différentes possibilités d'étendre ce masque sont présentées. La substitution ne s'opère que lorsqu'un pixel de la classe à filtrer est localisé sur le masque étendu. L'ordre des substitutions ainsi que le nombre de dilatations et d'érosions doivent être examinés sur une zone échantillon de l'image avant d'appliquer cette méthode automatiquement. Ces procédures conduisent à une généralisation cartographique aboutissant au zonage habituellement utilisé par les aménageurs. Ce traitement facilite la vectorisation qui est nécessaire pour introduire la classification dans un SIG vectoriel. Des applications présentent certaines des étapes du traitement en post-classification de la spatio-carte du Grand-Duché de Luxembourg.

1. Introduction

Suite à la grande variation des réflectances enregistrées par les capteurs haute résolution des satellites, les classifications obtenues sans tenir compte de la texture présentent un mitage de certaines grandes affectations ainsi que la persistance de mixels non ou mal classés au contact de deux affectations.

Le mitage se présente sous forme d'impuretés constituées d'un ou de plusieurs pixels au sein d'une plage massive. Il est révélateur de conditions édaphiques particulières (humidité du sol, affleurement lithologique, etc.) ou de phénomènes catastrophiques (chablis dans les bois, verse dans les cultures, maladies des végétaux, etc.).

Par contre, les mixels correspondent au sol à une portion de territoire présentant plusieurs affectations. Ils enregistrent une réponse spectrale moyenne qui n'est caractéristique d'aucune des affectations présentes.

Une généralisation cartographique est nécessaire tant pour l'utilisation par l'aménageur que pour la vectorisation conduisant à une exportation de la classification dans un SIG basé vecteur. La technique classique permettant de supprimer ces inclusions et ces mixels, consiste à faire passer un filtre majoritaire. Cette homogénéisation présente cependant l'inconvénient d'affaiblir les classes faiblement représentées telles que celles du réseau routier et de l'habitat dispersé par exemple. L'objet de cette communication est de proposer une méthode précisant le contexte exact dans lequel la classe d'un pixel est susceptible d'être substituée à une autre (DURANT et FLOUZAT, 1984).

2. Étude contextuelle

2.1. Classe à filtrer

Une binarisation de la classification est créée en attribuant la valeur 1 à la classe aux dépens de laquelle une substitution doit être effectuée tandis que toutes les autres classes se voient affecter la valeur 0. Ce masque est facilement obtenu en utilisant une table de couleurs adéquate. En effet, pour chaque pixel, cette dernière utilisée comme une table de transcodage, permet de lire dans le fichier d'entrée la valeur de la classification et d'écrire la valeur 0 ou 1 dans le fichier de sortie.

2.2. Classe de fond

La classe de fond est formée par des pixels appartenant à la ou aux classes au sein ou aux frontières desquelles une substitution est désirée. Un masque est constitué d'une image binaire qui regroupe toutes les classes de fond sous la valeur 1 alors que les autres classes ont la valeur 0.

2.3. Extension du masque de la classe de fond

2.3.1. Morphologie mathématique

L'érosion et la dilatation, qui sont les deux fonctions élémentaires de la morphologie mathématique (COSTER et CHERMANT, 1989), sont disponibles dans la version actuelle

de la plupart des logiciels de traitements d'images à condition d'utiliser uniquement une fenêtre carrée comme élément structurant. En effet, l'érosion consiste dans ce cas précis à créer une nouvelle image dont la valeur de chaque pixel, correspond dans l'image initiale, au minimum de la fenêtre d'étude centrée sur lui. De même, la dilatation en chaque point correspond au maximum de la fenêtre d'étude dans l'image initiale (MARION, 1987).

Les érosions et les dilatations peuvent être calculées sur des images en niveaux de gris ou sur des images binaires (masques) comme dans la présente étude (COLLETTE, 1990). Les possibilités d'utilisation de ces deux opérateurs sont nombreuses puisqu'à la fois, le nombre d'érosions et de dilatations, l'ordre dans lequel ils sont utilisés (ouverture ou fermeture) ainsi que la taille de la fenêtre de chaque opérateur (élément structurant) peuvent varier.

Dans ce qui suit, nous n'étudierons que la succession d'une dilatation par une érosion (fermeture) pour différentes tailles de fenêtres carrées. L'utilisation des deux opérateurs dans cet ordre rend le masque plus massif et permet de trouver les pixels contextuellement proches de la classe de fond.

Nous allons étudier successivement les modifications de ce masque en premier lieu le long de son périmètre extérieur et en second lieu dans les inclusions qu'il contient.

2.3.2. Modification de la frontière extérieure du masque

Dans un premier temps observons le déplacement de la limite dans la partie nord-ouest du masque (fig. 1a) en appliquant une fermeture dont la taille de la fenêtre est la même pour la dilatation que pour l'érosion. Cette procédure présente l'avantage de ne pas déplacer la frontière aux extrémités du masque tout en comblant les rentrants. Pour l'exemple de la figure 1, une fenêtre de (3 x 3), de (5 x 5), de (7 x 7) comble respectivement les rentrants sur 6, 13 et 18 pixels (fig. 1b, 1c, 1d).

Si on souhaite définir une frange régulière le long du masque pour délimiter par exemple la zone où sont localisés les mixels, on peut procéder de deux manières : soit appliquer uniquement une dilatation au masque, soit utiliser une fermeture dont la taille de la fenêtre est plus grande pour la dilatation que pour l'érosion.

La simple dilatation par une fenêtre (3 x 3) ou (5 x 5) permet de définir une franche respectivement d'au moins 1 pixel ou au moins 2 pixels (fig. 2b et 3b) avec un premier lissage non négligeable de la limite. Un lissage plus important peut être obtenu par la succession d'une dilatation (5 x 5) par une érosion (3 x 3) (fig. 2c) et par une dilatation (7 x 7) suivie d'une érosion (3 x 3) (fig. 3c). En augmentant la taille de la fenêtre, on comble de plus en plus les rentrants (fig. 2d et 3d).

2.3.3. Étude des inclusions au sein du masque

L'étude des modifications de la limite du masque vers le centre des inclusions permet de constater qu'appliquer une fermeture (dilatation + érosion) lorsque le masque a la valeur 1, revient à appliquer une ouverture (érosion + dilatation) lorsque 1 est attribué à l'inclusion.

Une fermeture dont la taille de la fenêtre est la même pour la dilatation que pour l'érosion permet dans le cas de la figure 4, de diminuer le nombre de pixels de l'inclusion de 3, de 20 et de 42 pixels pour les fenêtres respectives (3 x 3), (5 x 5) et (7 x 7) (fig. 4 b, c et d).

Si on souhaite diminuer la taille d'une inclusion d'une manière régulière à sa périphérie, on peut appliquer une simple dilatation (fig. 4f et 4j) ou une fermeture dont la taille de la fenêtre de la dilatation est plus grande que celle de l'érosion. Cette dernière procédure conduit à rendre les inclusions plus massives (fig. 4g, h et j) où même à supprimer l'inclusion (fig. 4i).

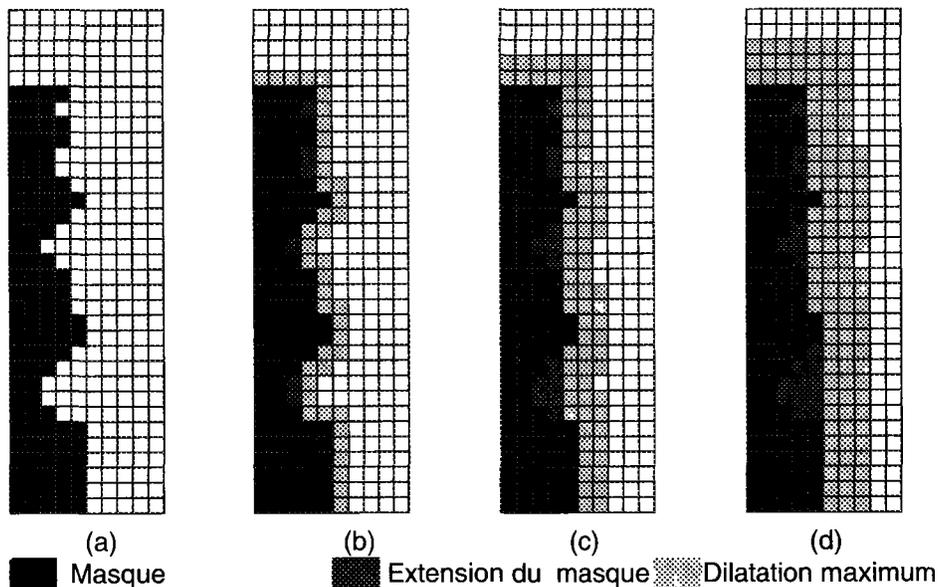


Figure 1. Comblement des rentrants d'un masque par une dilatation (D) suivie d'une érosion (E); a) situation initiale; b) $D(3 \times 3) + E(3 \times 3)$; c) $D(5 \times 5) + E(5 \times 5)$; d) $D(7 \times 7) + E(7 \times 7)$

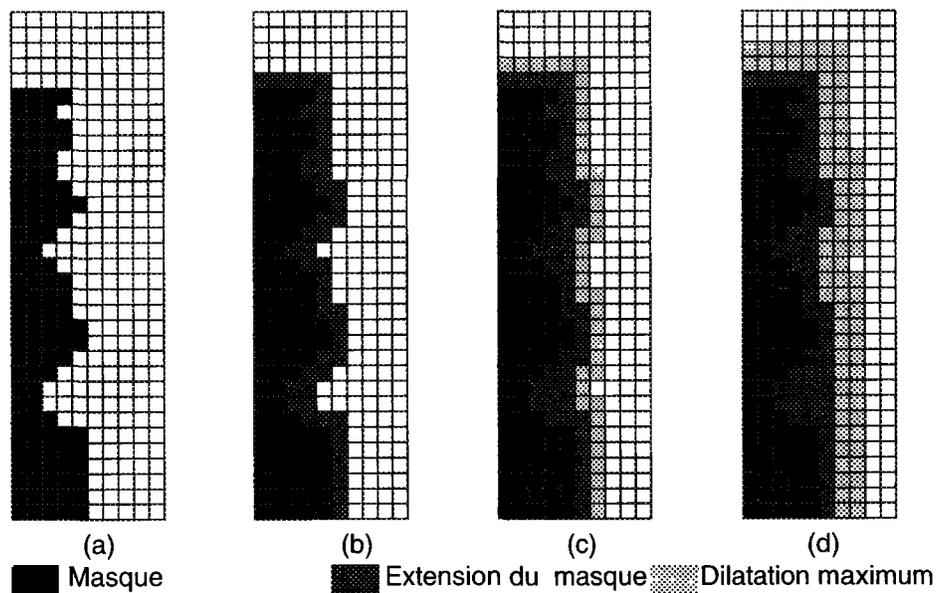


Figure 2. Extension d'un masque sur une frange d'au moins un pixel par une dilatation (D) suivie éventuellement d'une érosion (E); a) situation initiale; b) $D(3 \times 3)$; c) $D(5 \times 5) + E(3 \times 3)$; d) $D(7 \times 7) + E(5 \times 5)$

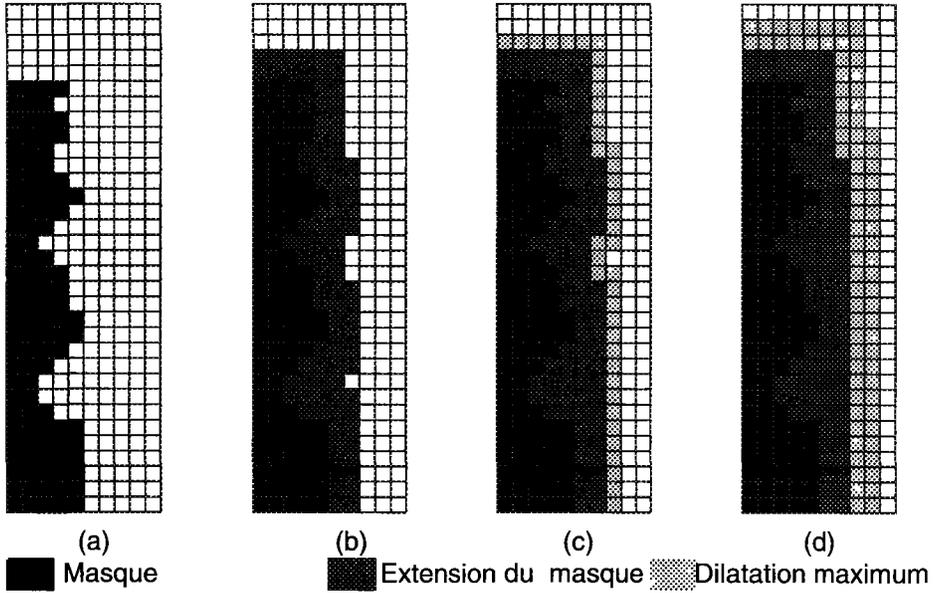


Figure 3. Extension d'un masque sur une frange d'au moins deux pixels par une dilatation (D) suivie éventuellement d'une érosion (E); a) situation initiale; b) D(5x5); c) D(7x7) + E(3x3); d) D(9x9) + E(5x5)

2.4. Substitutions

La multiplication du masque de la classe à filtrer (cf. 2.1) par celui de la classe de fond étendu (cf. 2.3) donne un nouveau masque groupant uniquement les pixels de la classe à filtrer localisés sur la partie contextuellement élargie et connue de la classe de fond. La dernière étape, avant de superposer ce masque à la classification initiale, consiste à le multiplier par le numéro de la classe en faveur de laquelle on souhaite faire la substitution. Généralement, c'est le numéro de la classe de fond mais cela pourrait être différent si on désire, par exemple, remplacer tous les pixels de culture localisés à proximité de l'habitat par des pixels d'herbages.

3. Applications

Deux exemples d'applications de filtre contextuel vont illustrer ce qui précède. Le premier concerne le filtrage d'éléments faiblement représentés au sein d'une classe massive tandis que le deuxième concerne le filtrage d'une classe également faiblement représentée mais à la frontière de deux affectations. Dans un dernier temps, la liste des différentes étapes ayant conduit au filtrage de la carte pilote du Grand-Duché de Luxembourg sera présentée.

3.1. Suppression de la classe «inculte» au sein des feuillus

Les images satellitaires de la forêt grand-ducale montrent un aspect hétérogène pour les feuillus, visible également sur photos aériennes. Cette hétérogénéité résulte de variation des

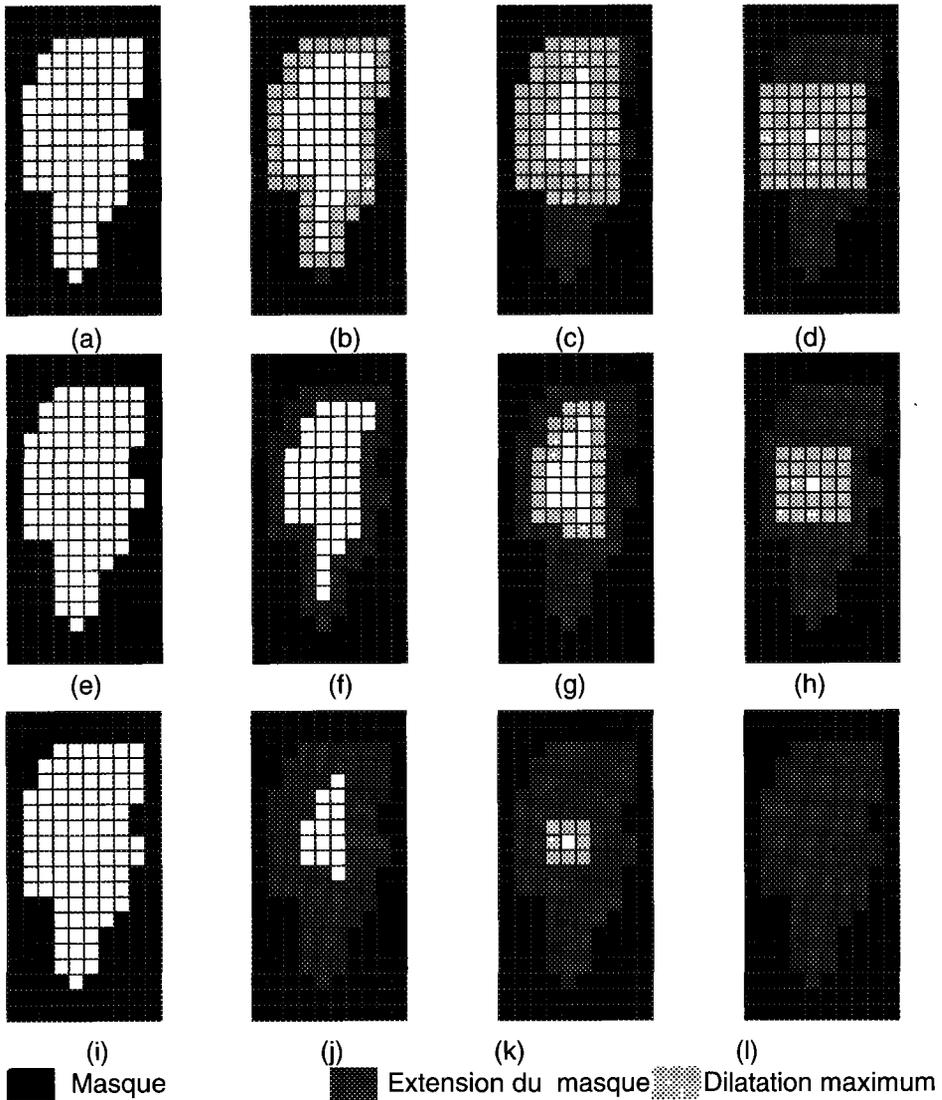


Figure 4. Extension d'un masque vers une inclusion par une dilatation (D) suivie éventuellement d'une érosion (E); a) situation initiale; b) $D(3 \times 3) + E(3 \times 3)$; c) $D(5 \times 5) + E(5 \times 5)$; d) $D(7 \times 7) + E(7 \times 7)$; e) situation initiale; f) $D(3 \times 3)$; g) $D(5 \times 5) + E(3 \times 3)$; h) $D(7 \times 7) + E(5 \times 5)$; i) situation initiale; j) $D(5 \times 5)$; k) $D(7 \times 7) + E(3 \times 3)$; l) $D(9 \times 9) + E(5 \times 5)$

conditions édaphiques, de la présence de clairières, de coupes à blanc plus ou moins récentes ainsi que de chablis. Ces différentes réalités ont été regroupées lors de la classification en une classe nommée «inculte». Un zonage, proche de celui habituellement utilisé par les aménagés, est obtenu en remplaçant les incultes localisés au sein des feuillus par les feuillus eux-mêmes. Pour déterminer ce contexte, le masque des feuillus est étendu par une fermeture (dilatation $(3 \times 3) + \text{érosion } (3 \times 3)$). La figure 5 visualise les pixels situés sur ce masque, à savoir : en

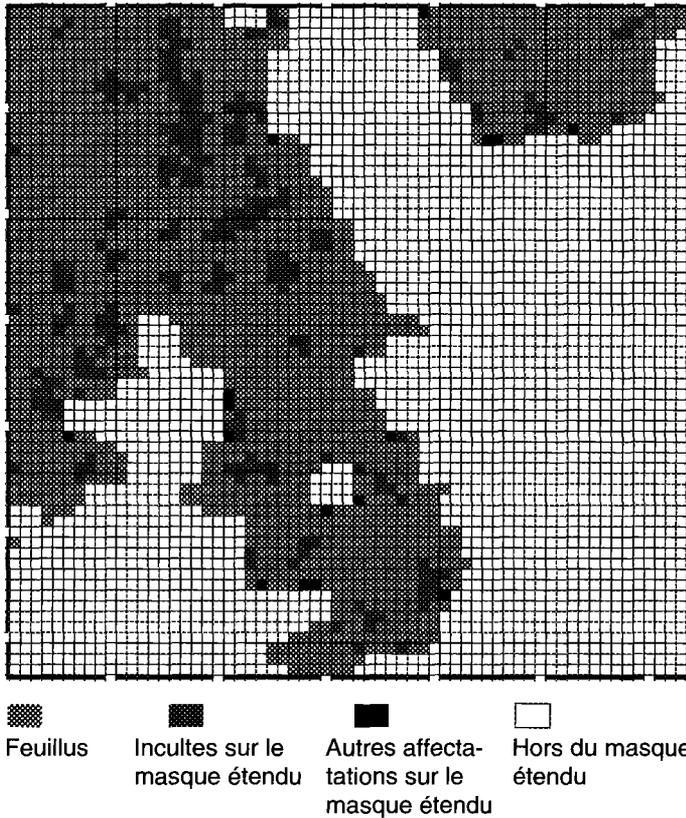


Figure 5. Affectations localisées sur le masque des feuillus étendu par une fermeture (3x3)

gris clair la classe des feuillus eux-mêmes, en gris foncé les incultes et en noir les autres affectations. Ces dernières vont être préservées (fig. 6) lors de la substitution des incultes, situés sur le masque, par des feuillus (en $(x,y)=(6, 41); (21, 37); (21, 38)$, etc.). De plus, la frontière ne subit aucun déplacement si ce n'est dans quelques rentrants (en $(5, 38); (5, 39); (21, 40); (23, 52); (23, 53)$ etc.).

Un filtre modal (3 x 3) déplacerait la frontière des feuillus et créerait des entités massives de pixels appartenant à la classe inculte. Ce serait notamment le cas pour la bande nord-sud d'incultes située entre les points de coordonnées (16, 2) et (17, 17) (fig. 5).

3.2. Suppression des mixels aux limites d'une classe sous-représentée

Les mixels, qui ne sont caractéristiques d'aucune des deux classes qu'ils couvrent au sol, sont souvent regroupés dans une classe nommée «pixels non classés». Si une des deux classes est sous-représentée, ici les cultures par rapport aux herbages, on peut faire le choix de remplacer les pixels non classés situés à proximité de la frontière des cultures par la classe des cultures (fig. 7). Comme dans l'exemple précédent, les autres classes ne sont pas affectées par ces substitutions (fig. 8) (par exemple les pixels $(6, 26); (7, 26); (7, 27)$). Il est à noter que les pixels non classés au sein des cultures sont eux aussi remplacés par des cultures.

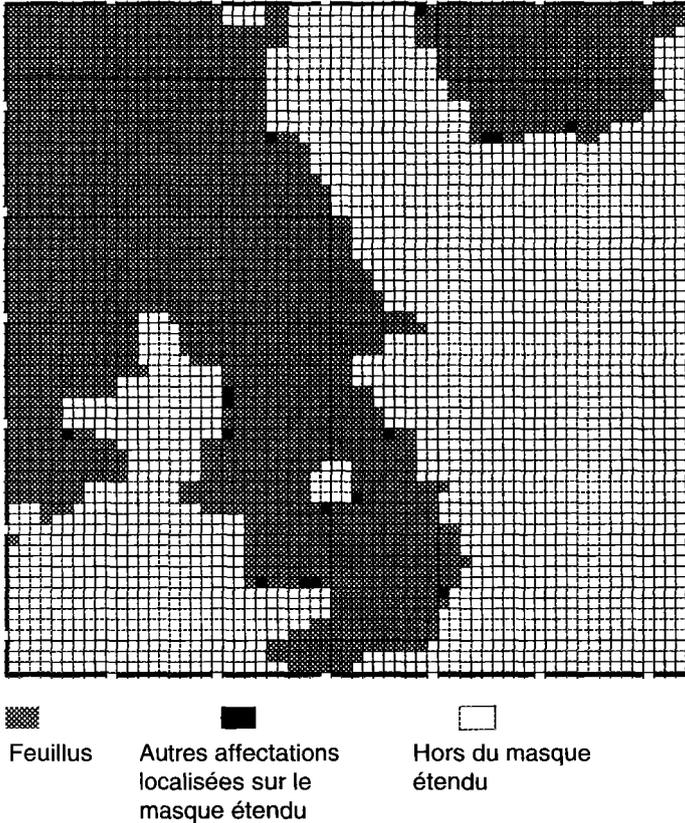


Figure 6. Absorption des incultes localisés sur le masque étendu des feuillus

3.3. Étapes conduisant au filtrage de la spatio-carte du Grand-Duché de Luxembourg

Le tableau I résume les différentes opérations appliquées à l'image. L'ordre dans lequel, on applique les différents filtrages a de l'importance. Par exemple, le premier filtrage modifie la classe de fond (ici, les feuillus) utilisée par le deuxième filtrage.

La première étape permet de remplacer, au sein des herbages, les pixels erronément classés en feuillus. En effet, sur le terrain, on observe peu de petites parcelles de feuillus parmi les herbages. La spatio-carte étant destinée à des aménageurs ne souhaitant pas discerner de petites zones d'herbages au sein des forêts, ces dernières ont été substituées (tab. I, ligne 2) par la classe feuillus qui était sous représentée par rapport à la vérité-terrain. De même, l'habitat dispersé localisé au sein ou le long des forêts (situation rare au Grand-Duché de Luxembourg) est remplacé par des cultures (tab. I, ligne 3). Ces cultures, ainsi que celles plus massives situées dans les forêts, sont remplacées par des incultes (tab I, ligne 4) car il n'existe presque pas de culture au sein des forêts. La dernière étape permet de substituer les pixels de cultures, dans et à proximité des villages par des pixels d'herbages. En effet, une auréole d'herbage est généralement observée autour des villages.

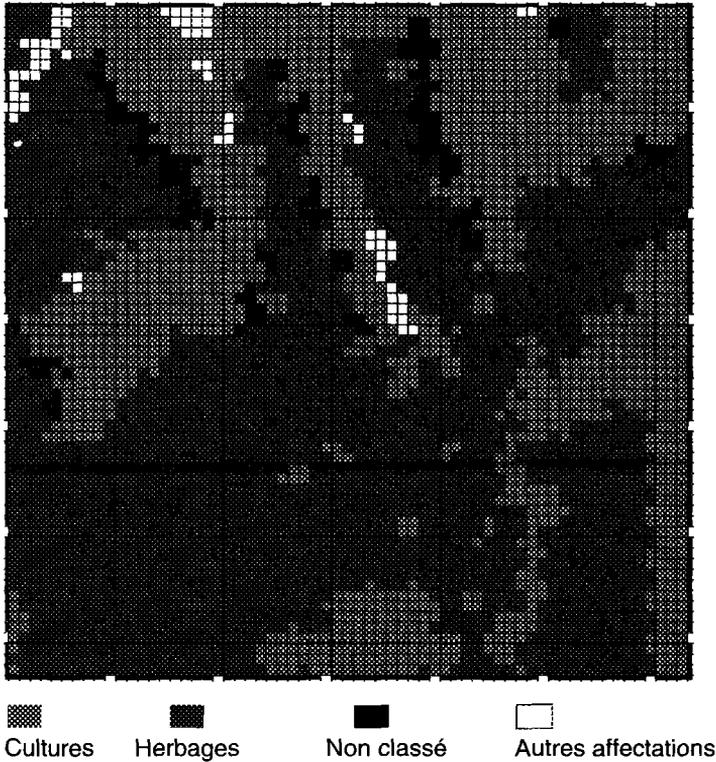


Figure 7. Situation avant filtrage des mixels (pixels non classés)

4. Conclusions

Le filtre contextuel permet de contrôler les substitutions beaucoup mieux que le filtre modal quant à leurs localisations et à leurs natures. Les inclusions sont filtrées de manière draconienne alors que les seuls légers déplacements de la frontière extérieure s'observent dans les rentrants de la classe de fond.

De plus, la morphologie mathématique permet également de déterminer la largeur d'une frange le long de la frontière d'une classe de fond, pour laquelle une substitution est demandée. La nature de la substitution est contrôlée à chaque étape.

Il ne faut pas perdre de vue que l'utilisation du filtre contextuel demande beaucoup plus de temps machine que le filtre modal et qu'il nécessite une bonne connaissance des réalités de terrain régissant les relations entre les différentes classes.

5. Remerciements

L'étude a été effectuée dans le cadre du «Programme de recherche scientifique dans le domaine de la télédétection spatiale» (TELSAT/II/6), pour le compte de l'État belge.

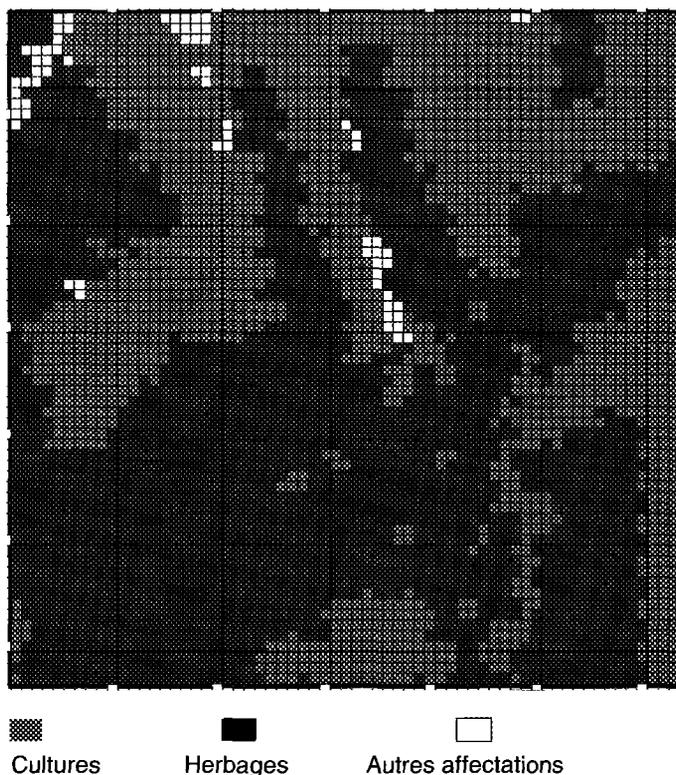


Figure 8. Filtrage des non classés sur le masque des herbages étendu par une dilatation (7x7)

Tableau I. Liste des opérations conduisant au filtrage contextuel de la carte pilote du Grand-Duché de Luxembourg.

N°	Dilatation	Érosion	Classe de fond	Classe à filtrer	Classe de remplacement	Remarques
1	(3x3)	(3x3)	Herbages	Feuillus	Herbages	Filtrage des feuillus dans les herbages ou dans les reentrants des herbages
2	(3x3)	(3x3)	Conifères, feuillus	Herbages	Feuillus	Filtrage des herbages localisés dans les forêts ou dans les reentrants des forêts
3	(5x5)	(3x3)	Conifères, feuillus	Habitat peu dense	Cultures	Remplacement de l'habitat peu dense par des cultures lorsqu'il est localisé dans les forêts ou sur une frange d'au moins un pixel le long des forêts
4	(7x7)	(7x7)	Conifères, feuillus	Cultures	Incultes	Remplacement des cultures même massives par des incultes dans les forêts et dans les reentrants des forêts
5	(9x9)	(7x7)	Habitat dense, habitat peu dense	Cultures	Herbages	Remplacement des cultures par les herbages dans les villages et le long des villages sur une frange d'au moins un pixel

6. Références

- COLLETTE, B. 1990. Segmentation d'image par propagation sur les érodés ultimes (Application à l'imagerie satellitaire). Bulletin trimestriel de la Société belge de photogrammétrie, télédétection et cartographie, n°s 179-180, p. 21-33.
- COSTER, M. et CHERMANT J. L., 1989. Précis d'analyse d'images. Presses du CNRS, Paris, 560 p.
- DURANT, M. A. et FLOUZAT, G. 1984. Amélioration des classifications spectrales des périmètres rizicoles de Segou (Mali) par analyse de la texture des images de simulations SPOT. Rapport du Centre d'étude spatiale des rayonnements (CESR), Toulouse, n° 84-1136, 90 p.
- MARION, A. 1987. Introduction aux techniques de traitements d'images. Eyrolles, Paris, 278 p.

24

Cartographie thématique et structurale des substrats récifaux et lagunaires peu profonds par la télédétection satellitaire à haute résolution

OLIVIER YVES DE VEL* et WILLIAM BOUR**

**Department of Computer Science, James Cook University, Townsville QLD 4811,
Australie; courrier électronique : olivier@curacoa.cs.jcu.edu.au*

***Laboratoire de traitement d'images calédonien (Latical), ORSTOM, B.P. A5, Nouméa,
Nouvelle-Calédonie*

Résumé

La présente étude est fondée sur l'analyse d'une image multibande HRV de SPOT et a pour but d'obtenir une cartographie thématique et structurale des substrats récifaux et lagunaires peu profonds sur le littoral de la Grande Terre de la Nouvelle-Calédonie. Cette étude a conduit, d'une part, à mettre au point une méthode de transformation des variables de base (XS1 et XS2) permettant une décorrélation de l'information acquise sous l'eau, d'autre part, à proposer des modèles de la nature et de la structure des fonds de l'environnement récifal. Cette transformation permet une classification des principaux composants de l'écosystème corallien et une caractérisation de la bathymétrie de ces composants. Onze thèmes sont discriminés dont huit bionomiques. Les fonds meubles et fonds durs ainsi que les coraux vivants et morts sont identifiés. Un gradient du rapport entre la densité de coraux vivants et coraux morts a été observé. Ceci a permis d'obtenir une carte thématique de la distribution du corail vivant et des débris coralliens sur la barrière récifale et parmi les pâtés coralliens situés dans la région lagunaire. L'utilisation de néo-canaux dits de texture a mis en évidence la morphologie du substrat corallien. Plusieurs images de texture ont été obtenues selon l'indice pigmentaire

(XS1)ⁿ/(XS2) utilisé dans la valeur numérique d'origine. Ces images fournissent une information sur la structure des fonds meubles et durs du récif et du lagon peu profond, telle que la morphologie des chenaux du platier récifal et du système d'éperons et de sillons.

1. Introduction

L'importance de l'ensemble du milieu corallien ne se limite pas seulement à la place qu'il occupe dans la chaîne alimentaire et au fonctionnement de l'écosystème d'un récif corallien. Il contribue également à une zone d'intérêt économique pour les habitants du littoral à travers l'exploitation de plusieurs ressources exportables telles que les trochas (*Trochus Niloticus*), pour la boutonnerie de luxe et la joaillerie, et les produits parapharmaceutiques issus directement du massif corallien comme, par exemple, la crème solaire. Cette ressource renouvelable présentant un intérêt économique certain dans les îles dotées d'une formation corallienne, il est nécessaire d'en évaluer régulièrement le potentiel exploitable.

Le littoral de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie est séparé du domaine océanique par une succession de récifs barrières isolant un vaste lagon dépassant 1500 km en longueur et dont la largeur peut atteindre 40 km. Comme la plupart des îles océaniques, la Nouvelle-Calédonie exploite et cherche à mieux connaître les ressources benthiques présentes dans ce vaste ensemble corallien.

Les formations récifales du lagon ont créé une grande variété de biotopes, généralement colonisés par un ensemble d'espèces (animales ou végétales) qui leur est inféodé. Il est donc indispensable, pour l'évaluation d'une ressource biologique donnée, de connaître la surface occupée par le milieu corallien et d'obtenir une cartographie bionomique de ce milieu. C'est grâce à la photographie aérienne, l'une des premières formes de la télédétection, et à d'autres méthodes classiques telles que des observations effectuées en plongée sous-marine, selon un plan d'échantillonnage adapté au milieu étudié, que la cartographie du massif corallien a pu être réalisée avec précision sur certains sites (BOUR *et al.*, 1986). Bien que la photographie aérienne soit efficace pour des zones de quelques hectares, il en est autrement pour des zones couvrant plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Ou bien le plan d'échantillonnage sur le terrain devient gigantesque et l'on se heurte à toutes sortes de difficultés techniques et financières ou alors l'interpolation et l'extrapolation des résultats entachent les estimations des surfaces (et donc des biomasses) d'erreurs non négligeables. Un problème de cette ordre se présente pour l'évaluation du milieu corallien en Nouvelle-Calédonie et dans d'autres régions du Pacifique-Sud, telles que la Grande barrière récifale de l'Australie. Les moyens modernes de télédétection (satellites Landsat et SPOT) apportent dans ce domaine des progrès décisifs. Les données du satellite SPOT, en raison de sa haute résolution au sol et des possibilités d'acquisitions répétitives d'une même scène par visées latérales (bien que limitées en régions tropicales ceci dû à la présence de nuages), se prêtent bien à l'observation des milieux littoraux caractérisés par une forte variabilité spatiale et temporelle.

L'objectif de cette étude est de dresser une cartographie thématique et structurale détaillée des substrats récifaux et lagunaires peu profonds utilisant des images numériques HRV de SPOT à haute résolution. La région d'analyse et d'observation consiste en la partie méridionale du récif Tétémbia en Nouvelle-Calédonie.

2. Matériel et méthodologie

2.1. Bases méthodologiques de l'étude

Les travaux de recherche en matière de télédétection et de milieux coralliens peu profonds et en eau claire sont relativement nombreux et touchent principalement aux aspects bathymétriques (LYZENGA, 1978 et 1981; JUPP, 1988) et à ceux de la cartographie des types de fonds (BENMOUSSA *et al.*, 1989; BOUR *et al.*, 1986). Certaines méthodologies de travail ont permis de développer des algorithmes de traitement très simples, basés sur l'utilisation du ratio de deux bandes spectrales, afin de produire des cartes thématiques : 1) bathymétriques et 2) de la nature des fonds (indice de boue, granulométrie, etc.) (JUPP, 1985; LEMAIRE *et al.*, 1987). C'est à partir de ces travaux et sur la base de ceux que nous avons menés en parallèle sur des sujets équivalents (BOUR *et al.*, 1986) qu'a pu être développée notre étude.

2.2. Région d'intérêt et matériel

La région d'intérêt se trouve dans l'ensemble du récif et du lagon Tétémbia qui fait partie d'une succession de récifs barrières comprenant le littoral de la Grande Terre de la Nouvelle-Calédonie. Le lagon de la Nouvelle-Calédonie s'étend sur une région de 1500 km de longueur et 40 km de largeur. La zone d'investigation de la présente étude se situe dans la partie nord du passage de Uitoé du récif de Tétémbia, à 22°10'S et 166°05'E (fig. 1). Cette zone consiste en un récif externe renfermant un vieux récif réticulé avec un lagon submergé. La largeur du lagon est d'environ 1 km et sa profondeur de 2 à environ 10 mètres (marée basse). Plusieurs champs de constructions coralliennes (pâtés coralliens non affleurants) se trouvent dans le lagon.

Les données utilisées sont, d'une part, des enquêtes de vérification de terrain effectuées avec des mesures ponctuelles (observations et photographies) et des transects sous-marins (avec caméra de vidéo); d'autre part, une image HRV en mode XS acquise en août 1986. Des trois canaux de départ, XS1, XS2 et XS3, seuls les deux premiers sont utilisables, le troisième ne pénétrant pas dans l'eau (absorption de l'infrarouge proche). Les canaux XS1 et XS2, dont les longueurs d'ondes verte (XS1) et rouge (XS2) pénètrent plus ou moins profondément dans l'eau, sont utilisés ensemble pour différencier les faciès sous-marins entre 0 et 5 m de profondeur, selon le niveau de turbidité de l'eau. Au delà de 5 m, seul XS1 permet de discriminer les types de fonds.

En raison de la corrélation relativement importante des deux canaux XS1 et XS2 (coefficient de corrélation $r_{XS1, XS2} = 0,51$ pour un total de 31 200 pixels), une analyse en composantes principales voit le premier axe principal emporter un large pourcentage (86,1%) de la variance totale, ce qui n'est pas favorable à une classification thématique (fig. 24-2, voir cahier couleur). La structure en «boomerang» de l'histogramme bidimensionnel construit à partir des canaux XS1 et XS2 montre qu'une représentation en coordonnées polaires ρ - θ dans le plan de l'histogramme bidimensionnel permet de mieux répartir l'information que la représentation en coordonnées cartésiennes et d'améliorer la discrimination des thèmes récifaux. Cette représentation permet une classification des principaux composants de l'écosystème corallien et une caractérisation de la bathymétrie de ces composants.

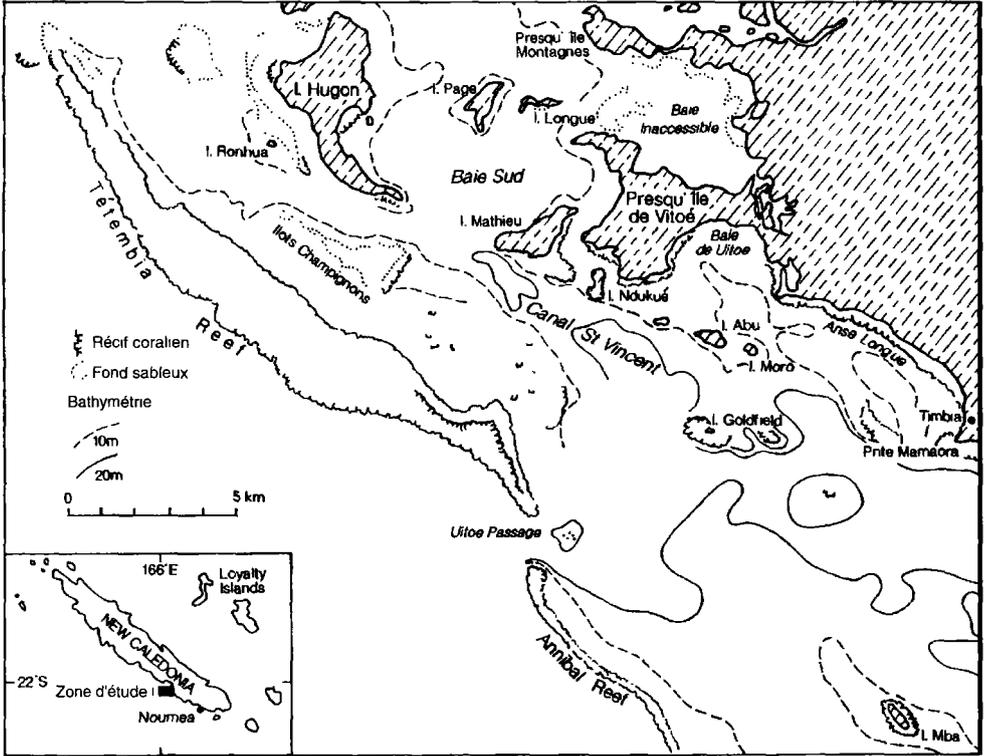


Figure 1. Carte de situation

On a créé deux néo-canaux ρ^* et θ^* , en combinant les deux images d'origine :

$$\rho^* = \text{hypot}(XS1, XS2)$$

$$\theta^* = \text{atan}^{-1}(XS2/XS1)$$

où la fonction «hypot» est donnée par :

$$\text{hypot} = ((XS1)^2 + (XS2)^2)^{1/2}$$

Le coefficient de corrélation r_{ρ^*, θ^*} pour la même région d'intérêt n'est plus que -0,33, avec la première composante principale emportant maintenant 79,4% de la variance totale. La transformation optimale obtenue par essais répétitifs, afin de produire la meilleure discrimination des composants récifaux, est (fig. 24-3, voir cahier couleur) :

$$\rho = (XS1^2 + XS2^2)^{1/2}$$

$$\theta = \text{atan}^{-1}((XS2-10)/(XS1-22))^{0,75}$$

Afin de pouvoir : 1) séparer les substrats récifaux et lagunaires qui sont caractérisés par des signatures spectrales similaires et 2) mettre en évidence les hétérogénéités locales et fournir une information sur la morphologie des fonds du lagon et du substrat corallien, un néo-canal

dit de texture a été créé. Celui-ci est obtenu par le remplacement en chaque point de l'image de la valeur numérique d'origine par le résultat du calcul d'un écart-type local dans une fenêtre 3 X 3 autour du pixel considéré (JUPP, 1985). C'est-à-dire, pour un pixel p_{ij} :

$$\tau_{ij} = \frac{1}{8} \left(\sum_{n,m} |p_{ij} - p_{nm}|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

où $\max\{|i - n|, |j - m|\} = 1 \quad \forall n, m = 1, 2, \dots, 8$

Deux néo-canaux de texture ont été utilisés pour deux types d'indice pigmentaire (BENMOUSSA *et al.*, 1989) :

$\tau_{(1)}^2 = \text{variance de } (XS1/XS2)$

$\tau_{(2)}^2 = \text{variance de } (XS1^2/XS2)$

Les trois canaux, ρ , θ et $\tau_{(2)}$, traités par analyse en composantes principales (fig. 24-4, voir cahier couleur) permettent de mettre en évidence les faciès peu profonds. Comparé à l'indice pigmentaire $\tau_{(1)}$, $\tau_{(2)}$ accentue les hétérogénéités du récif, tout particulièrement autour des pâtés coralliens du lagon et des rainures du récif lagunaire.

Une carte thématique est obtenue à partir d'une classification «inverse» suivie d'une classification par maximum de vraisemblance (maximum likelihood estimate MLE). La classification dite «inverse» utilise les données obtenues à partir des vérifications de terrain dans l'espace de l'image et reprojette ces valeurs dans l'histogramme bidimensionnel ρ - θ . Tous les pixels ayant une luminance similaire dans les deux canaux XS1-XS2 seront aussi projetés dans le même ensemble dans l'espace ρ - θ . Les autres pixels n'ayant pas été classifiés par cette technique sont classifiés durant la phase MLE suivante.

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse structurale du récif

La combinaison colorée entre les trois canaux ρ , θ et $\tau_{(2)}$ (ou $\tau_{(1)}$) permet de mettre en évidence :

- la morphologie de la pente et des éperons et sillons du platier du récif lagunaire, et
- les chenaux de houle et sillons du platier récifal externe.

Certains détails, concernant les zones de bathymétrie intermédiaire, ont aussi été identifiés, tels que :

- les hétérogénéités de fond du lagon dues à l'hydrodynamisme,
- le périmètre des pâtés coralliens.

3.2. Analyse des thèmes

Une carte thématique, issue du traitement des histogrammes bidimensionnels, a été réalisée. Onze thèmes sont discriminés dont huit bionomiques (fig. 24-5, voir cahier couleur, et tab. I). Les fonds meubles et les fonds durs ainsi que les coraux vivants et morts sont identifiés. Les figures 24-6 et 24-7 (voir cahier couleur) présentent les résultats plus détaillés.

Tableau I. Modèle de classification thématique pour Tétémbia

Numéro du thème	Description générale du thème
9 et 10	Débris coralliens lagunaires
5 et 6	<i>Favidae</i> et <i>Porites</i> sur platier récifal
1 et 13	<i>Acropora</i> s dans chenaux de houle
11 et 12	<i>Acropora</i> s et <i>Tubinaria</i> profonds
3 et 4	Interface corail-fond meuble
7 et 14	Platier récifal et débris coralliens
15 et 16	Lagon peu profond (5-10 m)
17 et 18	Lagon profond (>10 m)
19	Bordure externe du récif barrière
2	Sable peu profond
8	Sable profond

3.2.1. Thèmes généraux

Les thèmes généraux suivants ont été identifiés :

- La morphologie des fonds durs peu immergés est similaire à celle du platier externe et à celle du récif lagunaire réticulé (thèmes 1, 5, 6 et 13). Ces fonds sont caractérisés par de grandes dalles couvertes de débris et parsemées de taches de coraux *Favidae* et *Porites*. Des vérifications sur le terrain et l'utilisation de cartes aériennes suscitent l'observation que certaines de ces dalles consistent en chenaux de houle alignés avec le rayon de courbure du récif externe et sont remplies de coraux branchus (*Acroporas*).

- Des coraux vivants ont été identifiés sur les dalles du platier externe (thèmes 1, 5, 6 et 13), ainsi que sur la pente interne du récif externe, sur le fond de certaines sections du récif réticulé, et autour du périmètre des pâtés coralliens (thèmes 11 et 12). Ces coraux vivants sont principalement du type *Favidae* et *Porites* pour les faibles profondeurs (moins de 3-4 m) et des *Acroporas* pour fonds de bathymétrie plus élevés. Un gradient du rapport entre la densité de coraux vivants et coraux morts le long de l'axe θ a été observé (thèmes 8 à 13 et 1, correspondant à un gradient positif).

- Les débris de coraux morts (thèmes 9 et 10) ont été correctement identifiés autour de la base de la pente interne du récif externe, autour du périmètre des pâtés coralliens et sur le côté nord du récif réticulé. Le passage des cyclones est responsable de la densité élevée des débris coralliens.

- Les fonds meubles sont séparés en deux thèmes (2 et 8). Ils sont constitués de sable très blanc, sans herbier, légèrement criblés de taches d'*Acropora*. Le thème 2 correspond à une faible bathymétrie (0 à 10 m), tandis que le thème 8 s'identifie avec des fonds meubles plus profonds (plus de 10 m).

3.2.2. Thèmes fonds durs

Les thèmes fonds durs ont été séparés en trois catégories confrontées à la vérité-terrain :

- Le platier externe et le récif lagunaire réticulé sont couverts de coraux *Favidae* et *Porites* (thèmes 5 et 6) et des débris coralliens. Ces coraux vivants sont aussi présents sur les plates-formes submergées des pâtés coralliens.

- Les coraux vivants sont également représentés par les thèmes 11 et 12 en bordure de la partie méridionale du récif lagunaire et le long de la pente interne du récif externe. Les coraux *Acropora* se trouvent en faibles profondeurs (< 2 m) et les *Tubinaria* au-delà de 2 mètres. Les eaux peu profondes des chenaux de houle du platier récifal sont parsemées de coraux branchus (thèmes 1 et 13).

- Une interface entre le corail et les fonds meubles a été identifiée (thèmes 3 et 4).

4. Conclusions et perspectives

Le traitement, effectué à partir de données HRV, a permis d'obtenir des cartes structurales et thématiques des substrats récifaux et lagunaires peu profonds.

Le traitement a permis une bonne discrimination des différents milieux. Onze thèmes sont discriminés dont huit bionomiques. Les fonds meubles et fonds durs ainsi que les coraux vivants et morts sont identifiés. Un gradient du rapport entre la densité des coraux vivants et coraux morts a été observé. Ceci a permis d'obtenir une carte thématique de la distribution du corail vivant et des débris coralliens sur la barrière récifale et parmi les pâtés coralliens situés dans la région lagunaire. L'utilisation de néo-canaux dits de texture a mis en évidence la morphologie du substrat corallien. Plusieurs images de texture ont été obtenues selon l'indice pigmentaire XS1⁰/XS2 (pour n=1, 2). Ces images fournissent une information sur la structure des fonds meubles et durs du récif et du lagon peu profond, telle que la morphologie des chenaux du platier récifal et du système d'éperons et de sillons. La cartographie structurale et thématique, combinée avec l'acquisition répétitive des données satellitaires, permettent d'évaluer la distribution spatiale et temporelle des principaux composants de l'écosystème corallien.

Les futures perspectives se concentreront sur l'applicabilité des techniques développées au-delà du récif Tétémbia, tout particulièrement sur l'ensemble du récif de la Nouvelle-Calédonie, ainsi que dans les autres îles du Pacifique-Sud.

Aussi, grâce à la répétitivité des images HRV, il sera possible d'effectuer des études temporelles de l'évolution du domaine corallien comme, par exemple, l'estimation des dommages liés aux catastrophes naturelles (cyclones, pollution, etc.).

5. Références

- BEN MOUSSA, H., VIOLLIER, M. et BELSHER, T. 1989. Télédétection des algues macrophytes de l'archipel de Molène (France) : Radiométrie de terrain et application aux données du satellite SPOT. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, p. 53-69.
- BOUR, W., LOUBERSAC, L. and RUAL, P. 1986. Thematic mapping of reefs by processing of simulated SPOT satellite data : Application to the Trochus Niloticus biotope on Tétémbia Reef (New Caledonia). *Marine Ecology - Progress Series*, vol. 34, p. 243-249.
- JUPP, D. L. 1985. The Brian Handbook, CSIRO Division of Water resources. *Natural Resources Series*, n° 3, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia.
- JUPP, D. L. 1988. Background and extensions to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters. *Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone*, Gold Coast, Australia.

- LEMAIRE, O., LOUBERSAC, L., D'OZOUVILLE, L. et RICHMOND, B. 1987. Évaluation de l'apport de SPOT dans le cadre du programme de prospection des ressources minérales de l'atoll d'Aitutaki (îles Cook); Étude préliminaire de l'impact du passage du cyclone Sally. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats, Paris, Cepadues-Éditions, Toulouse.
- LYZENGA, D. R. 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, vol. 17, p. 3.
- LYZENGA, D. R. 1981. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 2, p. 71-82.

25

Un modèle bayésien de segmentation d'images

VINCENT GRANVILLE, JEAN-PAUL RASSON
et FRANÇOISE ORBAN-FERAUGE

*Laboratoire GEOSATEL, Facultés universitaires Notre-Dame-de-la-Paix,
rue de Bruxelles, 61, 5000 Namur, Belgique; téléphone : (32) 81 72 41 11;
télécopieur : (32) 81 23 03 91*

Résumé

Un modèle probabiliste pour la segmentation d'images est développé dans le cadre du traitement statistique des images numériques. Il constitue une suite logique et intégrée parfaitement les méthodes et théories développées par RASSON (BAUFAYS and RASSON, 1985; RASSON *et al.*, 1991) en classification et analyse discriminante, et dont les outils mathématiques de base sont les processus poissoniens et les enveloppes convexes. Une propriété intéressante du modèle est le fait que conditionnellement à la segmentation, l'image est représentée par un champ markovien (GEMAN, 1988) dont le voisinage d'un pixel est constitué par tous les pixels appartenant au même segment. L'inférence statistique, qui consiste à chercher la meilleure segmentation pour une image fixée (en maximisant la vraisemblance de la segmentation conditionnellement à l'image), repose sur un algorithme de type «recuit simulé» qui fournit un maximum global de la vraisemblance conditionnelle. En pratique, on pourra toutefois se contenter d'un algorithme plus rapide qui fournit un maximum local. L'algorithme de type «recuit simulé» peut également être utilisé pour filtrer une image binaire, effectuer de la classification automatique ou regrouper et scinder des segments. La démonstration de sa convergence est une étude détaillée des chaînes de Markov non stationnaires. La théorie sous-jacente est présentée par exemple par COLLINS *et al.* (1989).

1. Introduction

Dans le cadre du traitement statistique d'images numériques, un modèle bayésien de segmentation est proposé. Dans chaque cas particulier (distribution gaussienne, distribution résultant de l'application d'un processus de Poisson, etc), il doit permettre d'écrire la vraisemblance conditionnelle de toute segmentation et, en la maximisant, de chercher à établir une segmentation optimale. L'algorithme présenté est de type «recuit simulé» et est implémentable sur transcomputers.

2. Modèle

Dans sa version simplifiée, la vraisemblance d'une segmentation y conditionnellement à l'image observée x s'écrit

$$P(y|x) \propto P(y) \cdot \prod_{i=1}^{k(y)} P(x_j, j \in S_i|y)$$

où

S_i représente le segment i ,

$k(y)$ représente le nombre de segments,

x_j représente la signature spectrale du pixel j .

2.1. Théorème

Conditionnellement à la segmentation y , l'image x est modélisée par un champ markovien où le voisinage d'un pixel est constitué des pixels de ce segment. Un tel champ est appelé champ markovien segmenté; il vérifie nécessairement la propriété de factorisation précédente.

Ce modèle a déjà été utilisé par LEE et CRAWFORD (1989). Bien que $P(y)$ puisse être modélisé par une distribution de Gibbs, le cas le plus simple à traiter est celui où $P(y) \propto \alpha^{k(y)}$, $\alpha > 1$. Le paramètre α joue alors un rôle crucial en ce qui concerne le nombre de segments de la segmentation optimale.

Au sein d'un même segment, il est souvent admis que les signatures spectrales sont indépendamment et identiquement distribuées, ce qui signifie que la densité jointe sur un segment i quelconque se factorise en un produit de densités issues d'une même loi :

$$P(x_j, j \in S_i|y) = \prod_{j \in S_i} P(x_j|y)$$

Si on adopte un modèle basé sur l'application du processus stationnaire de Poisson en classification supervisée, la vraisemblance conditionnelle s'écrit finalement :

$$P(y|x) \propto \alpha^{-k(y)} \cdot \prod_{i=1}^{k(y)} \{\lambda(D_i)\}^{-|S_i|}$$

où $l(D_i)$ est la mesure de Lebesgue du domaine de distribution des points du segment S_i dans l'espace des signatures spectrales.

Ce domaine peut être l'enveloppe convexe discrète des points du segment i qui sera en pratique approchée par un hyperrectangle pour des raisons d'économie de temps de calcul.

2.2. Remarque

Certaines contraintes peuvent être imposées, ainsi par exemple $\lambda(D_i) \leq c$, où c est un réel positif quelconque qui représente le volume maximum toléré pour l'enveloppe convexe (dans l'espace des signatures spectrales) des points d'un segment. Dans le cas où x représentera la vérité-terrain, on choisira $c=1$, ce qui se traduit par le fait que chaque segment ne pourra contenir des pixels correspondant à une vérité-terrain différente.

3. Algorithme théorique

Connaissant l'image observée x , on recherche la segmentation y qui maximise la vraisemblance conditionnelle $P(y|x)$. Une solution est fournie par l'algorithme proposé. Ce dernier se distingue des autres algorithmes de «recuit simulé» par le fait que la segmentation courante est modifiée seulement si sa vraisemblance est petite et non pas si la vraisemblance de la segmentation modifiée est grande.

3.1. Algorithme

1) Commencer avec une segmentation initiale y_0 et $t=0$ (par exemple y_0 est la segmentation où chaque pixel constitue un segment à lui seul);

2) À chaque instant $t=1, 2, \dots$, construire la segmentation y_t comme suit :

a) Choisir au hasard un pixel i dans l'image;

b) soit $y_t=y_{t-1}$ avec probabilité $1-\xi_t$;

soit $y_t=y_{t-1}$ avec probabilité ξ_t , excepté que :

si i était à l'intérieur d'un segment, il définit maintenant un nouveau segment à lui tout seul,

si i était situé à la frontière de deux segments (i appartient donc à un de ces deux segments)

alors i est affecté à l'autre des deux segments,

si i était situé à la frontière de plusieurs segments, il est affecté de manière déterministe à un des segments voisins (par exemple, i est affecté au segment voisin dont le numéro est le plus petit).

En choisissant

$$\xi_t = \left\{ q \cdot \frac{P(y_0|x)}{P(y_{t-1}|x)} \right\}^{\phi(t)}$$

où

$\phi(t) = [\log_{\mu} t]$ avec μ entier suffisamment grand pour que l'algorithme converge vers un maximum global de la vraisemblance conditionnelle;

$q = \inf_y P(y|x) / \sup_y P(y|x)$;

on est assuré que la segmentation $y_* = \lim_{t \rightarrow \infty} y_t$ est une segmentation qui maximise globalement $P(y|x)$.

3.2. Remarques

L'expression $1/\phi(t)$ est traditionnellement appelée température du système au temps t . D'autre part, le calcul de $P(y_t|x)$ est simple et rapide si $P(y_{t-1}|x)$ a déjà été calculé. Enfin, quelque soit la segmentation initiale y_0 , l'algorithme converge vers un optimum global.

4. Algorithme pratique

En pratique, on se contente d'un algorithme beaucoup plus rapide, qui fournira un maximum local de $P(y|x)$. Un tel algorithme consiste à partir d'une segmentation initiale où chaque pixel constitue un segment. Chaque segment est ensuite élargi de proche en proche tant que la vraisemblance conditionnelle s'accroît, c'est-à-dire tant que $P(y_t|x) > P(y_{t-1}|x)$. Lorsque celle-ci ne s'accroît plus, on construit le segment suivant. Donc, au lieu de choisir au hasard dans l'image le pixel i de l'étape 2.1., on le choisit parmi la liste des pixels contigus au segment en cours de construction. Une fois l'image balayée entièrement, on opère un regroupement des segments, pour éliminer les segments dont la taille (c'est-à-dire le nombre de pixels) est inférieure à un seuil fixé. Ce regroupement s'opère également de telle sorte à maximiser la vraisemblance conditionnelle.

L'algorithme a été testé dans le cadre de la classification supervisée d'images SPOT multibandes, et sous l'hypothèse d'une distribution résultant d'un processus de Poisson stationnaire dans l'espace spectral. Les enveloppes convexes ont été approximées par des hyperrectangles et un pré-traitement a été utilisé pour réduire le nombre de segments : les niveaux de gris ont été tronqués et l'image réduite d'un facteur deux. La segmentation a été opérée sur l'image réduite et tronquée, uniquement sur les canaux 1 et 2 qui apparaissent à plus d'un titre comme les plus discriminants. Notre segmentation a la particularité de fournir un grand nombre de segments (de l'ordre de 10 000 pour une image 512 x 512) dont beaucoup sont constitués de un ou deux pixels. À ce stade, ou bien on les considère comme «outliers» (ils sont constitués surtout de mixels) et on les laisse tels quels, ou bien on les regroupe avec des segments voisins. La seconde alternative est loin d'être toujours la meilleure.

En partant d'une notion de voisinage entre pixels suffisamment abstraite, il est possible d'obtenir des segments qui sont constitués de parcelles disjointes voire «trouées». Bien que de tels segments n'ont guère de sens pour le géographe, cette façon de procéder permet d'obtenir une segmentation contenant sensiblement moins de segments et offre une meilleure robustesse que la méthode consistant à regrouper de petits segments contigus pour en former de plus gros. On peut encore espérer gagner en robustesse en remplaçant les hyperrectangles par les enveloppes convexes qu'ils sont censés approximer. Mais l'avantage principal de l'algorithme pratique réside surtout en sa rapidité : seulement quelques secondes sont nécessaires pour découper en segments une image 512 x 512 sur un VAX 6220, en travaillant simultanément sur deux canaux. Enfin, c'est probablement aussi la première fois que le modèle de processus poissonien, déjà utilisé avec succès par la même équipe dans le cadre de la classification supervisée, apparaît dans le cadre du problème de segmentation.

Une classification supervisée point par point en sept classes a été effectuée sur une image SPOT 512 x 512 (trois canaux), par la méthode des enveloppes convexes. Les résultats figurent sur le tableau I. Celui-ci représente la matrice de confusion entre l'image classée et la vérité-terrain (connue pour 163 918 pixels). Ensuite, tous les pixels d'un même segment ont été classés suivant la règle de la majorité. L'amélioration apportée par notre segmentation est reflétée sur le tableau II. La classe 0 contient les pixels non classés.

Tableau I. Matrice de confusion entre la classification point par point et la vérité-terrain

	0	1	2	3	4	5	6	7
1	0	47	13	0	6	2	27	0
2	62	280	50 305	424	981	3 640	3 946	42
3	87	1	201	5 177	125	2 708	222	1
4	282	27	379	180	41 732	2 264	3 237	1 310
5	215	25	814	4152	1 639	33 607	2 087	34
6	4	5	306	31	430	486	1 624	24
7	5	0	0	0	299	5	13	405

Tableau II. Matrice de confusion entre la classification par segments et la vérité-terrain

	0	1	2	3	4	5	6	7
1	0	37	4	0	10	2	42	0
2	0	94	52 594	312	1 084	3 249	2 346	1
3	4	0	381	4 817	202	2 971	147	0
4	24	24	614	321	43 921	2 489	1923	95
5	0	2	966	2 360	1 892	36 032	1 316	5
6	0	0	293	43	368	575	1 629	2
7	0	0	0	0	421	11	0	295

5. Conclusion

Les meilleures segmentations - celles qui fournissent les meilleures classifications - sont celles qui maximisent la vraisemblance conditionnelle. Dès lors, le quotient de vraisemblance $P(y|x)/P(y'x)$ apparaît comme un critère naturel pour mesurer l'efficacité de deux segmentations y, y' produites par deux algorithmes différents, x désignant la vérité-terrain (lorsque celle-ci est inconnue, x représente l'image source). Notre algorithme pratique de segmentation a été testé avec succès dans le cadre de la classification supervisée d'images SPOT multibandes : notre procédure de détection de segments, bien que simple, fournit des résultats satisfaisants (gain en nombre de points bien classés) en très peu de temps.

6. Références

- BAUFAYS, P. and RASSON, J.-P. 1985. A new geometric discriminant rule. *Computer Statistics Quarterly*, vol. 2, p. 15-30.
- COLLINS *et al.* 1989. *Simulated annealing and optimization : modern algorithms with VLSI, optimal design and missile defense applications.* American Science Press Inc., New York

- GEMAN, D. 1988. Random fields and inverse problems in imaging. *Lecture notes in Mathematics*, vol. 1427, p. 117-196.
- LEE, S. and CRAWFORD M. M. 1989. Statistically based unsupervised hierarchical image segmentation algorithm with a blurring corrector. *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver*, vol. 2, p. 630-633.
- RASSON, J.-P. *et al.* 1991. About estimates of measures of the convex hulls of sets of points related to the problem of supervised classification. *Proceedings of the 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Rio de Janeiro*.

26

Méthode d'établissement d'une nomenclature par la texture des zones d'une image

ABDELHAMID KHODJA

Laboratoire de télé-analyse et société (LATES), Centre d'analyse et de mathématique sociales (CAMS), École des hautes études en sciences sociales (E.H.E.S.S.), 54, boulevard Raspail, 75006 Paris, France; téléphone : 33-1-49-54-20-36 ou 49-54-21-69; télécopie : 33-1-49-54-21-09

Résumé

Le but de ce travail consiste à établir une nomenclature d'une zone représentant la forêt de Bouconne (France). Nous avons, pour cela, utilisé une image multibande HRV de SPOT et avons procédé comme suit : 1) extraction du massif forestier de l'ensemble de la scène en utilisant l'histogramme du canal 2; 2) recherche de la discrimination interne de l'entité forêt dans le canal 3, 3) méthode de classification : nous avons réalisé la segmentation de la zone par la «méthode itérative de la variance minimale». Cette dernière consiste à définir un voisinage V pour chaque pixel et un système de voisinages $S_v(V)$ de V . On calcule les moyennes et variances des éléments de $S_v(V)$. La segmentation se fait selon les critères suivants : 1) on affecte au pixel courant a) la radiométrie du pixel appartenant à $S_v(V)$ et dont la variance est minimale ou b) la radiométrie moyenne du voisinage appartenant à $S_v(V)$ et dont la variance est minimale. 2) On regroupe les pixels ayant la même valeur radiométrique. 3) On recommence 1) a) ou b) et 2) selon les exigences thématiques. Nous avons rehaussé l'image segmentée par un opérateur Laplacien pour bien faire apparaître les contours. Les résultats de ce travail sont intéressants et permettent une approche cartographique.

1. Introduction

Notre objectif est d'établir une nomenclature de la forêt de Bouconne (France) par une méthode de segmentation d'images. Il s'agit, en fait, d'utiliser des méthodes statistiques spatiales pour discriminer au mieux les éléments composant une image de télédétection. Notre travail consiste donc à faire un découpage de l'image en sous-images homogènes quant à la radiométrie. C'est-à-dire à partitionner l'image représentant la forêt domaniale de Bouconne en un certain nombre de domaines (homogènes); et où chacun est composé d'une espèce différente. Ceci permet de mieux surveiller et contrôler les peuplements forestiers. Nous allons donc appliquer un algorithme basé sur les paramètres locaux (moyennes et variances) pour une stratification d'une image de télédétection. Cet algorithme permet de regrouper ces objets ou régions dans des classes de caractéristiques ou propriétés identiques (KUNT, 1981). Ce travail s'inscrit dans la recherche de l'approche structurale et texturale des images qui s'appuie d'une part sur l'expérience des photo-interprètes et la formalisation de la vision par ordinateur et d'autre part sur la quantification spatiale.

La forêt domaniale de Bouconne (LATROUS, 1986) et les bois de l'Isle-Jourdain, de Levignac et de Montaigut s'étendent sur 2300 hectares à l'ouest de Toulouse dans le département de la Haute-Garonne et dans celui du Gers. Elle est formée d'une mosaïque de peuplements de physionomie très diversifiée allant de la lande humide à la futaie de feuillus et de résineux. Cette diversité des peuplements est la conséquence tant de l'utilisation abusive de la forêt au cours des siècles passés que des conditions édaphiques. Entre 1880 et 1940, pins maritimes et pins sylvestres sont introduits dans la partie nord, la partie sud est traitée en futaie et le reste en taillis sous futaie, tandis que l'enrésinement se poursuit. Afin de discriminer au mieux ces variations, l'image HRV de SPOT de septembre 1988 est soumise à des procédés de traitements numériques d'images.

2. Segmentation par la méthode de la variance minimale

La segmentation est un processus qui consiste à regrouper des régions possédant une même propriété P . Elle est donc définie par le type de propriété P et par la définition d'un voisinage. C'est-à-dire deux régions $r(i)$ et $r(j)$ sont regroupées pour former un domaine deux fois plus grand, si elles possèdent une même propriété P et si nous pouvons les joindre par une chaîne continue de régions ayant cette propriété P (PONG *et al.*, 1984). Nous supposons qu'un objet est homogène si les pixels qui le constituent sont similaires.

2.1. Propriété de région

On rencontre souvent le groupe de mots «propriété d'une région». Une propriété de région est une fonction qui applique cette région de l'image sur des nombres.

- Longueur, surface, convexité, etc. sont des propriétés géométriques.
- Niveau de gris en un pixel ou niveau de gris moyen d'une région sont des propriétés physiques.
- Valeur moyenne, variance, probabilité conjointe, etc. des niveaux de gris sont des propriétés de texture. (La texture peut être considérée comme une forme périodique perturbée aléatoirement).

Pour déterminer une propriété d'une région, il faut d'abord définir la région et la propriété. Ensuite, il faut exprimer cette propriété sous forme analytique compatible avec un traitement numérique.

2.2. Principe de la segmentation

2.2.1. Phase 1

On suppose qu'une image satellitaire ou une photographie aérienne, $I(i,j)$, $i=1,\dots,m$ et $j=1,\dots,n$; est composée de N régions étiquetées $r(1), r(2), \dots, r(N)$, et $P^k(1), P^k(2), \dots, P^k(N)$ les propriétés correspondantes. On définit un voisinage $V(r)$ de la région r par :

$$V(r) = \{r' / r' \text{ et } r \text{ sont adjacentes}\}. \quad (2.1)$$

Une région est composée par un ou plusieurs pixels et deux régions sont dites adjacentes si elles ont une frontière commune.

Soit X un voisinage et $S_V(X)$ un système de voisinages de X (fig. 1). Nous avons :

$$V(X) = \{X, A, B, C, D, E, F, G, H\}$$

$$V(A) = \{A, B, C, G, H, K, L, M, X\}, \text{ etc.}$$

et

$$S_V(X) = \{V(X), V(A), V(B), V(C), V(D), V(E), V(F), V(G), V(H)\}.$$

On définit la moyenne locale de X par :

$$m(X) = \frac{1}{|X|} \sum_{r(j) \in X} P(j) \quad (2.2)$$

et la variance empirique locale de X par

$$Var(X) = \frac{1}{|X|-1} \sum_{r(j) \in X} (P(j) - m(X))^2 \quad (2.3)$$

où $P(j)$ est le niveau de gris moyen de la région $r(j)$.

	L	M	N	O	P	
	K	B	C	D	Q	
	J	A	X	E	R	
	I	H	G	F	S	
	Y	W	V	U	T	

Figure 1. Systèmes de voisinages $S_V(X)$ d'une région X

Le plus proche voisinage d'une région r , noté $PPV(r)$, est un élément de $S_V(r)$ et dont la variance est minimale.

$$PPV(r)=X' \text{ et } Var(X')=Min(Var(X)), X \in S_V(r) \quad (2.4)$$

Une itération de l'algorithme de segmentation commence par l'ensemble des régions $r(1), r(2), \dots, r(N)$, ayant les propriétés $P^k(1), P^k(2), \dots, P^k(N)$; et on remplace les propriétés de chaque région par une fonction des propriétés du plus proche voisinage. C'est-à-dire :

$$P^{k+1}(n)=f(PPV(r(n))), n=1, \dots, N. \quad (2.5)$$

où, bien sûr, $PPV(r(n))$ dépend de $P^k(n)$. Le processus est répété jusqu'à la convergence ou selon les exigences thématiques. En pratique, l'arrêt du processus dépend plutôt des thèmes et des types de données. Dans la phase 2, les régions adjacentes qui ont la même propriété sont fusionnées pour former un nouvel ensemble de régions. Nous allons donner des détails dans ce qui suit.

2.2.2. Phase 2

Supposons que nous ayons une image $I(i,j)$, $i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, n$, composée de N régions étiquetées $r(1), \dots, r(N)$. En appliquant le processus de segmentation, on obtient à la $i^{\text{ème}}$ itération des régions étiquetées $r^i(1), \dots, r^i(N_i)$ ($N_i \subseteq N$). Si la segmentation est jugée bonne thématiquement ou si la convergence du processus a lieu, on regroupe les régions ayant les mêmes propriétés. On obtient un ensemble de régions $r^{i+1}(1), \dots, r^{i+1}(N_{i+1})$, avec $N_{i+1} \subseteq N_i \subseteq N$.

2.2.3. Méthodes de remplacement

Nous allons considérer deux méthodes de remplacement. La première consiste à affecter à la région courante, r , à la $(k+1)^{\text{ème}}$ itération, la propriété moyenne de son plus proche voisinage :

$$P^{k+1}(r)=m(X), X=PPV(r). \quad (2.6)$$

La deuxième consiste à affecter à la région courante, r , à la $(k+1)^{\text{ème}}$ itération, la propriété de son plus proche voisinage :

$$P^{k+1}(r)=P(S), S \in PPV(r). \quad (2.7)$$

Les résultats montrent que la première méthode est la plus intéressante dans la mesure où l'on tient compte du nombre total de régions constituant le voisinage puisque l'on prend la moyenne des propriétés des régions du plus proche voisinage. Par contre, s'il s'agit de classes de régions, il est préférable de prendre la deuxième méthode de remplacement. La classification par cette méthode de segmentation est très intéressante, puisqu'elle tient compte de la texture des zones de l'image. Nous illustrons ces deux méthodes par l'exemple suivant.

2.2.4. Exemple

a) Méthode de remplacement par la valeur moyenne du PPV

Nous avons pris une parcelle de la forêt de Bouconne de taille 8×8 pixels (fig. 2). D'après les valeurs radiométriques, nous pouvons constater que structurellement le terrain de 2,50 hectares n'est pas formé de la même espèce. Nous avons appliqué les équations (2.1)-(2.6) pour chaque itération.

À la cinquième itération, nous aboutissons à neuf classes (fig. 3). À la douzième itération, il y a convergence de l'algorithme. Nous avons obtenu une parcelle contenant six espèces

46	46	37	31	31	31	31	31
43	36	35	32	32	32	31	31
31	30	35	33	37	34	30	31
31	30	40	35	39	33	32	20
31	31	30	31	47	39	37	31
31	31	31	32	30	31	42	40
36	32	31	30	31	31	31	30
39	38	35	32	31	30	30	30

Figure 2. Extraction de la forêt de Bouconne (8 X 8 pixels)

32,53	31,27	31,11	31,03	31,00	
30,83	31,26	31,10	31,02	30,98	
	30,89		31,01		
	30,90				30,96
30,91			30,88	30,85	30,25

Figure 3. Résultat après 5 itérations (remplacement par la valeur moyenne du PPV)

32,53	31,00				
30,83	31,00				
30,91	30,91			30,25	

Figure 4. Résultat après 12 itérations (remplacement par la valeur moyenne du PPV)

différentes (fig. 4). En fait, nous avons trois classes, ceci est dû au fait qu'une valeur radiométrique est un nombre entier positif. Nous reconnaissons plus facilement la partie de la forêt composée de feuillus mélangés à des résineux. C'est une zone de forte densité représentée par la valeur 31 sur la figure 4.

b) Méthode de remplacement par la valeur du PPV

Nous reconsidérons la parcelle représentant une exaction de la forêt de Bouconne (fig. 2). Le remplacement se fait par la valeur du plus proche voisinage dont la variance est minimale. Nous avons appliqué les équations (2.1)-(2.5) et (2.7) pour chaque itération.

Après la deuxième itération et après avoir regroupé les pixels voisins ayant la même valeur radiométrique, nous obtenons cinq classes (fig. 5). À la troisième itération, il y a convergence de l'algorithme (fig. 6).

La deuxième méthode converge plus vite que la première; ceci est dû au fait que l'on manipule des valeurs entières (des valeurs radiométriques) tirées directement des pixels du voisinage.

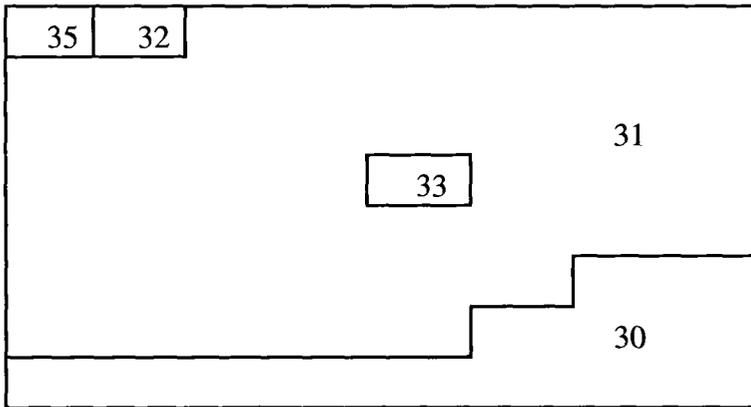


Figure 5. Résultat après 2 itérations (remplacement par la valeur du PPV)

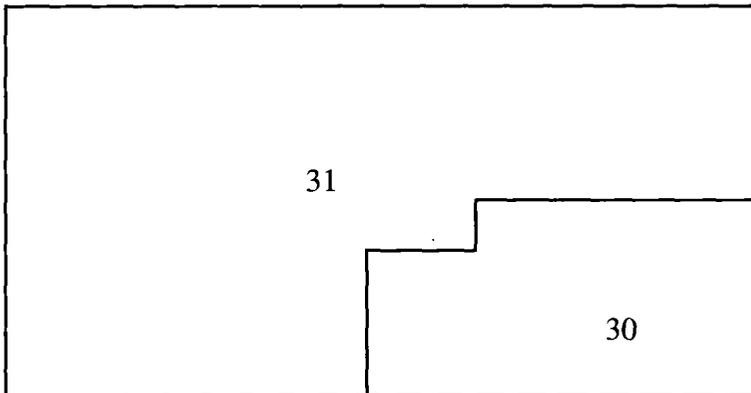


Figure 6. Résultat après 3 itérations (remplacement par la valeur du PPV)

2.2.5. Traitement

a) Application de l'algorithme à la forêt de Bouconne

Nous avons utilisé une image multibande HRV de septembre 1988 représentant la forêt de Bouconne (KHODJA, 1992). La figure 26-7 (voir cahier couleur) représente le canal 2 de HRV affiché en pseudo-couleurs. Après avoir vérifié que les canaux 1 et 2 sont très fortement corrélés, nous avons retenu les canaux 2 et 3 pour notre traitement. N'oublions pas que les images que nous utilisons sont de septembre. Nous devons souligner que notre traitement ne se limite pas à la forêt de Bouconne proprement dite, mais aussi autour de cette dernière (la périphérie qui contient des espaces non forêt, habitations et autre type de forêt).

Nous avons procédé comme suit :

1) Extraction du massif forestier de l'ensemble de la scène en utilisant l'histogramme du canal 2.

2) Recherche de la discrimination interne de l'entité forêt dans le canal 3.

3) Segmentation : nous avons appliqué l'algorithme de la segmentation par la méthode de remplacement par la valeur moyenne du PPV.

4) Pour bien faire apparaître les contours, nous avons jugé utile d'appliquer un opérateur linéaire pour rehausser l'image segmentée. Ceci nous a permis d'accentuer le zonage.

Remarquons qu'à cette période le canal 3 peut nous conduire à des confusions quant à la radiométrie compte tenu du fonctionnement de l'écosystème forestier. C'est donc la raison pour laquelle le canal 2 lui a été préféré pour le traitement.

b) Application du Laplacien à l'image segmentée

L'image rehaussée est obtenue par la différence de l'image originale et de son Laplacien.

Soit L un opérateur Laplacien défini par la matrice L(2,2)

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

on applique le Laplacien, L, à une image I(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, en utilisant le produit de convolution bidimensionnel de l'image I(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, avec la matrice L. On obtient l'image J(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, par différence de I(i,j) et de Y(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, :

$$Y = L ** I \quad (2.8)$$

$$Y(i,j) = \sum_k \sum_l L(k,l) I(i-k, j-l) \quad (2.9)$$

où L(k,l) est le Laplacien numérique; et ** désigne le produit de convolution. Nous avons :

$$Y(i,j) = I(i+1,j) + I(i,j+1) - 4I(i,j) + I(i,j-1) + I(i-1,j) \quad (2.10)$$

Y(i,j) est l'image obtenue par le Laplacien.

L'image rehaussée J(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, est obtenue par la différence de l'image originale et de son Laplacien :

$$J(i,j) = I(i,j) - Y(i,j); \quad i=1, \dots, m \text{ et } j=1, \dots, n. \quad (2.11)$$

L'image J(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, présente beaucoup plus de contraste, ce qui permet de bien voir apparaître les contours.

3. Résultats

Première itération : nous remarquons un regroupement des pixels ayant la même radiométrie. Troisième itération : (fig. 26-8, voir cahier couleur) les routes départementales commencent à disparaître de la scène en raison d'un autre regroupement des pixels. Cinquième itération (fig. 26-9, voir cahier couleur) : les routes départementales sont complètement effacées. Nous avons appliqué le Laplacien à cette image pour créer les contours des zones homogènes (fig. 26-10, voir cahier couleur). Dixième itération : après la segmentation, nous avons fait une extraction du massif forestier de l'ensemble de la scène et avons mis en évidence les contours. Nous pouvons déjà remarquer les différentes classes qui se forment (fig. 26-11, voir cahier couleur). Nous avons fait d'autres itérations et avons remarqué que les éléments fins de la forêt disparaissent. Par comparaison aux autres figures précédentes, nous pouvons arrêter le processus et établir une nomenclature.

Nous pouvons observer :

1) Dans le canal 2 le contour de la forêt apparaît nettement mieux, nous distinguons une association de trois classes éclatées et spatialement imbriquées et les différentes coupes sont bien délimitées.

2) Dans le canal 3 le contour du massif forestier s'estompe au profit des grands ensembles structurant la forêt : un ensemble de résineux (sud de l'image), un autre dominant de feuillus (nord) mélangés à des résineux et aux landes.

3) Il nous a semblé plus judicieux de faire d'abord une extraction du massif forestier en utilisant l'histogramme du canal 2, et ensuite nous avons appliqué l'algorithme de segmentation. Sur les résultats obtenus après trois itérations (fig. 26-12, voir cahier couleur), les routes départementales sont bien visibles et les différentes coupes sont bien délimitées.

En conséquence, le thématicien pourra utiliser le canal 2 pour définir les contours de l'espace forestier qu'il pourra projeter ensuite dans le canal 3. Ce dernier permet de saisir la structure interne de la forêt.

4. Discussion

Cet algorithme de segmentation est basé sur le principe des paramètres locaux (moyennes et variances) et aussi sur les itérations successives. Aux premières itérations, nous remarquons les regroupements autour des pics de fréquences accentuant les discontinuités dans les distributions. Ce sont les zones de faibles occurrences statistiques qui vont autoriser le partage des images aboutissant à définir les classes présentant une certaine logique interne de répartition spatiale (NAIZOT, 1992).

Cette méthode a permis de supprimer les lignages, de dégager des zones homogènes tout en gardant la distinction (séparation) entre les milieux composant la forêt. On aboutit à une classification des éléments et enfin en appliquant un opérateur Laplacien on aboutit à une approche cartographique de la scène représentant toute l'image. Ces méthodes sont essentielles pour l'extraction de données cartographiques (routes, îlots, etc.) à partir d'images; elles nous ont permis, en fait, de faire apparaître des aspects très intéressants de l'organisation spatiale et la définition de contours précis et de structures hétérogènes pour le milieu forestier. Ces procédures fourniront des résultats plus ou moins facilement interprétables par rapport à la notion visuelle de texture que nous tirons de leurs observations, néanmoins ils traduiront tous l'existence de niveaux de gris différents, la distribution spatiale de ces régions, la fréquence

de leurs apparitions, etc. Nous devons préciser que cette méthode de reconnaissance et de classification des éléments composant une image de télédétection dépend de l'objectif du thématicien.

5. Conclusion

Cette méthode de segmentation est très intéressante dans la mesure où l'on tient compte de la texture des images (stries, marbrures, etc.). Le principe de zonage ou stratification repose sur le découpage de l'image en sous-images homogènes quant à la radiométrie. Il serait intéressant d'appliquer la même méthode à une autre date car toute donnée de télédétection est un instantané qui ne fournit d'information que sur les objets existant au moment de la saisie. Ainsi pour chaque date de prise de données, existe une nomenclature dépendant des cycles naturels.

6. Références

- KHODJA, A. 1992. Statistique spatiale et applications aux images de télédétection. Thèse de doctorat de mathématiques appliquées de l'École des hautes études en sciences sociales, Paris, 261 p.
- LATROUS. A. 1986. Essai de topographie des unités homogènes de la forêt de Bouconne par télédétection spatiale. Mémoire de D.E.S.S., Paris.
- KUNT, M. 1981. Traitement numérique des signaux. Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique, Paris, 402 p.
- NAIZOT, T. 1992. Étude des écosystèmes littoraux de la baie de Paranagua (Brésil), Applications à la télédétection. Thèse de doctorat de géographie de l'École des hautes études en sciences sociales, Paris.
- PONG, T.C., SHAPIRO, L.G., WATSON, L.T., and HARALICK. R. 1984. Experiment in segmentation using a facet model region grower. Computer vision, graphics and image processing, n° 25, p. 1-23.

27

Le problème de l'échelle et de l'agrégation spatiale en télédétection

DANIELLE J. MARCEAU*, PHILIP J. HOWARTH*
et DENIS J. GRATTON**

**Département de géographie, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, N2L 3G1; téléphone : (519) 885-1211, poste 3404; télécopieur : (519) 888-6768*

***INRS-Eau, 2800, rue Einstein, bureau 105, case postale 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1V 4C7; téléphone : (418) 654-2585; télécopieur : (418) 654-2600*

Résumé

L'objectif de cette étude est de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'inconsistance des résultats de classification automatisée d'images de télédétection est liée au problème d'échelle et d'agrégation reconnu dans plusieurs recherches impliquant des données de type spatial. Des données acquises par le capteur aéroporté MEIS-II au-dessus d'une région forestière ont été ré-échantillonnées à 5 m, 10 m, 20 m et 30 m. Trois schémas de classification, correspondant à trois niveaux d'agrégation successive, ont été définis. L'effet d'échelle et d'agrégation a été mesuré à l'aide de cinq statistiques descriptives (le test Wald-Wolfowitz, la moyenne, la variance, l'asymétrie et l'aplatissement) calculées sur des transects de l'image représentant chaque classe, à chacune des résolutions spatiales. De plus, une classification multibande des images à chaque résolution spatiale a été effectuée en vue d'obtenir les trois schémas de classification précédemment définis. Les résultats révèlent que les valeurs des statistiques, à l'exception de la moyenne, de même que l'exactitude de classification de chaque type de couvert et d'utilisation du sol sont grandement affectées par le changement d'échelle et d'agrégation des données. Il importe donc de développer une nouvelle approche en télédétection qui tienne compte des caractéristiques spatiales intrinsèques des objets géographiques à l'étude.

1. Introduction

Avec l'avènement des images numériques satellitaires et aéroportées, la télédétection représente une source exceptionnelle de données géographiques et offre une alternative des plus prometteuses pour la production et la mise à jour de cartes thématiques à partir de méthodes d'analyse automatisées. Cependant, en dépit du développement de capteurs à fine résolution spatiale et du raffinement des algorithmes de classification durant la dernière décennie (LANDGREBE, 1980; WHARTON, 1982; LEE *et al.*, 1987; TON *et al.*, 1991; GONG *et al.*, 1992), il existe une inconsistance chronique dans les résultats de classification qui conduit à une fiabilité peu élevée des cartes produites selon les normes d'exactitude et de précision exigées par la plupart des utilisateurs potentiels. Par exemple, en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance sur des images MSS, LATTY et HOFFER (1981) ont obtenu 23% d'exactitude de classification des peuplements mixtes, 32% dans le cas des zones arbustives, 88% pour des zones de coupe et 100% dans le cas de pâturages. Lors d'une classification multibande d'images SPOT, FRANKLIN et WILSON (1991) ont obtenu 13% d'exactitude pour des zones arbustives, 42% dans le cas de peuplements mixtes, 45% pour la toundra alpine, 81% pour des lacs et rivières, 92% pour des peuplements de conifères et 99% pour des tourbières. En conséquence, après 20 ans de recherche et de développement dans le domaine de la classification automatisée d'images de télédétection, les cartes produites par les méthodes traditionnelles de relevés de terrain et de photogrammétrie demeurent les documents standard dans la grande majorité des applications scientifiques.

L'hypothèse soulevée dans le cadre de cette étude pour expliquer l'inconsistance des résultats de classification automatisée est que les modèles d'acquisition et de classification couramment utilisés en télédétection ne tiennent pas compte des effets d'échelle et d'agrégation spatiale inhérents à tout processus d'échantillonnage et d'analyse de données à caractère spatial. Lorsqu'une grille d'échantillonnage est appliquée sur une région, comme c'est le cas lors de l'acquisition d'images numériques de télédétection, celle-ci se trouve arbitrairement découpée en un certain nombre de zones, de forme et de dimension fixes, à l'intérieur desquelles une mesure, supposée représentative de chaque zone, est acquise. Deux questions fondamentales se posent alors : quel est le nombre ainsi que la composition interne des zones qui représentent le plus adéquatement possible les entités géographiques d'intérêt qui composent la région à l'étude? Ces deux composantes correspondent respectivement à l'échelle et à l'agrégation spatiale. Devant l'absence de méthodes éprouvées pour estimer *a priori* ces deux variables, dans la plupart des cas, elles sont choisies en fonction des contraintes techniques particulières de l'étude en supposant qu'elles sont indépendantes des données ainsi recueillies de même que des résultats de leur analyse subséquente (OPENSHAW, 1984a).

Or, plusieurs recherches impliquant des données de type spatial, particulièrement dans le domaine de la géographie sociale et économique, révèlent que les résultats d'analyses statistiques peuvent être considérablement modifiés en changeant l'échelle et l'agrégation des données utilisées, soit au moment de leur acquisition ou lors de manipulations subséquentes. Une des premières illustrations du problème d'échelle est fournie par YULE et KENDALL (1950) dans une étude visant à montrer la corrélation entre des champs de blé et de pommes de terre en Angleterre. Ils obtiennent un coefficient de corrélation variant de 0,22 à 0,99 simplement en modifiant le nombre de zones représentant le secteur d'étude, d'abord divisé en 48 comtés progressivement combinés en 24, 12, 6 et 3 zones.

L'effet d'agrégation se manifeste lorsque des critères différents sont utilisés pour combiner des données spatiales afin de produire un nombre donné de zones. Afin de mesurer cet impact, OPENSHAW (1981) a appliqué différents critères, tels que égale surface, égale population,

égale densité, entropie spatiale et homogénéité intra-zone, pour partitionner l'État d'Iowa et mesurer le coefficient de corrélation entre le pourcentage de votes pour des candidats républicains et le pourcentage de la population âgée de plus de 60 ans. En formant six zones, les coefficients de corrélation obtenus varient entre 0,03 et 0,90 selon le critère de partition utilisé.

Des études semblables impliquant des analyses statistiques différentes, telles que l'analyse factorielle (OPENSHAW, 1984b) et la régression multiple (DUDLEY, 1991) corroborent la même conclusion : les résultats d'analyse basés sur des données spatiales arbitrairement définies par une grille d'échantillonnage modifiable à volonté peuvent être aléatoires et dépendent étroitement des unités spatiales utilisées. Puisque les images numériques de télédétection peuvent être définies comme un cas particulier d'acquisition de données spatiales arbitrairement délimitées par la résolution spatiale du capteur, une méthode expérimentale a donc été développée afin de vérifier si les effets d'échelle et d'agrégation ont des répercussions significatives sur le contenu des images spectrales et sur les résultats de classification.

2. Schéma expérimental

Les données utilisées, provenant du capteur aéroporté MEIS-II (Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner), ont été acquises au-dessus d'une portion d'environ 9 km² de la forêt expérimentale de Petawawa, en Ontario, centrée à 45°58'N, 77°25'O (MARCEAU *et al.*, 1992). Trois bandes spectrales présentant la meilleure qualité radiométrique ont été retenues, soit celle du vert (586,6 à 599,4 nm), du rouge lointain (703,3 à 719,0 nm) et du proche-IR (862,0 à 890,0 nm). Afin d'illustrer le changement d'échelle, ces images, d'une résolution spatiale originale de 3,7 m, ont été géométriquement corrigées et ré-échantillonnées à 5 m, 10 m, 20 m et 30 m à l'aide de l'algorithme d'interpolation de la convolution cubique disponible sur le système d'analyse d'images ARIES-III de Dipix. Trois schémas de classification, correspondant à trois niveaux d'agrégation successive, ont été définis à l'aide de données de référence provenant d'une carte forestière numérisée à l'échelle du 1:25 000 (tab. I).

L'effet d'échelle et d'agrégation spatiale a d'abord été évalué en calculant cinq statistiques descriptives sur des transects de niveaux de gris des images spectrales représentant chaque classe des trois niveaux d'agrégation, à chacune des quatre résolutions spatiales (tab. II). La première statistique est le test Wald-Wolfowitz, un test non paramétrique servant à mesurer la tendance au regroupement dans une séquence spatiale ordonnée de données. Une valeur

Tableau I. Schéma de classification correspondant à trois niveaux d'agrégation spatiale

Niveau I	Niveau II	Niveau III
Zones non-forestières	Zones non-forestières	Zones inondées Herbes et arbustes Plantations
Forêt naturelle	Feuillus Conifères Forêt mixte	Bouleaux (<i>Betula</i>) Érables (<i>Acer</i>) Peupliers (<i>Populus</i>) Épinettes (<i>Picea</i>) Pins (<i>Pinus</i>)

élevée traduit une tendance des données au regroupement spatial alors qu'une valeur faible signifie que les données fluctuent aléatoirement au-dessus et au-dessous d'une valeur centrale, en ce cas-ci la médiane (CONOVER, 1980). Les autres statistiques servent à caractériser la distribution de fréquences et sont : la moyenne, la variance, l'asymétrie et l'aplatissement.

Le second effet d'échelle et d'agrégation, résultant de combinaisons subséquentes des données à des fins d'analyse, est mesuré en effectuant une classification multibande des images à chacune des résolutions spatiales afin de générer les trois schémas de classification précédemment définis. Pour chacune des classifications, le critère choisi pour modifier la partition des données spectrales est la variance des pixels d'entraînement. Une méthode automatisée de sélection de pixels d'entraînement, basée sur des distances inter-centiles calculées sur chacune des bandes spectrales, a été développée afin de contrôler la variance des pixels représentant chacune des classes désirées (MARCEAU *et al.*, 1992; MARCEAU, 1992). Une distance inter-centile faible correspond à une variance peu élevée des pixels d'entraînement et réciproquement. Le classifieur utilisé est l'algorithme du maximum de vraisemblance. L'exactitude des classifications est mesurée par le coefficient de Kappa (FLEISS *et al.*, 1969) calculé sur des matrices de confusion générées à l'aide de pixels tests échantillonnés au hasard et de façon stratifiée sur la carte de référence numérisée. Ce coefficient tient compte de toutes les cellules de la matrice de confusion et élimine le pourcentage de bonne classification dû au hasard. Certains chercheurs ont suggéré qu'il soit adopté par la communauté scientifique en télédétection comme une mesure standard d'exactitude de classification (ROSENFELD and FITZPATRICK-LINS, 1986).

3. Présentation des résultats

Afin de limiter l'espace requis pour la présentation des résultats, seuls les exemples les plus représentatifs sont illustrés dans le présent article. Une description exhaustive, incluant les résultats du test d'hypothèse de différence significative appliqué aux coefficients de Kappa, se trouve dans MARCEAU (1992).

Tableau II. Nombre de pixels contenus dans les transects pour le calcul des statistiques

Rés. spatiale (m)	Plantation	Arbustes	Zone inondée	Pin (<i>Pinus</i>)	Épinette (<i>Picea</i>)	Peuplier (<i>Populus</i>)	Bouleau (<i>Betula</i>)	Érable (<i>Acer</i>)
5	660	425	70	816	276	353	230	206
10	323	210	39	407	143	176	118	100
20	162	104	22	201	73	90	58	50
30	106	56	15	129	52	61	38	34

Rés. spatiale (m)	Conifères	Feuillus	Forêt mixte	Zones non-forestières	Forêt naturelle
5	306	381	977	655	886
10	158	185	487	324	444
20	80	94	247	170	226
30	47	65	159	100	148

3.1. Impact du changement d'échelle et d'agrégation sur le contenu des données spectrales

À l'exception de la moyenne qui ne varie pas de façon significative (tab. III), les quatre autres statistiques sont grandement affectées par le changement d'échelle et d'agrégation des données spectrales. La valeur Z du test Wald-Wolfowitz tend à décroître lorsque la résolution spatiale décroît de 5 m à 30 m. L'effet est plus prononcé lorsque les types de couvert et d'utilisation du sol sont progressivement agrégés (fig. 1). Ainsi, pour la classe «*épinettes (Picea)*», au niveau d'agrégation III, la valeur Z obtenue pour la bande du proche-IR décroît de 9,1 (5 m) à 1,4 (30 m). Dans le cas de la classe «*conifères*», au niveau d'agrégation II, la valeur Z est de 10,9 à 5 m et diminue à 0,7 à 30 m. Au niveau d'agrégation I, pour la classe «*forêt naturelle*», la valeur varie de 19,0 (5 m) à 4,3 (30 m). Ces résultats traduisent une tendance des pixels adjacents à former des nuages de points à différentes positions sur l'image lorsque la résolution spatiale est fine. Au fur et à mesure que la résolution spatiale décroît, le détail spectral est progressivement agrégé et les valeurs de gris s'uniformisent sur l'ensemble du transect de l'image représentatif de chaque classe.

Tableau III. Valeurs de moyenne obtenues pour les niveaux d'agrégation II et I

Classes	Résolution spatiale (m)	Vert	Rouge lointain	Proche infrarouge
Conifères (Niveau II)	5	96,9	67,3	54,0
	10	95,8	66,7	51,5
	20	97,6	67,7	55,1
	30	97,2	67,3	53,3
Forêt mixte (Niveau II)	5	96,7	66,9	54,6
	10	97,8	67,0	55,4
	20	97,2	67,0	55,7
	30	97,6	67,0	55,0
Feuillus (Niveau II)	5	96,9	67,2	65,9
	10	96,6	67,2	66,3
	20	96,9	67,4	66,7
	30	95,1	66,2	63,2
Zones non-for. (Niveau I)	5	107,3	70,2	46,3
	10	109,7	71,3	46,7
	20	110,9	71,7	48,0
	30	112,1	72,3	50,3
Forêt naturelle (Niveau I)	5	97,4	67,3	56,8
	10	98,3	67,3	57,7
	20	98,3	67,6	58,7
	30	98,0	66,9	57,1

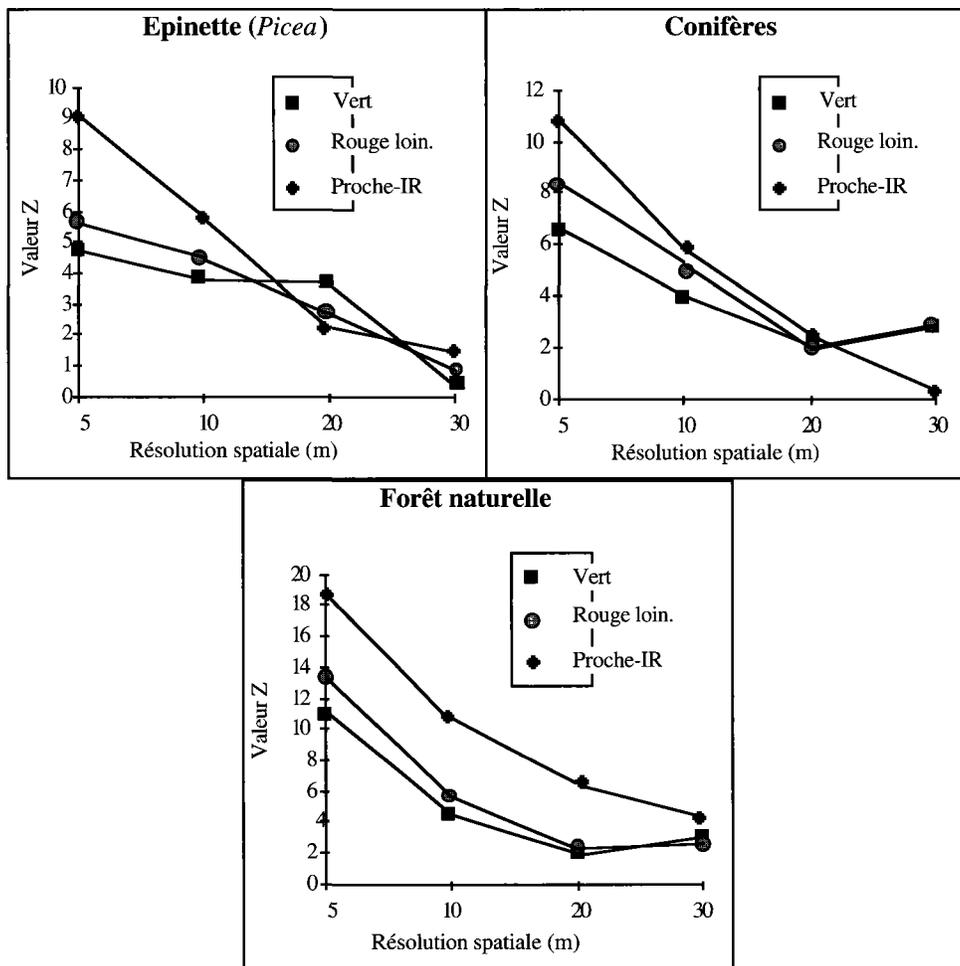


Figure 1. Résultats du test Wald-Wolfowitz pour les niveaux d'agrégation III, II et I

La variance est grandement affectée par le changement d'échelle et d'agrégation des classes, l'impact du premier apparaissant plus marqué que celui du second (fig. 2). Au niveau d'agrégation III, pour la bande du proche-IR, dans le cas de la classe «érables (*Acer*)», la variance décroît de 146,4 à 5 m à 52,8 à 30 m (un écart de 93,6). Pour la classe «feuillus», au niveau d'agrégation II, la variance décroît de 105,0 à 5 m à 69,3 à 30 m (un écart de 35,7). Au niveau d'agrégation I, pour la classe «forêt naturelle», la variance décroît de 150,3 à 5 m à 121,9 à 30 m (une différence de 28,4). Pour certaines classes, particulièrement dans la bande spectrale du vert, la variance ne décroît pas linéairement avec la résolution spatiale. Ce comportement est dû à l'utilisation de l'algorithme de la convolution cubique pour le ré-échantillonnage spatial des images. Il s'agit d'un algorithme d'interpolation qui ne produit pas une agrégation linéaire de la valeur des pixels et qui peut entraîner une fluctuation de la variance en fonction de la résolution spatiale.

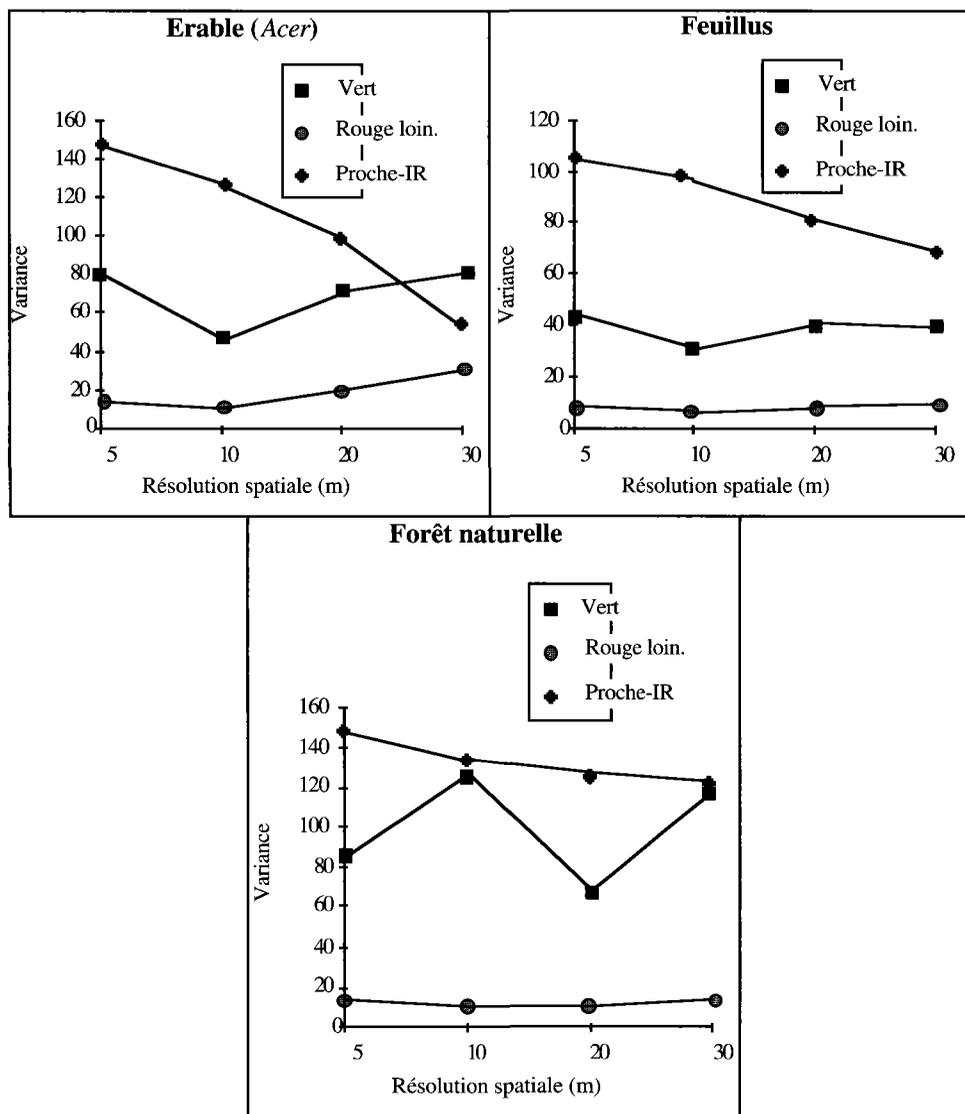


Figure 2. Valeurs de variance obtenues pour les niveaux d'agrégation III, II et I

Les valeurs d'asymétrie et d'aplatissement varient aussi considérablement en fonction de la résolution spatiale et du niveau d'agrégation (tab. IV). Un exemple est fourni par la classe «conifères» pour la bande du rouge lointain. La valeur d'asymétrie est négative à 5 m (-0,22) et positive à 30 m (1,73); la valeur d'aplatissement est faiblement négative à 5 m (-0,17) et fortement positive à 30 m (6,17). De tels changements vont à l'encontre de la prémisse de normalité de la plupart des algorithmes paramétriques de classification, incluant le maximum de vraisemblance, ce qui peut donc affecter la performance de l'algorithme.

Tableau IV. Valeurs d'asymétrie et d'aplatissement obtenues pour les niveaux d'agrégation II et I

Classes	Rés. spatiale (m)	Asymétrie			Aplatissement		
		Vert	Rouge lointain	Proche IR	Vert	Rouge lointain	Proche IR
Conifères (Niveau II)	5	-0,06	-0,22	0,42	0,06	-0,17	-0,57
	10	0,14	0,33	0,69	-0,06	0,42	0,18
	20	0,20	0,25	0,52	0,47	-0,39	0,13
	30	0,27	1,73	0,33	-0,27	6,17	-0,86
Forêt mixte (Niveau II)	5	2,26	1,29	0,27	13,15	4,41	-0,46
	10	4,58	0,96	0,28	35,28	2,52	-0,37
	20	1,20	0,56	0,29	3,96	0,82	-0,16
	30	2,34	0,46	0,09	8,96	0,17	-0,50
Feuillus (Niveau II)	5	-0,32	-0,20	-0,35	0,65	0,13	-0,06
	10	0,21	0,22	0,06	0,88	-0,27	0,11
	20	0,57	0,12	-0,35	0,79	0,44	-0,37
	30	0,19	0,46	0,03	0,43	1,16	-0,44
Zones non-for. (Niveau I)	5	2,07	1,32	-0,25	7,08	2,64	-0,44
	10	1,17	1,15	-0,05	2,05	2,20	-0,31
	20	0,77	0,62	-0,07	0,22	0,74	-0,22
	30	1,08	0,83	-0,48	1,72	0,93	-0,05
Forêt naturelle (Niveau I)	5	2,65	1,24	0,12	17,76	5,70	-0,67
	10	5,10	1,12	0,24	40,01	4,42	-0,68
	20	1,50	0,63	0,06	5,82	0,96	-0,42
	30	2,81	1,63	-0,04	11,55	7,84	-0,64

L'ensemble de ces résultats, particulièrement les valeurs de variance, permet d'affirmer que le contenu d'information des images spectrales est considérablement modifié selon l'échelle et l'agrégation des données originales. Cet effet se répercute sur les résultats de classification tel qu'illustré dans la prochaine section.

3.2. Impact du changement d'échelle et d'agrégation sur les résultats de classification multibande

L'impact du changement d'échelle est illustré par le meilleur résultat de classification obtenu par classe à chacune des résolutions spatiales. Au niveau d'agrégation III, quatre tendances sont apparentes (fig. 3). Pour la classe «herbes et arbustes», l'exactitude de la classification décroît avec la résolution spatiale variant de 0,38 à 5 m à 0,09 à 30 m. Les classes «plantations», «pins (*Pinus*)» et «bouleaux (*Betula*)» montrent une tendance opposée : l'exactitude de la classification augmente lorsque la résolution spatiale décroît. Ainsi, dans le premier cas, le coefficient de Kappa varie de 0,14 à 5 m à 0,25 à 30 m. La troisième tendance, illustrée par les classes «épinettes (*Picea*)» et «peupliers (*Populus*)», est une augmentation de

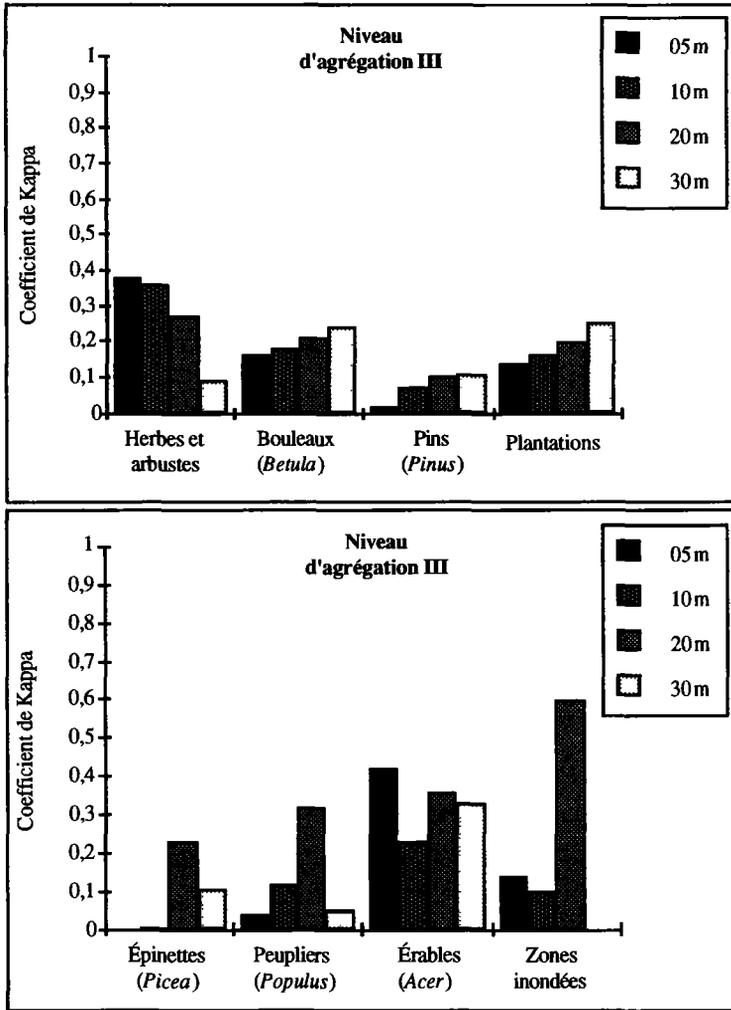


Figure 3. Impact de l'échelle, représentée par la résolution spatiale, sur les résultats de classification obtenus par classe pour le niveau d'agrégation III

l'exactitude de la classification en relation avec une décroissance de la résolution jusqu'à 20 m, suivie par une brusque diminution à 30 m. Le coefficient de Kappa obtenu pour cette deuxième classe est de 0,04 à 5 m; il augmente à 0,32 à 20 m et chute à 0,05 à 30 m. Finalement, les classes «érables (Acer)» et «zones inondées» sont grandement affectées par le changement d'échelle, mais ne montrent aucune tendance particulière. Il en est de même pour les classes des niveaux d'agrégation II et I (fig. 4 et 5). Ainsi, dans le cas de la classe «conifères», les résultats varient entre 0,26 (10 m) et 0,11 (30 m). Une observation intéressante concerne la catégorie «zones non forestières» où l'exactitude de la classification est considérablement supérieure lorsque quatre classes sont produites comparativement à deux classes seulement. Par exemple, à 5 m,

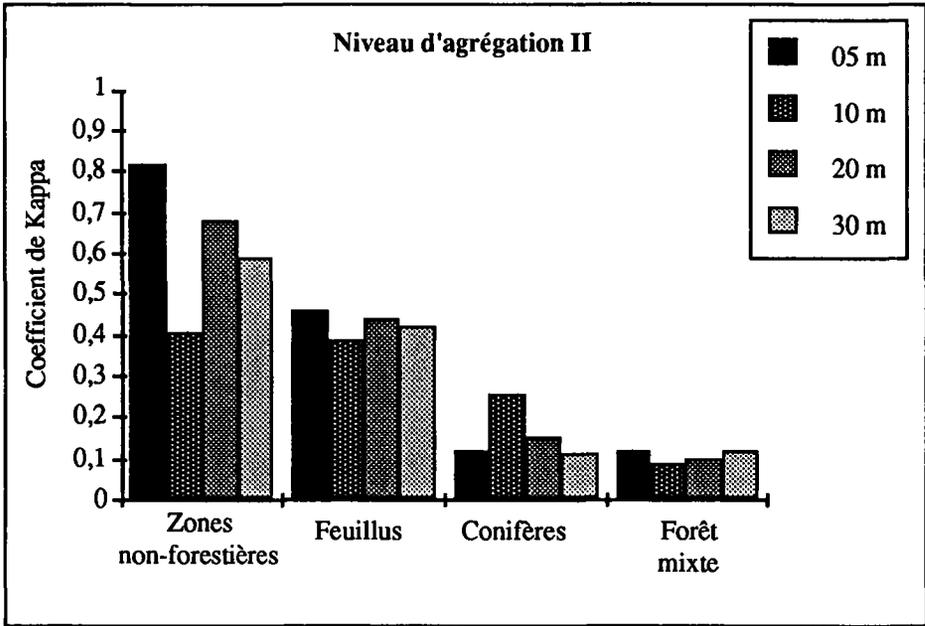


Figure 4. Impact de l'échelle, représentée par la résolution spatiale, sur les résultats de classification obtenus par classe pour le niveau d'agrégation II

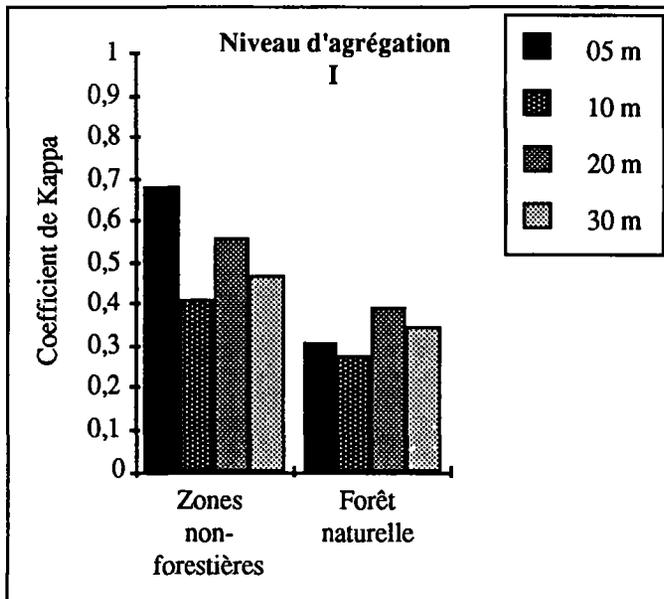


Figure 5. Impact de l'échelle, représentée par la résolution spatiale, sur les résultats de classification obtenus par classe pour le niveau d'agrégation I

le coefficient de Kappa atteint 0,82 au niveau d'agrégation II et diminue à 0,68 au niveau d'agrégation I.

La variance des pixels d'entraînement, représentée par la distance inter-centile et utilisée comme critère de partition des données spectrales lors de la classification, affecte aussi grandement les résultats de classification. Par exemple, au niveau d'agrégation III, à 20 m de résolution spatiale, deux tendances opposées sont manifestes (fig. 6). Pour les classes «zones inondées», «érables (*Acer*)» et «herbes et arbustes», l'exactitude de classification augmente considérablement lorsque la distance inter-centile est faible. Par exemple, dans le premier cas, le coefficient de Kappa varie de 0,07 pour une distance moyenne (0,38/0,62) à 0,61 pour une distance très faible (0,45/0,55). La seconde tendance est une diminution de l'exactitude de classification lorsque la distance inter-centile diminue illustrée par les classes «peupliers (*Populus*)» et «plantations». Dans le premier cas, le meilleur résultat est obtenu avec une distance inter-centile de 0,40/0,60 (0,32), alors que le coefficient de Kappa devient nul avec une distance de 0,42/0,58. Aux niveaux d'agrégation II et I, les résultats de classification varient moins abruptement en fonction de la distance inter-centile, mais plusieurs différences significatives sont manifestes. Par exemple, pour la classe «zones non forestières», le coefficient de Kappa est de 0,82 avec une distance inter-centile de 0,42/0,58 alors qu'il n'est que de 0,36 avec une distance de 0,36/0,64.

Ces résultats démontrent que l'exactitude de classification dépend étroitement de l'échelle et du critère utilisé pour l'agrégation des données spectrales. De plus, il n'existe pas une condition unique permettant d'obtenir la meilleure classification de chaque type de couvert et d'utilisation du sol à l'intérieur d'un schéma de classification. C'est une combinaison particulière de ces variables qui maximise la discrimination de chaque classe en fonction de ses caractéristiques spectrales et spatiales intrinsèques (tab. V).

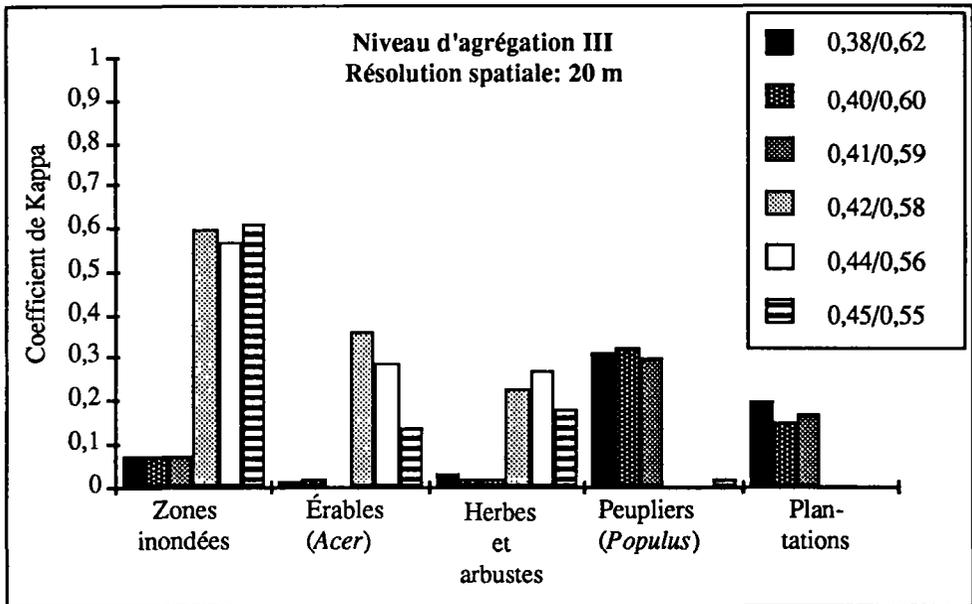


Figure 6. Impact de la variance interne des pixels d'entraînement, représentée par la distance inter-centile, sur les résultats de classification obtenus par classe au niveau d'agrégation III

Tableau V. Conditions pour obtenir l'exactitude de classification la plus élevée pour chacune des classes

Classes	Niveau d'agrég.	Résolution spatiale (m)	Distance inter-centile	Coefficient de Kappa
Zones inondées	III	20	0,45/0,55	0,60
Bouleaux (<i>Betula</i>)	III	30	0,36/0,64	0,24
Épinettes (<i>Picea</i>)	III	20	0,38/0,62	0,23
Érables (<i>Acer</i>)	III	5	0,42/0,58	0,42
Herbes et arbustes	III	5	0,42/0,58	0,38
Peupliers (<i>Populus</i>)	III	20	0,40/0,60	0,32
Plantations	III	30	0,43/0,57	0,25
Pins (<i>Pinus</i>)	III	30	0,45/0,55	0,11
Zones non forestières	II	5	0,42/0,58	0,82
Feuillus	II	5	0,44/0,56	0,46
Conifères	II	10	0,41/0,59	0,26
Forêt mixte	II	30	0,44/0,56	0,12
Forêt naturelle	I	20	0,31/0,69	0,39

Il est dès lors possible d'affirmer que l'inconsistance des résultats de classification d'images de télédétection est liée au fait que les concepts d'échelle et d'agrégation inhérents à toutes données de type spatial ne sont pas pris en considération lors de la cueillette et de l'analyse des images spectrales. En conséquence, l'exactitude de classification varie aléatoirement selon la résolution spatiale, le schéma de classification désigné et le critère de classification utilisé.

4. Discussion

Les modèles d'acquisition et de classification couramment utilisés en télédétection accordent très peu d'importance au concept d'espace. Cependant, il devient évident qu'une telle approche n'est pas adéquate puisque les données de télédétection sont recueillies et analysées dans l'espace géographique et que l'information qui peut en être extraite est intrinsèquement liée à l'échelle et au niveau d'agrégation de ces données. En conséquence, il est impératif de développer ce qu'il est convenu d'appeler une théorie spatiale en télédétection.

Développer une théorie spatiale consiste à recueillir et organiser de façon logique des observations concernant les propriétés spatiales permettant de définir les objets géographiques d'intérêt. Différentes études devraient être alors entreprises pour évaluer le contenu des images de télédétection à différentes résolutions en relation avec les caractéristiques spatiales des objets au sol.

Sur le plan méthodologique, puisque l'identification de différents objets géographiques requiert des échelles et des niveaux d'agrégation différents, l'approche conventionnelle en télédétection basée sur l'utilisation d'une résolution spatiale unique pour la classification de l'ensemble des composantes d'une scène devrait être abandonnée. Il est recommandé de développer ou d'améliorer de nouvelles approches de type hiérarchique, à échelles multiples, utilisant des règles de décision logiques combinant de l'information spectrale et spatiale.

5. Conclusion

À la recherche d'une explication théorique au problème de l'inconsistance chronique des résultats de classification automatisée d'images de télédétection, cette étude a démontré que l'échelle et l'agrégation spatiale des données ont un impact considérable sur le contenu des images et leur analyse subséquente en vue de discriminer différentes classes d'objets au sol.

Les valeurs de quatre statistiques descriptives, soit le test Wald-Wolfowitz, la variance, l'asymétrie et l'aplatissement, calculées sur des transects d'images, à 5 m, 10 m, 20 m et 30 m de résolution spatiale, représentant des types de couvert et d'utilisation du sol à trois niveaux d'agrégation sont grandement modifiées par le changement d'échelle et d'agrégation spatiale des données.

Les résultats de classification multibande de chaque classe varient aussi considérablement en fonction de la résolution spatiale des images et de la variance des pixels d'entraînement utilisée comme critère de partition des données spectrales. De plus, il n'existe pas une combinaison unique de ces variables permettant de maximiser l'exactitude de classification de l'ensemble des types de couvert et d'utilisation du sol compris à l'intérieur d'un même schéma de classification. Les résultats dépendent de la relation entre les caractéristiques spatiales des objets au sol à l'étude et de l'échelle et de l'agrégation des données de télédétection utilisées.

En conséquence, il est recommandé de développer une solide théorie spatiale en télédétection permettant de définir les objets géographiques à l'étude en tenant compte de leurs caractéristiques spatiales intrinsèques. Il est de plus suggéré d'améliorer les nouvelles approches d'analyse d'images utilisant des échelles multiples et des règles de décision logiques combinant de l'information spectrale et spatiale.

6. Références

- CONOVER, W. J. 1980. Practical nonparametric statistics. Wiley and Sons, 493 p.
- DUDLEY, G. 1991. Modifiable areal units and human geographical inquiry : an empirical investigation. Master Thesis, Department of Geography, University of Waterloo, 225 p.
- FLEISS, J. L., COHEN, J. and EVERITT, B. S. 1969. Large sample standard errors of Kappa and weighted Kappa. Psychological Bulletin, vol. 72, n° 5, p. 323-327.
- FRANKLIN, S. E. and WILSON, B. A. 1991. Vegetation mapping and change detection using SPOT MLA and Landsat imagery in Kluane National Park. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 1, p. 2-17.
- GONG, P., MARCEAU, D. J. and HOWARTH, P. J. 1992. A comparison of spatial feature extraction algorithms for land-use classification with SPOT HRV data. Remote Sensing of Environment, vol. 40, p. 137-151.
- LANDGREBE, D. A. 1980. The development of a spectral-spatial classifier for earth observational data. Pattern Recognition, vol. 12, p. 165-175.
- LATTY, R. S. and HOFFER, R. M. 1981. Computer-based classification accuracy due to the spatial resolution using per-point versus per-field classification techniques. Symposium of Machine Processing of Remotely Sensed Data, p. 384-392.

- LEE, T., RICHARDS, J. A. and SWAIN, P. H. 1987. Probabilistic and evidential approaches for multisource data analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-25, n° 3, p. 283-293.
- MARCEAU, D. J. 1992. The problem of scale and spatial aggregation in remote sensing : an empirical investigation using forestry data. Unpublished Ph. D. thesis, Department of Geography, University of Waterloo, 180 p.
- MARCEAU, D. J., HOWARTH, P. J. et GRATTON, D. J. 1992. Étude du contenu spectral et spatial d'images numériques et de l'impact sur la classification automatisée d'un couvert forestier. *in* DUBOIS, J. M. et BLASCO, F. (réd.). *Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux*. Les Presses de l'Université du Québec, p. 365-384.
- OPENSHAW, S. 1981. Le problème de l'agrégation spatiale en géographie. *L'Espace géographique*, n° 1, p. 15-24.
- OPENSHAW, S. 1984a. The modifiable areal unit problem. *Concepts and techniques in modern geography (CATMOG)*, n° 38, 40 p.
- OPENSHAW, S. 1984b. Ecological fallacies and the analysis of areal census data. *Environment and Planning A*, vol. 16, p. 17-31.
- ROSENFELD, G. H. and FITZPATRICK-LINS, K. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, n° 2, p. 223-227.
- TON, J., STICKLEN, J. and JAIN, A. K. 1991. Knowledge-based segmentation of Landsat images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, n° 2, p. 222-231.
- WHARTON, S. W. 1982. A contextual classification method for recognizing land use patterns in high resolution remotely sensed data. *Pattern Recognition*, vol. 15, n° 4, p. 317-324.
- YULE, G. U. and KENDALL, M. G. 1950. *An introduction to the theory of statistics*. Griffin, London.

28

Connexion directionnelle de contours

JEAN-FRANÇOIS PARROT* et HIND TAUD**

**Département de géotectonique, Université Paris VI, 4, place Jussieu, 75252 Paris, France, et ORSTOM, 70, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France*

***Université Paris VI et Laboratoire d'électronique et de traitement du signal, Université Mohammed V, rue Ibn Battouta, Rabat-Agdal, Maroc*

Résumé

La segmentation de contours élimine fréquemment des portions de contour créant des discontinuités plus ou moins importantes que la méthodologie proposée ici peut faire disparaître en connectant les extrémités des éléments de contours selon des critères directionnels. Les contours ainsi reconstitués peuvent être analysés dans leur intégralité par une méthode de reconnaissance de formes, réduisant d'autant le nombre d'éléments traités, ou bien fournir des documents où les traits structuraux ne présentent pas de discontinuités. Un suivi de contour préalable tient compte des croisements et produit des données relatives à la position de tous les pixels constituant chaque élément de contour. Le sens de la direction de chacune des extrémités est calculé en fonction de la position du pixel extrême et de celle d'un pixel voisin. La position relative du pixel voisin dépend de la distance choisie pour définir la direction. L'orientation de toutes les extrémités étant définie, chaque extrémité est jointe aux extrémités voisines comprises dans une distance donnée par un vecteur dont on calcule l'orientation. La connexion est effectuée si l'orientation de l'un de ces vecteurs est voisine de l'orientation de l'extrémité traitée. Les exemples choisis illustrent les possibilités offertes par l'algorithme dans l'étude des structures linéaires, des structures circulaires et des parcellaires.

1. Introduction

Les contours extraits à partir de données numériques par des méthodes classiques de segmentation de contours (ROSENFELD and KAK, 1982), sont généralement tronçonnés en éléments disjoints qu'il convient de connecter si l'on désire appréhender un contour dans sa quasi-intégralité.

Les algorithmes de reconstitution font souvent partie intégrante de la segmentation de contours (GONZALES and WINTZ, 1987). Ils sont généralement basés sur l'application de filtres et la combinaison des informations qu'ils fournissent, ou sur l'application de la transformée de Hough, et concernent des images multi-niveaux. Ils reconstituent les contours, mais ils présentent parfois l'inconvénient de laisser subsister des discontinuités qui limitent les possibilités d'analyse qu'offre la reconnaissance de formes.

La méthodologie que nous proposons reconstitue les contours en prenant en compte l'orientation des extrémités des éléments constitutifs d'un même contour. Elle est basée sur un suivi de contour entraînant une caractérisation de chacun des pixels constitutifs de ces éléments et sur un tri des extrémités susceptibles d'être connectées en fonction de critères définis par l'utilisateur.

2. Méthodologie

La méthode comprend : a) suivi et individualisation des différents éléments de contour et calcul de la direction des extrémités de chacun des éléments de contour; b) connexion directionnelle.

Avant de décrire l'algorithme, il convient de définir les termes et les concepts employés.

2.1. Concepts et définition

Un contour C ou un élément C' de ce contour est une courbe formée par une succession de pixels de connectivité 8, le passage d'un pixel à son voisin pouvant se faire selon 8 directions. Les courbes traitées sont formées par des éléments rectilignes de 1 à n pixels dont les extrémités ne se touchent que par leurs coins (fig. 1). Chaque contour C ou élément de contour C' est un ensemble L_s de points successifs P_t formant le contour.

$$L_s = \{ P_t = (x_t, y_t); t = 1, \dots, m \}$$

où x_t, y_t : coordonnées de chaque pixel
et m : nombre total de pixels de la courbe.

Extrémités $Ec(i)$ d'un élément de contour : les éléments du tableau L_s étant mis en ordre, depuis le début jusqu'à la fin de la courbe, les deux extrémités $Ec(i)$ d'un élément de contour C' correspondent respectivement au premier ou au dernier pixel du tableau L_s , à savoir les points P_1 et P_m de ce tableau. Les extrémités $Ec(i)$ rencontrées dans l'ensemble de l'image vont de $i = 1, \dots, q$, q étant le nombre total d'extrémités.

Segments terminaux : il s'agit de segments de courbe de $k+1$ pixels (k étant un entier défini par l'utilisateur), et dont les extrémités respectives sont P_1, P_{1+k} et P_m, P_{m-k} .

Direction $\theta(i)$ des extrémités : en considérant que la fin d'un segment terminal correspond à l'extrémité $Ec(i)$ à partir de laquelle il est défini, l'orientation $\theta(i)$ d'un segment terminal est définie par rapport à la direction des vecteurs $P_{1+k} P_1$ et $P_{m-k} P_m$. En fixant l'origine au nord

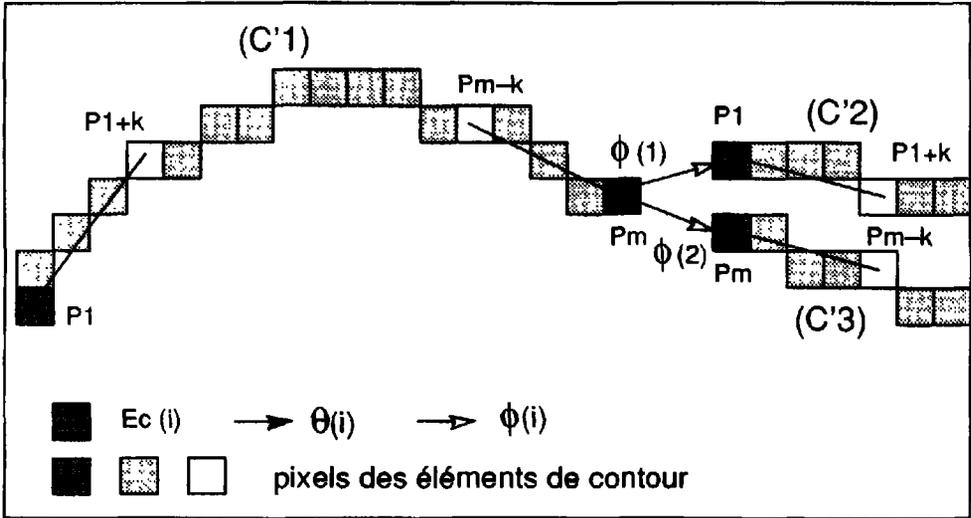


Figure 1. Exemple de connexion d'éléments de contour pour $\beta = 30$, $\lambda = 180$ et $\gamma = 0$; l'angle α défini par $\phi(2)$ étant plus petit que l'angle α défini par $\phi(1)$ entraîne la connexion des éléments (C'1) et (C'3)

de l'image, cette direction est calculée de 0° à 359° , dans le sens de la marche des aiguilles d'une montre. $\theta(i)$ est calculé à partir de $\text{Arctg}(\Delta y/\Delta x)$, Δx et Δy étant les différences respectives entre les coordonnées de deux extrémités d'un segment terminal $[P_{1+k}, P_1]$ ou $[P_{m-k}, P_m]$.

Direction $\phi(i,j)$: c'est la direction du vecteur joignant une extrémité $E_c(i)$ à une extrémité $E_c(j)$. Le calcul et le référentiel sont identiques à ceux définis pour la direction $\theta(i)$.

Écart angulaire β : c'est une valeur angulaire permettant de définir, pour chaque $E_c(i)$, un intervalle de sélection I_s .

Distance $D(i,j)$: c'est la distance entre deux extrémités $E_c(i)$ et $E_c(j)$ calculée par :

$$D(i,j) = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{1/2}$$

x_i , y_i et x_j , y_j étant les coordonnées respectives de ces deux extrémités.

Distance de sélection D_s : c'est la distance maximale définie par l'utilisateur fixant la limite pour connecter deux extrémités.

2.2. Procédure

Les traitements sont effectués sur une image binaire contenant l'ensemble des éléments de contour obtenus par diverses techniques de segmentation. Les portions de contour sont préalablement ramenées à des courbes de connectivité 8 (PARROT and TAUD, 1992). Des courbes répondant à ce critère peuvent par exemple être obtenues par l'algorithme de squelettisation proposé par O'GORMAN (1990), suivi par une élimination des pixels d'angle droit.

Les courbes sont individualisées une à une et une estimation de la direction de chacune des extrémités est faite, les éléments de courbe étant liés lorsque ces extrémités satisfont les critères requis. L'étape relative à l'individualisation reprend l'algorithme que nous avons développé (TAUD and PARROT, 1992; PARROT and TAUD, 1992) et dont le principe est succinctement rappelé.

2.2.1. Individualisation des contours et calcul de la direction des extrémités

Le suivi de contour par le mouvement d'une fenêtre glissante en codant le passage d'un pixel à l'autre selon 8 directions (FREEMAN, 1970) et l'application d'une décision lors d'un croisement de deux courbes, permettent d'individualiser une à une les courbes binaires rencontrées. Cet algorithme prend en compte aussi bien des courbes fermées que des courbes ouvertes. Par ailleurs, la prise de décision en cas de croisement s'appuie sur des conditions tenant compte des valeurs successives des codes de Freeman avant et après le croisement.

Lorsqu'une courbe est individualisée, les coordonnées des pixels sont provisoirement rapportées sur un tableau L_s à partir duquel sont effectués les calculs relatifs à la direction $\theta(i)$ des extrémités de la courbe (cf. ci-dessus). Notons que si le nombre de pixels d'un élément de contour C' est inférieur au nombre de pixels formant les segments terminaux, c'est-à-dire lorsque m est inférieur à $k+1$, cet élément est éliminé. Ceci présente l'avantage de nettoyer l'image en éliminant les pixels isolés et les petits éléments de contour. Par ailleurs, quand les coordonnées des extrémités $Ec(i)$ (P_1 et P_m) sont identiques, c'est-à-dire lorsque le contour est fermé, le calcul de la direction $\theta(i)$ des extrémités n'est pas effectué pour cet élément.

Les opérations de suivi de contour et les calculs des directions se poursuivent jusqu'à la dernière courbe que comprend l'image traitée.

À la fin de cette étape, on obtient un tableau T renfermant les q éléments retenus associant les positions $P(i)$ des extrémités et leurs orientations $\theta(i)$.

2.2.2. Connexion des extrémités

Les opérations concernant la connexion des extrémités s'appuient sur l'exploitation des données du tableau T , à savoir la position $P(i)$ des extrémités et la valeur en degrés de l'orientation $\theta(i)$ de ces extrémités.

Soit i allant de 1 à $q-1$, et j allant de $i+1$ à q , pour que deux extrémités $Ec(i)$ et $Ec(j)$ soient connectées, trois conditions doivent être remplies :

- condition 1 : $D(i,j) \leq D_s$, la distance $D(i,j)$ joignant deux extrémités doit être inférieure ou égale à la distance de sélection D_s ;

-condition 2 : $|\kappa(i,j) - \lambda| \leq \beta$, $\kappa(i,j)$ est l'angle décrit par les directions $\theta(i)$ et $\theta(j)$ et est calculé de la façon suivante : $\kappa(i,j) = |\theta(i) - \theta(j)|$, si $\kappa(i,j) \geq 180$, alors $\kappa(i,j) = |\kappa(i,j) - 360|$, λ peut prendre les valeurs 0, 90 ou 180 selon les cas à traiter (cf. plus loin);

-condition 3 : $|\alpha(i,j) - \gamma| \leq \beta$, l'angle $\alpha(i,j)$ est décrit par les directions $\theta(i)$ et $\phi(i,j)$, avec $\alpha(i,j) = |\theta(i) - \phi(i,j)|$, si $\alpha(i,j) \geq 180$, alors $\alpha(i,j) = |\alpha(i,j) - 360|$, γ peut prendre les valeurs 0 ou 90, voire d'autres valeurs (cf. plus loin).

Quand l'ensemble des données j a été traité, s'il existe parmi les extrémités $Ec(j)$ plusieurs candidats satisfaisant les trois conditions précédentes, seul est retenu celui dont la valeur $\alpha(i,j)$ est la plus faible. Ces extrémités $Ec(i)$ et $Ec(j)$ sont dans ce cas liées par une droite (fig. 1).

On passe ensuite à l'extrémité $Ec(i)$ suivante.

Cet algorithme général peut connecter différents types de contours. Quand il s'agit de joindre des éléments circulaires ou linéaires, la valeur λ est de 180, ce qui signifie que l'on compare la direction $\theta(i)$ à la direction correspondant au sens opposé de la direction $\theta(j)$, et la valeur γ est égale à 0, ce qui signifie que le vecteur $\phi(i,j)$ doit être plus ou moins dans le prolongement du vecteur $\theta(i)$, à l'écart angulaire β près. Dans le cas plus spécifique des parcellaires, les valeurs λ et γ diffèrent selon les cas de figure rencontrés.

2.3. Parcellaire

La jonction des contours dans le cas d'un parcellaire demande une adaptation spécifique de l'algorithme d'individualisation décrit précédemment, et comporte la prise en compte de plusieurs cas de connexion définis par les valeurs de λ et γ .

Si dans le cas général le suivi de contour prend une décision sur la direction à suivre en cas de croisement, ici le croisement est simplement considéré comme une extrémité de segment non soumise au calcul des paramètres caractéristiques des extrémités. Ainsi seules les «véritables» extrémités sont prises en compte.

On retrouve en fin d'individualisation un tableau T consignnant la position x,y des extrémités et leurs directions respectives.

La phase relative à la connexion des extrémités répertoriées obéit aux conditions suivantes :

- condition 1 : $D(i,j) \leq D_s$
- condition 2 : $|\kappa(i,j) - \lambda| \leq \beta$
- condition 3 : $|\alpha(i,j) - \gamma| \leq \beta$

Notons qu'il existe 5 cas de figure définissant les valeurs respectives de λ et γ pour des rectangles (fig. 2) :

1) connexion de deux extrémités de même sens :

$\lambda = 0$ et $\gamma = 90$, $\phi(i,j)$ étant perpendiculaire à $\theta(i)$; (fig. 2A);

2) connexion de deux extrémités perpendiculaires : il existe deux cas :

$\lambda = 90$ et $\gamma = 0$ quand $\phi(i,j)$ est dans le prolongement de $\theta(i)$; (fig. 2B);

$\lambda = 90$ et $\gamma = 90$ quand $\phi(i,j)$ est perpendiculaire à $\theta(i)$; (fig. 2C);

3) connexion de deux extrémités de sens opposé : il existe deux cas :

$\lambda = 180$ et $\gamma = 0$ quand $\phi(i,j)$ est dans le prolongement de $\theta(i)$; (fig. 2D);

$\lambda = 180$ et $\gamma = 90$ quand $\phi(i,j)$ est perpendiculaire à $\theta(i)$; (fig. 2E).

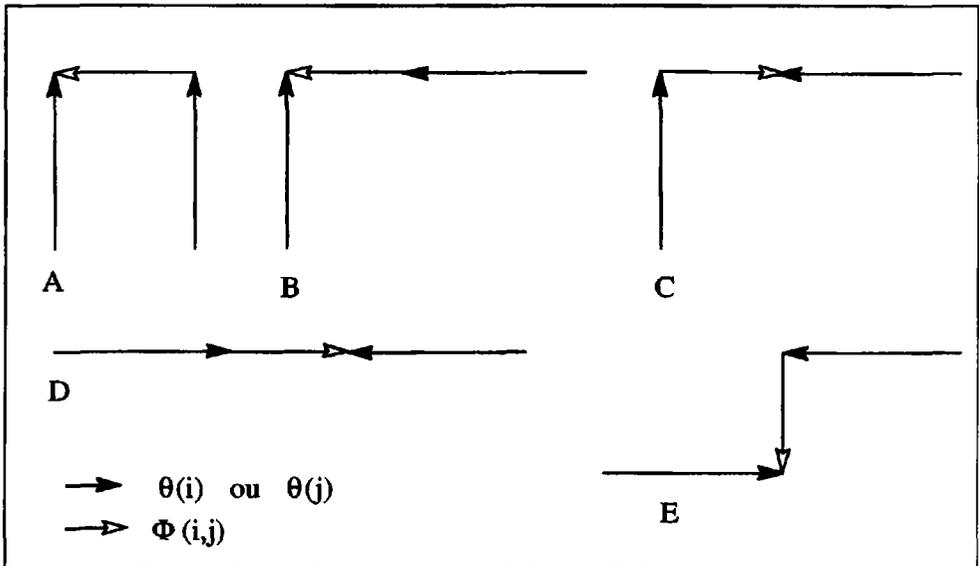


Figure 2. Les cinq cas de figure définissant les valeurs respectives de λ et γ pour des parcellaires rectangles : A) $\lambda = 0$, $\gamma = 90$; B) $\lambda = 90$ et $\gamma = 0$; C) $\lambda = 90$ et $\gamma = 90$; D) $\lambda = 180$ et $\gamma = 0$; E) $\lambda = 180$ et $\gamma = 90$

S'il existe plusieurs extrémités satisfaisant les trois conditions précédentes pour un même cas de figure, seule est retenue celle dont la valeur $\alpha(i,j)$ est la plus faible.

Notons que l'algorithme est applicable à des parallélogrammes en estimant la valeur des deux angles complémentaires qui définissent ces parallélogrammes, la valeur de γ fixée à 90 dans le cas des rectangles, prenant alors successivement la valeur de ces deux angles (par exemple 60 et 120).

3. Exemples de traitements

Les traitements destinés à illustrer les résultats fournis par la méthode ont été appliqués, dans un premier temps, à des images de courbes numérisées représentant des cas théoriques d'éléments de contour à connecter. Trois cas ont été retenus : des éléments de contours circulaires (fig. 3a et 3b), des éléments de contours linéaires (fig. 3c et 3d) et des éléments de contours formant un parcellaire (fig. 3e et 3f). Chaque couple de figures illustre les contours avant et après traitement.

Par ailleurs, la méthode a été également appliquée à des images de contours issues soit de données satellitaires, soit des produits dérivés de modèle numérique de terrain. Ces applications entrent dans le cadre d'étude thématique concernant des thèmes géomorphologiques et structuraux. L'exemple reporté dans cet article (fig. 4a et 4b) est issu d'une étude portant sur l'orientation d'éléments structuraux dans un ensemble dunaire à l'aide d'une technique de reconnaissance de formes (TAUD et PARROT, 1993).

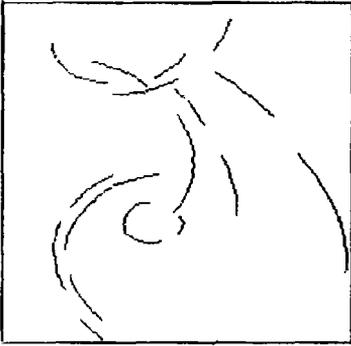
L'algorithme a été développé en Fortran 77 sur Domain HP Apollo, et figure dans le logiciel ADONIS (PARROT et TAUD, 1991). Le temps de calcul dépend du nombre de contours à traiter : à titre d'exemple, pour un traitement en mode graphique, quelques secondes sont nécessaires pour chacune des trois images numérisées de 200 x 200 pixels.

4. Discussion et conclusion

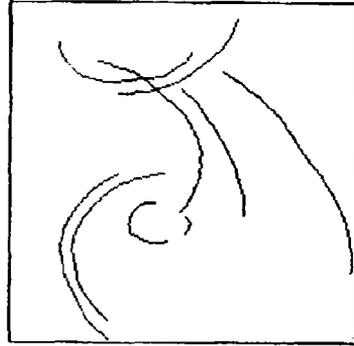
Les premiers résultats obtenus à l'aide de la méthodologie de connexion directionnelle se révèlent satisfaisants. Les éléments de contour sont connectés en fonction d'une distance entre extrémités et d'un écart angulaire entre la direction que présente l'extrémité d'un élément de contour et le vecteur joignant cette extrémité avec celles qui l'entourent. Cette distance D_s dite distance de sélection et la valeur de l'écart angulaire β sont définies par l'utilisateur, ce qui permet de modifier les critères de connexion, voire de réitérer le traitement sur l'image obtenue en modifiant ces critères.

Si cette procédure présente l'avantage de connecter les éléments de contour, en revanche elle s'appuie en partie sur des critères de sélection définis par le thématicien. La recherche d'une procédure non supervisée est envisageable, notamment pour la connexion des éléments circulaires et linéaires. Elle passe notamment par la définition automatique de l'écart angulaire β et du nombre k de pixels définissant la longueur d'un segment terminal.

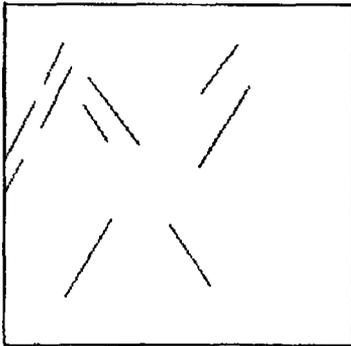
Par ailleurs, pour des contours non linéaires, quand la distance séparant deux extrémités est importante, la connexion par des segments de droite tend à détériorer la forme originale du contour. Il convient alors dans ce cas de diminuer la valeur attribuée à la distance de sélection D_s .



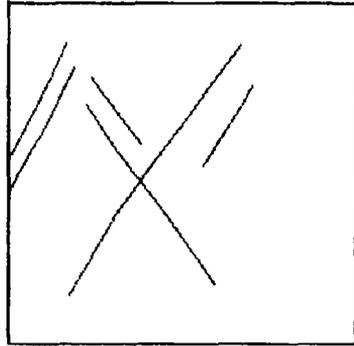
A



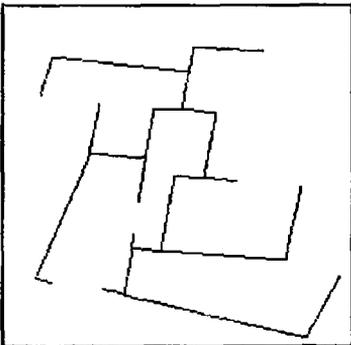
B



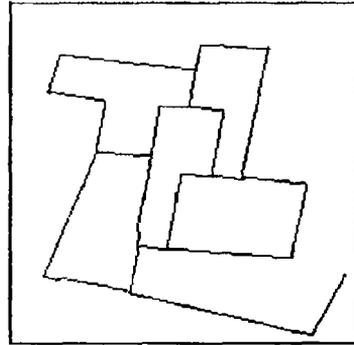
C



D



E



F

Figure 3. Trois exemples de connexion de contours. A et B : contours circulaires; C et D : contours linéaires; E et F : parcelaire illustrant tous les cas de figure

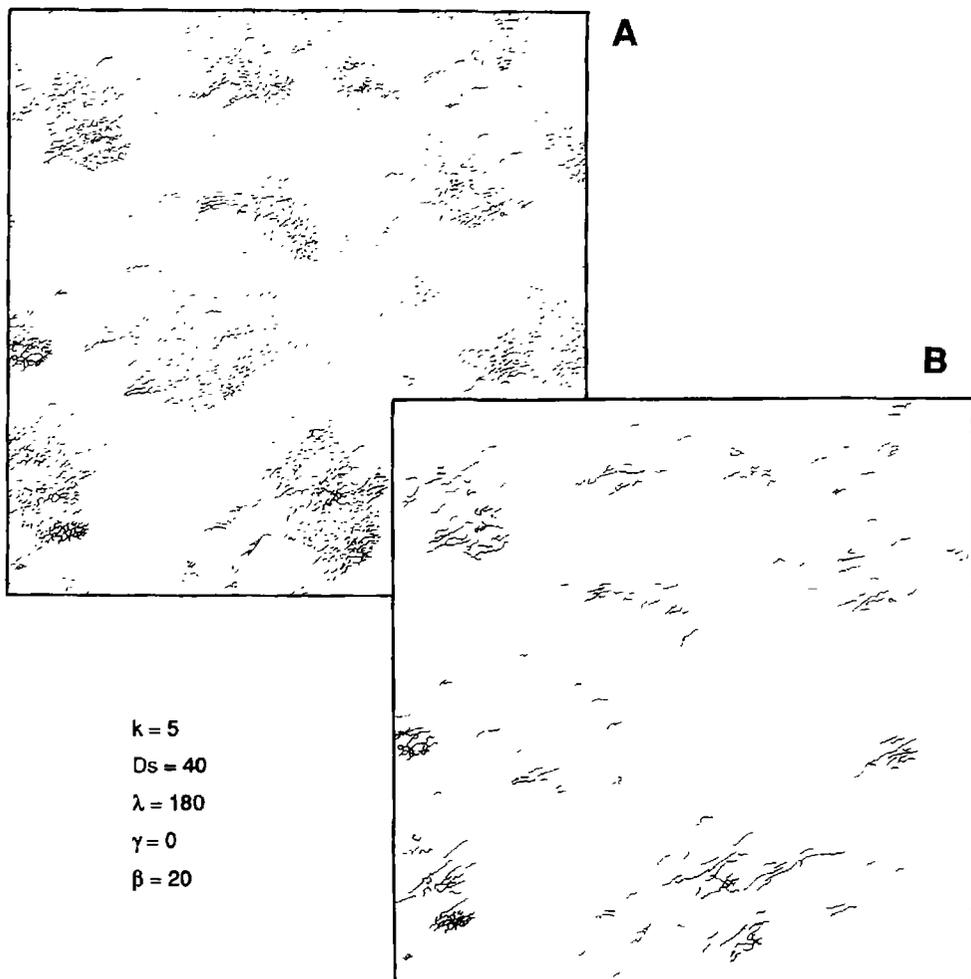


Figure 4. Exemple de connexion sur des contours provenant d'une image SPOT entrant dans le cadre de l'étude structurale du Grand Erg Occidental (tiré de TAUD et PARROT, 1992b)

La connexion directionnelle de contours représente une étape primordiale pour une étude faisant appel à la reconnaissance de formes. Dans le cas des parcellaires, elle ouvre par exemple la possibilité d'étudier statistiquement les surfaces définies par les contours fermés de chaque parcelle.

6. Références

FREEMAN, H. 1970. Boundary encoding and processing. *in* B. S. Lipkin and A. Rosenfeld (Eds.) *Picture processing and psychopictorics*, Academic Press, New York, p. 241-266.

- GONZALES, R. C. and WINTZ, P. 1987. Digital image processing. Addison-Wesley Publishing Compagny, 2nd edition, Reading, Massachussets, 523 p.
- O'GORMAN, L. 1990. K x K thinning. Computer vision, Graphics, and Image processing, n° 51, p. 195-215.
- PARROT, J.-F. et TAUD, H. 1991. Logiciel ADONIS (Automatic Detection Of Numerical Image Structures). Laboratoire de télédétection, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 62 p.
- PARROT, J.-F. and TAUD, H. 1992. Detection and classification of circular structures on SPOT images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, n° 5.
- ROSENFELD, A. and KAK, C. 1982. Digital picture processing. Academic Press, New-York/London, 2nd edition, 2 vol., 435 + 349 p.
- TAUD, H. and PARROT, J.-F. 1992. Detection of circular structures on satellite images. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, n° 2, p. 319-335.
- TAUD, H. et PARROT, J.-F. 1993. Reconnaissance de formes appliquée aux systèmes dunaires. *in* Dubois, J.-M., Cavayas, F. et Lafrance, P. Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Quatrième journées scientifiques du Réseau de télédétection de l'UREF, 21-23 octobre 1991, Montréal, Québec, Éditions AUPELF-UREF et Les Presses de l'Université du Québec.

29

Reconnaissance de formes appliquée aux systèmes dunaires

HIND TAUD* et JEAN-FRANÇOIS PARROT**

**Université Paris VI et Laboratoire d'électronique et de traitement du signal, Université Mohammed V, rue Ibn Battouta, Rabat-Agdal, Maroc*

***Département de géotectonique, Université Paris VI, 4, place Jussieu, 75252 Paris, France, et ORSTOM, 70, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France*

Résumé

Les données spectrales d'une sous-image HRV de SPOT centrée sur les massifs de dunes du Grand Erg Occidental (Algérie) ont été soumises à une méthode de reconnaissance automatique de formes, en vue de différencier et de caractériser les éléments constitutifs de ces massifs. Les massifs dunaires de la zone étudiée comprennent essentiellement de grands dômes de sables grossiers recouverts par de petites dunes à sable vif et par des dépressions sub-circulaires provenant de la déflation éolienne. La méthode ADONIS, récemment développée par les auteurs, a été adaptée pour répondre aux problèmes particuliers que présentait la zone d'étude. Cette méthode repose sur une étude de contours obtenus à partir des données spectrales et texturales; elle fournit, pour chacun de ces contours, des paramètres discriminants de «contour» et de «surface». L'analyse automatique de l'ensemble des paramètres discriminants montre que les formes circulaires dues à la déflation éolienne, sont caractérisées par des contours présentant une direction privilégiée de la normale à la corde vers le NNO. Les petites dunes à sable vif recouvrant les dômes dunaires sont orientées OSO-ENE.

1. Introduction

La méthode de reconnaissance automatique de formes ADONIS (Automatic Detection Of Numerical Image Structures) mise au point antérieurement (PARROT et TAUD, 1991 et 1992; TAUD et PARROT, 1991 et 1992) permet de détecter et d'analyser les structures sub-circulaires que comportent les images satellitaires à l'aide de paramètres discriminants. Différents thèmes ont déjà fait l'objet de son utilisation.

En vue de valider la méthode ADONIS par une nouvelle application, la présente étude porte sur une sous-image panchromatique HRV de SPOT centrée sur les massifs de dunes du Grand Erg Occidental (Algérie).

Les éléments d'information non subjectifs que fournit la méthode peuvent apporter à l'étude thématique de ces massifs dunaires des indications sur la forme et la nature des traits structuraux qui les caractérisent.

2. Zone d'étude et principales formations

La sous-image HRV étudiée (fig. 1) se situe dans le NE du Grand Erg Occidental localisé au NO du Sahara (fig. 2a). Cette région décrite par CALLOT (1991), localisée à l'ouest de Gardhia, ne comporte pas d'espaces interdunaires libres de sable et les grandes dunes sont constituées par des sables grossiers formant des dômes circulaires ou elliptiques (fig. 2b). Des dunes vives de sable fin se surimposent sur ces dômes; elles sont de petite dimension et présentent une forme de «sifs» (dune en forme de sabre); parfois jointives, elles constituent un «aklé» (groupement de dunes d'aspect réticulé). Les couloirs interdunaires présentent une couverture sableuse grossière modelée par des creusements dus à la déflation éolienne; ces «chaudrons» circulaires de dimension hectométrique sont nombreux et parfois jointifs; ils présentent une structure dissymétrique : leur versant nord étant toujours plus pentu que le versant sud.

3. Rappels sur la méthode ADONIS

La méthode ADONIS comporte trois étapes : a) une mise en évidence de contours significatifs sur l'image; b) la détection des centres et rayons des éléments sub-circulaires contenus dans ces contours; c) la recherche de paramètres discriminants associés à ces contours, voire à la surface décrite par ces contours.

3.1. Mise en évidence des contours significatifs

L'image des données brutes est traitée par un filtre passe-bas de taille 3 par 3 pixels réitéré jusqu'à la stabilité complète de l'image. Le seuillage des valeurs de l'histogramme de l'image lissée se fait à partir d'un seuil de réflectance variable de valeur N, tel que le nombre de pixels dont les valeurs sont inférieures ou égales à ce seuil corresponde à un pourcentage P du nombre total de pixels que comprend l'image entière. En incrémentant par exemple le pourcentage P de 10 en 10, on obtient 9 images binaires. Ces images binaires sont ensuite soumises à un

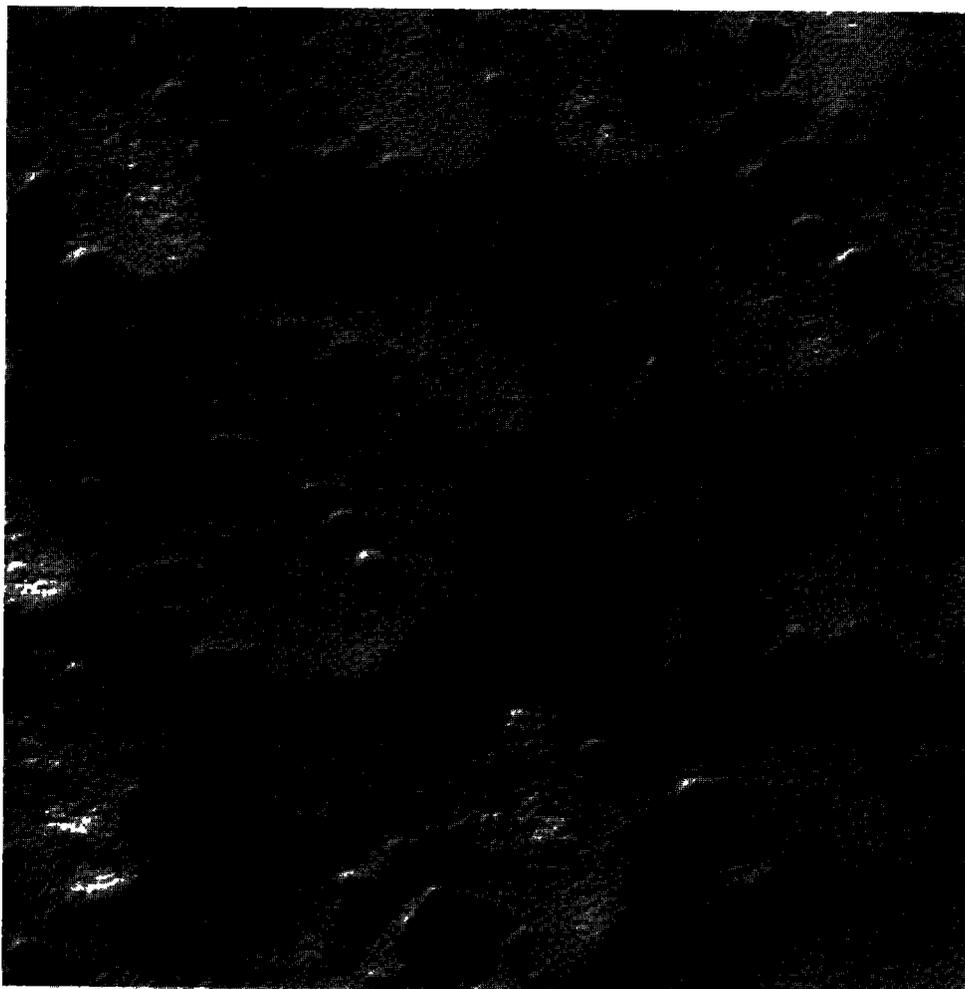
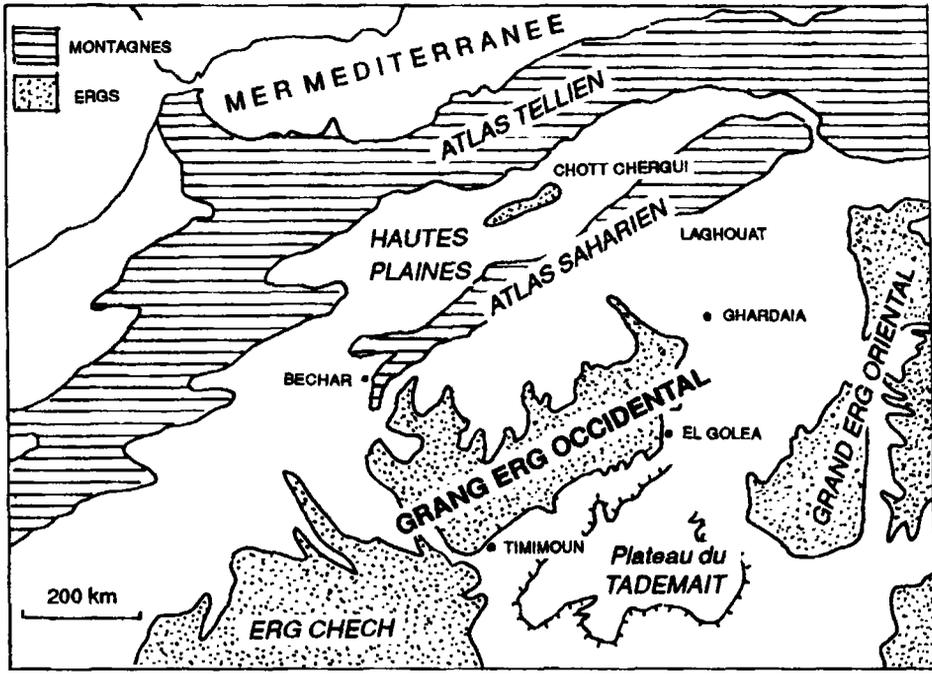


Figure 1. Sous-image panchromatique HRV de SPOT de la région étudiée (800 par 800 pixels)

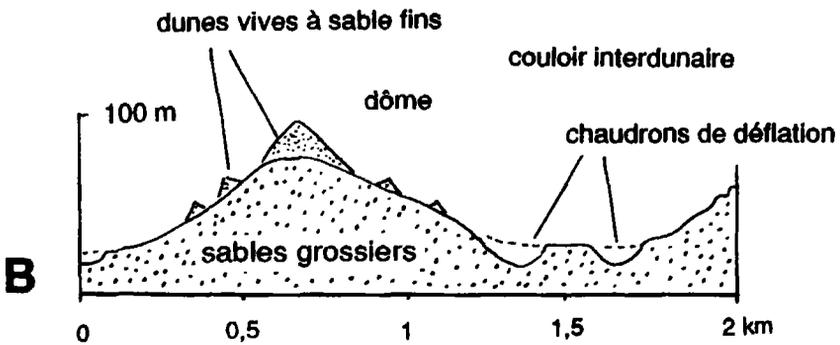
lissage majoritaire (GOLDBERG *et al.* 1975, *in* SCHOWENGERDT, 1983) réitéré jusqu'à stabilité complète de l'image. Enfin, les limites des différentes formes sont tracées en analysant les sauts de valeur entre deux pixels voisins.

3.2. Détection et individualisation des éléments sub-circulaires

C'est sur les contours définis précédemment que s'appliquent les différents stades de traitement que comporte la détection des éléments sub-circulaires. Les contours sont individualisés un à un par un suivi de contour basé sur le code de FREEMAN (1970). L'algorithme développé permet de prendre une décision sur la direction à suivre, lorsqu'un croisement se présente. Chaque contour est segmenté en éléments de contour lorsqu'un changement de direction de courbure aux points critiques du contour est observé.



A



B

Figure 2. Différentes formations dunaires du Grand Erg Occidental (tirée de CALLOT, 1991); a : carte schématique de la région; b : les deux types de formations

La détection des éléments sub-circulaires dans la méthode ADONIS est basée sur une version de la transformée de Hough. On obtient deux valeurs : la position du centre et la valeur du rayon, à partir desquelles est défini le cercle référentiel (CR). Une modification a été apportée dans cet article, entraînant un gain important en temps de calcul. L'approximation des éléments de contour en éléments circulaires est faite à partir de la méthode des moindres carrés (THOMAS and CHAN, 1989).

3.3. Paramètres discriminants

Des paramètres discriminants, décrivant la forme du contour et la nature de la surface inscrite, caractérisent chaque structure. L'analyse de ces paramètres permet de distinguer les différentes familles structurales.

Les paramètres de «surface» définis par les valeurs rencontrées dans les surfaces qu'engendrent les éléments sub-circulaires sur des plans de toute nature (données satellitaires, indices divers, produits dérivés du modèle numérique de terrain, etc.) ne sont pas utilisés dans le cas présent, et seuls les paramètres de «contour» suivants sont pris en compte :

R : rayon du cercle référentiel;

CI : coefficient d'intersection représentant le pourcentage qui définit l'appartenance des pixels du contour au cercle référentiel; plus ce coefficient est élevé, plus le contour décrit un cercle ou une portion de cercle parfait;

CC : le coefficient de corde appréhende la forme du contour qui peut être inférieure ou supérieure au demi-cercle;

DNC : coefficient de symétrie qui rend compte de la symétrie du contour par rapport à la normale à la corde passant par le centre du CR;

DIR : direction de la normale à la corde recoupant la structure détectée;

OCC : nombre de contours ayant des valeurs du rayon et du centre qui, dans un intervalle de confiance, peuvent correspondre à une même structure.

4. Application à la zone d'étude

La mise en évidence des éléments structuraux que comporte une image satellitaire dépend étroitement de la texture rencontrée. Les structures peuvent correspondre soit à des limites entre plages à luminance plus ou moins homogène, soit à des courbes de quelques pixels d'épaisseur pouvant aller, lorsqu'ils sont nombreux, jusqu'à former des plages à luminance hétérogène.

Sur l'image HRV panchromatique étudiée (fig. 1), les «chaudrons» dus à la déflation éolienne présentent des formes sub-circulaires dont les luminances exprimées en comptes numériques sont comprises entre 70 et 80 (pic à 76). Les dômes dunaires servant de substratum aux «sifs» dessinent des formes plus grandes et plus elliptiques de luminance moyenne plus élevée (80 à 110, pic à 104) et sont moins homogènes.

La procédure de mise en évidence des contours décrite dans la méthode ADONIS lisse l'image des données brutes par l'application d'un filtre itératif passe-bas qui rend homogènes les plages correspondant aux dômes dunaires et aux «chaudrons», et fait ainsi disparaître les traits structuraux que définissent les «sifs» recouvrant les dômes (fig. 3a).

La méthode ADONIS peut s'appliquer dans son intégralité à la recherche d'informations structurales sur les contours que décrivent les «chaudrons», voire les dômes dunaires.

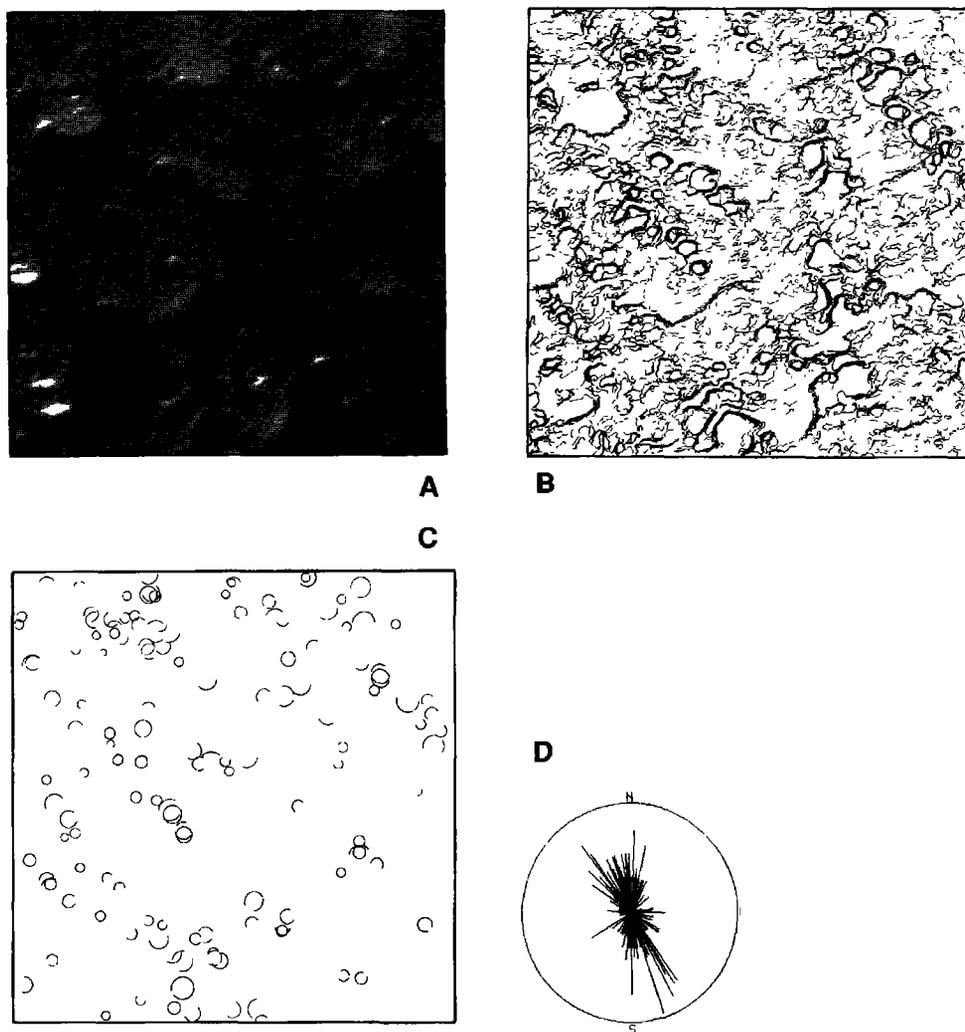


Figure 3. Traitements sur les «chaudrons»; a : résultat de l'itération d'un filtre passe-bas sur l'image; b : ensembles des structures détectées; c : sélection des structures semi-circulaires par les paramètres discriminants; d : rosace des directions des normales à la corde

En revanche, la mise en évidence des contours provenant des «sifs» nécessite un traitement spécifique. L'image est soumise à un opérateur de texture (HARALICK, 1979). L'image résultante est seuillée de manière à faire ressortir les traits structuraux correspondant à ces dunes vives (fig. 4a). L'image binaire est ensuite squelettisée et les éléments de contour obtenus sont connectés selon la méthode proposée par PARROT et TAUD (1993) en vue d'obtenir des contours significatifs (fig. 4b). Les autres étapes de la méthode ADONIS s'appliquent sans modification sur les contours ainsi obtenus.

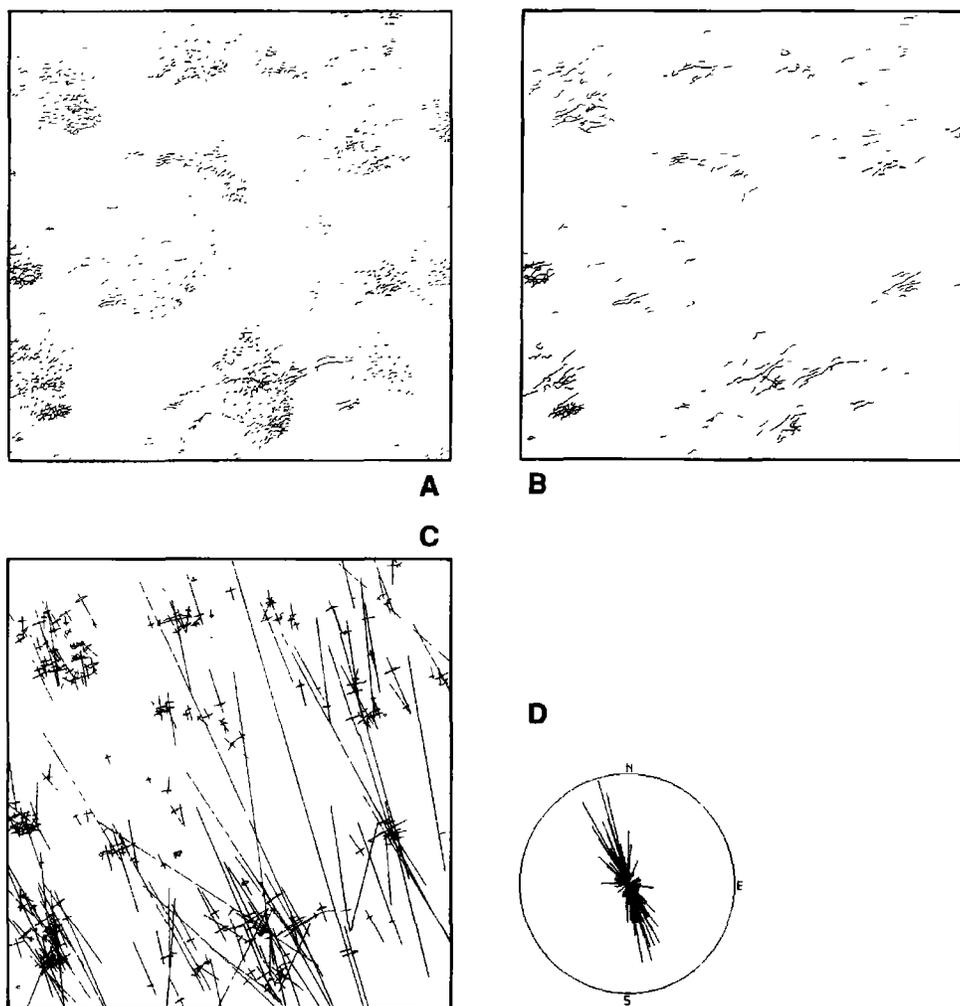


Figure 4. Traitements sur les «sifs»; a : application sur l'image d'un filtre d'Haralik; b : connexion des contours appliquée à l'image 3a; c : application de la méthode ADONIS, visualisation des contours, des cordes et des normales à la corde; d : rosace des directions des normales à la corde

5. Résultats et discussion

L'image des données brutes ayant été soumise à deux traitements différents de mise en évidence des contours, il convient de dissocier les résultats qu'entraîne l'application de la méthode ADONIS aux contours issus de ces traitements.

5.1. Contours des «chaudrons» et des dômes dunaires

Un ensemble de 3193 structures élémentaires est détecté (fig. 3b). Ce nombre relativement élevé provient d'une part du seuillage en 9 images binaires et d'autre part de l'irrégularité des contours scindés en de nombreux éléments par l'algorithme. Les traits structuraux recherchés sont triés, à partir de cet ensemble, à l'aide des paramètres discriminants décrits ci-dessus.

5.1.1. Les «chaudrons»

Les «chaudrons» de déflation ont un rayon compris entre 50 et 200 mètres, soit à l'échelle HRV panchromatique entre 5 et 20 pixels et la forme de la courbe que dessine leur bord est régulière et sub-symétrique. Par ailleurs, la différence de luminance entre les «chaudrons» et leur environnement étant importante, les plages correspondant aux «chaudrons» se maintiennent sans grande modification de forme sur plusieurs des 9 images binaires. On peut ainsi utiliser la notion d'occurrence OCC en fixant l'intervalle de confiance à 5. La recherche des «chaudrons» à partir de leurs contours utilise les paramètres discriminants suivants :

- rayon R : 5-20;
- coefficient d'intersection CI : 20-100;
- coefficient de symétrie DNC : 0-30;
- occurrence OCC : ≥ 3 .

168 structures semi-circulaires répondant aux critères ci-dessus sont détectées (fig. 3c). La rosace des directions des normales à la corde des arcs de cercle (fig. 3d) dessine un axe NNE-SSO présentant une direction privilégiée vers le NNE traduisant la dissymétrie des zones de déflation éolienne.

5.1.2. Les dômes

Les dômes décrivent des structures circulaires de grand rayon ($R \geq 50$). Toutefois, la nature irrégulière de leurs contours avant et après lissage, ne permet pas de détecter des limites continues et représentatives de ces dômes. Les contours ayant un rayon de plus de 50 pixels ne mettent en fait en évidence que les limites des couloirs inter-dunaires.

5.2. Contours provenant des sifs

Pour les sifs, 276 structures sont mises en évidence sur l'image binaire des contours. Ces structures ainsi que les normales à la corde sont reportées sur la figure 4c. Le nombre relativement faible de ces structures s'explique par la difficulté à faire ressortir ces formes, par l'absence de redoublement éventuel des structures consécutif au seuillage en tranches de luminance utilisé dans le cas des chaudrons, et par le nettoyage qu'opère la connexion directionnelle.

Dans ce cas, la rosace des directions de la normale à la corde (fig. 4d) met en relief l'orientation OSO-ENE des sifs, peu de sifs présentant une orientation différente. La direction des normales à la corde est donc similaire à celle qu'indiquent les «chaudrons».

6. Conclusion

La détection automatique des traits structuraux sur une sous-image HRV de 800 par 800 pixels couvrant une partie de la région NE du Grand Erg Occidental, met en évidence l'orientation

privéligiée que présentent les deux différents types de formation rencontrés. Les résultats obtenus soulignent la similitude de ces directions, et apportent au thématicien un élément d'information non supervisé permettant de tracer l'esquisse structurale de la région, voire de définir les facteurs génétiques.

7. Remerciements

Ce travail représente une partie des résultats acquis lors du stage effectué au Laboratoire de géologie géomorphologie structurale et télédétection, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, dans le cadre de la bourse d'excellence de l'UREF attribuée à Hind Taud. Par ailleurs, nous remercions Monsieur Yan Callot qui a bien voulu nous fournir l'image sur laquelle nous avons testé la méthode, en vue d'élargir ultérieurement la région étudiée dans le cadre d'une recherche thématique couvrant l'Erg Occidental et associant Messieurs Y. Callot (Paris VI), A. Simonin (Imagéo) et Madame C. Méring (ORSTOM).

8. Références

- CALLOT, Y. 1991. Histoire d'un massif de dunes, le Grand Erg Occidental (Algérie). *Sécheresse*, n° 2, p. 26-39.
- FREEMAN, H. 1970. Boundary encoding and processing. *in* B. S. Lipkin and A. Rosenfeld (eds.) *Picture processing and Psychopictorics*. Academic Press, New York, p. 241-266.
- HARALICK, R. M. 1979. Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, n° 5, p. 786-804.
- PARROT, J.-F. et TAUD, H. 1991. Logiciel ADONIS (Automatic Detection Of Numerical Image Structures). Laboratoire de télédétection, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 62 p.
- PARROT, J.-F. and TAUD, H. 1992. Detection and classification of circular structures on SPOT images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n° 5.
- PARROT, J.-F. et TAUD, H. 1993. Connexion directionnelle de contours. *in* Dubois, J.-M., Cavayas, F. et Lafrance, P. *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*. Quatrième journées scientifiques du Réseau de télédétection de l'UREF, 21-23 octobre 1991, Montréal, Québec, Éditions AUPELF-UREF et Les Presses de l'Université du Québec.
- SCHOWENGERDT, R. A. 1983. *Techniques for image processing and classification in Remote Sensing*. Academic Press, London/New-York, 249 p.
- TAUD, H. et PARROT, J.-F. 1991. Analyse numérique des formes sub-circulaires sur les images satellitaires. *in* *Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales*, 2^{es} Journées de télédétection, Bondy, Éditions de l'ORSTOM, Collection Colloques et séminaires, Paris, p. 293-329.
- TAUD, H. and PARROT, J.-F. 1992. Detection of circular structures on satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n° 2, p. 319-335.
- THOMAS, S. M. and CHAN, Y. T. 1989. A simple approach for the estimation of circular arc center and its radius. *Computer Vision, Graphics and Images Processing*, n° 45, p. 362-370.

30

Apport de l'imagerie satellitaire et d'un modèle numérique de terrain à l'étude géomorphologique de la dépression d'Aubel, Pays de Herve, Belgique

LUC WILLEMS*, JEAN-PAUL DONNAY**, MARC BINARD**, PHILIPPE
TREFOIS*** et ANDRÉ OZER*

**Géomorphologie et géologie du Quaternaire, Université de Liège, 7, place du 20-Août,
4000 Liège, Belgique; téléphone : (32) 41-66-54-46; télécopieur : (32) 41-66-57-00*

***SURFACES, Université de Liège, 7, place du 20-Août (B. A1-12), 4000 Liège,
Belgique; téléphone : (32) 41-66-54-24; télécopieur : (32) 41-66-56-93*

****Département de géologie et minéralogie, Musée royal de l'Afrique Centrale,
Leuvensesteenweg, 13, 3080 Tervuren, Belgique; téléphone : (32) 2-769-54-53;
télécopieur : (32) 2-767-02-42*

Résumé

À une douzaine de kilomètres à l'est de Liège (Belgique), s'ouvre une dépression subcirculaire d'environ 8 km de diamètre dont la genèse pose toujours une énigme. Le développement des techniques liées aux traitements d'images satellitaires et aux modèles numériques de terrain a permis d'envisager ce phénomène sous un nouvel angle et d'en faire ressortir des éléments jusqu'alors peu apparents par les études géomorphologiques traditionnelles (terrain, photo-interprétation, etc.). Il apparaît ainsi que la dépression d'Aubel semble associée à deux séries de linéaments, l'une parallèle aux failles du graben du Rhin, et l'autre aux fractures hercyniennes.

1. Introduction

Située à une douzaine de kilomètres à l'est de Liège, la dépression d'Aubel s'ouvre au coeur du Pays de Herve (Belgique) (fig. 1). Cette forme d'aspect circulaire de près de 8 kilomètres de diamètre se développe principalement dans des terrains du Crétacé constitués de couches sableuses, argileuses, gréseuses et crayeuses subhorizontales. Dégagés par l'érosion, les terrains paléozoïques sous-jacents, constitués principalement de grès, de psammites et de schistes du Houiller, n'apparaissent qu'au coeur de cette dépression, formant un vaste nez synclinal d'orientation SO-NE. Une barre de grès dévonien borde le bord occidental de ce synclinal et marque l'exutoire de la dépression. Les sables tertiaires datant de la transgression oligocène sont absents à l'intérieur de celle-ci, ce qui semble indiquer une genèse néogène, et ils ne se retrouvent que sur ses pourtours, dans des poches résiduelles.

Morphologiquement, la dépression d'Aubel présente un fond se situant à une altitude moyenne de 220 m (160 m pour son point le plus bas) alors que ses bordures culminent entre 260 et 355 m (Hospice de Beloeil). Bien délimitée au nord et à l'est, la dépression présente des versants dont les pentes sont souvent supérieures à 15% et se développent principalement dans les craies. La bordure méridionale est moins précise dans le paysage. Beaucoup plus découpée, elle présente des pentes souvent plus faibles.

Plusieurs hypothèses ont été envisagées quant à l'origine de cette dépression, à savoir la possibilité d'un impact météoritique, la trace d'un pli diapire ou encore une conjonction de failles (WILLEMS, 1990).

Des dépôts consécutifs à un impact (roches métamorphisées, vitrifiées) ainsi que des perturbations qui en résulteraient dans les différentes roches en place (fractures chaotiques nombreuses) ne se retrouvent pas sur le terrain et ne sont mentionnés par aucun auteur dans la littérature pourtant abondante sur cette région.

L'hypothèse du pli diapire ne présente guère plus d'arguments. Des dépôts tels que l'anhydrite pourraient se localiser sous les terrains houillers, dans les calcaires viséens (comme, par exemple, à Mons Saint-Gishlain, dans l'ouest de la Belgique). Or, ces calcaires ont leur limite d'extension dans la partie orientale de la dépression et ne se retrouvent pas plus à l'ouest.

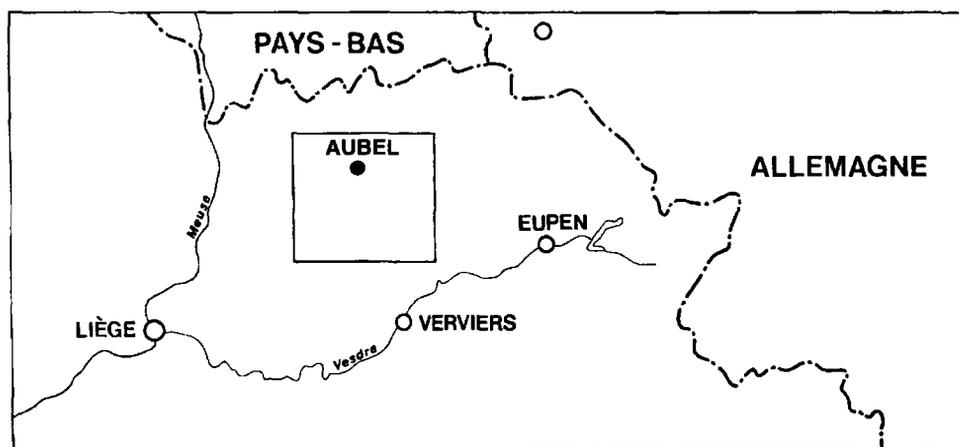


Figure 1. Localisation de la zone étudiée : dépression d'Aubel (Belgique)

À l'heure actuelle, l'inexistence de sondages géologiques bien localisés ainsi que l'absence de dépôts particuliers associés à un éventuel impact posent dès lors un problème face à une approche «traditionnelle» de l'étude géomorphologique.

Les techniques informatiques associées à l'imagerie satellitaire ainsi que celles liées à la création et l'exploitation de modèles numériques de terrain permettent d'apporter un ensemble d'éléments nouveaux à l'étude de formes énigmatiques telles que la dépression d'Aubel. La souplesse relative d'utilisation de ces moyens et les documents qui peuvent en être issus présentent trois avantages.

Le premier réside dans la souplesse de variation des échelles des différents documents, autorisant une vision à la fois globale et précise des faits à observer. L'imagerie satellitaire, dans sa limite de résolution-sol, permet notamment de mettre en évidence de grandes séries de linéaments parcourant l'ensemble du Pays de Herve mais également d'en préciser les tracés dans la dépression.

Le modèle numérique de terrain (M.N.T.), créé à partir d'une numérisation des isohypses, permet quant à lui, de mieux percevoir l'étendue du phénomène étudié et d'en faire ressortir des composantes structurales qui n'apparaissent que très difficilement sur le terrain ainsi que sur la carte topographique de base.

Enfin, le troisième avantage de ce type d'investigation réside surtout dans la perception de phénomènes localisés en zone de couvertures superficielles et végétales importantes, telles qu'on en rencontre souvent dans les régions tempérées, masquant souvent un grand nombre d'informations importantes peu visibles sur le terrain.

2. Matériel et méthodes

L'étude réalisée a comporté, outre une recherche traditionnelle sur le terrain et une étude par photographies aériennes, trois autres phases.

La première a consisté en la création des produits du M.N.T. sous le logiciel «Gipsy» (DONNAY, 1988; DONNAY et BINARD, 1993) pour la zone de la dépression d'Aubel. Pour ce faire, l'utilisation de la carte au 1:25 000 pour la numérisation était la plus appropriée, à la fois pour une question d'échelle du phénomène étudié et aussi pour une question de résolution propre au M.N.T. La saisie par numérisation de deux courbes de niveau trop rapprochées peut être confondue lors du passage à une grille de points. Le M.N.T. est réalisé au départ d'isohypses équidistantes de 10 m ainsi que des courbes de niveau sommitales. Afin de ne pas tronquer les bordures de la zone étudiée, cette numérisation englobe une région un peu plus grande que la dépression. L'application d'une «fenêtre» permet de ne retenir que les informations du territoire examiné (fig. 2).

Un fichier-image est ainsi constitué et peut être manipulé afin d'obtenir toute une série de sous-produits dont les principaux sont : une carte des gradients de pentes, une carte d'orientation des pentes, un estompage du relief, une carte des altitudes et des blocs-diagrammes.

La seconde phase d'étude fut la création de documents à partir de l'image satellitaire. Les données utilisées proviennent des canaux 3, 4, 5, 6 et 7 du «Thematic Mapper» (TM) de Landsat 5.

La troisième et dernière phase consista en la comparaison des documents obtenus par le M.N.T. et ceux réalisés à partir des données satellitaires.

3. Les résultats du M.N.T.

L'image du relief estompé (fig. 3) rend une impression de relief par une source d'éclairage artificiel qui serait placée à 45° au-dessus de l'horizon, au nord-ouest de la zone étudiée.

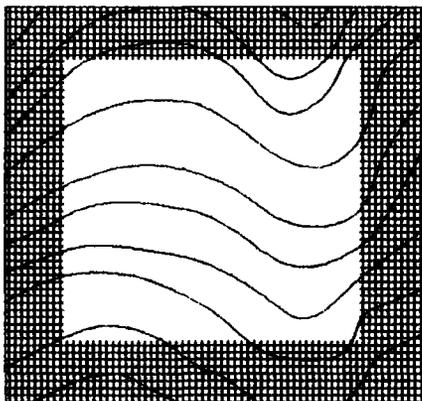


Figure 2. Application d'une fenêtre sur un secteur dont les isohypses sont numérisés; le quadrillage représente la zone numérisée mais n'apparaissant pas dans l'image; les lignes courbes représentent les isohypses



Figure 3. Dépression d'Aubel : modèle numérique de terrain estompé

Ce document permet une meilleure perception de la dépression, soulignant bien ses bordures et faisant apparaître toute une série de linéations principalement NE-SO qui correspondent à une série de vallons peu marqués.

L'image des gradients de pente (fig. 30-4, voir cahier couleur) souligne surtout les bords de la dépression, mettant les versants relativement raides en évidence. Il fait également apparaître l'aspect irrégulier du fond de la cuvette, relativement homogène pour deux tiers mais dont la partie sud-ouest est plus découpée et occupée par une crête secondaire SE-NO.

L'image de l'orientation des pentes (fig. 30-5, voir cahier couleur) révèle des éléments morfo-structuraux peu visibles sur les autres documents et permet une plus nette délimitation de la dépression d'Aubel. Cette dernière apparaît bien fermée tant au nord qu'à l'est mais s'ouvre largement vers l'ouest. De plus, elle se différencie bien par rapport aux régions environnantes. La dépression peut être délimitée en zones présentant des aspects de pente différents : une première située dans la partie orientale (1) et occupée par des linéaments NO-SE, une seconde (2) dans la partie sud-occidentale présentant des linéations SSE-NNO secondaires (vallons) se rattachant à deux linéations NO-SE de plus grande importance (crête secondaire occupant le fond de la dépression). Enfin, la troisième zone (3) occupe la partie nord-ouest et est caractérisée par des orientations NO-SE peu marquées. Au nord-est de la dépression (4) s'observe une quatrième orientation, NNE-SSO, qui correspondrait à la structure condrusienne sous-jacente et qui se marque par l'intermédiaire des vallons secondaires mentionnés précédemment. Séparée nettement par une limite ONO-ESE, la zone méridionale (5) de l'image est également toute différente de l'aspect interne de la dépression : quelques linéaments NNE-SSO se marquent encore, mais en moindre importance et une structure NO-SE apparaît sous-jacente mais atténuée. L'érosion à l'intérieur de la dépression l'aurait peut-être dégagée, la mettant ainsi plus en évidence.

4. L'apport des documents satellitaires

Un des buts de départ pour la constitution de ces documents était la recherche de linéaments difficilement identifiables dans des terrains à couvertures superficielles et végétales importantes.

L'interprétation de l'image issue du canal TM6 (infrarouge thermique) superposée à une carte synthétique des fractures connues nous a permis de poursuivre le tracé de certaines failles qui ne sont connues que très fragmentairement dans cette région. En effet, les différences de température entre adret et ubac sont mises en évidence, et soulignent certains vallons rectilignes malgré la faible résolution satellitaire du canal utilisé (120 m).

Un des principaux résultats est de confirmer que l'ensemble du Pays de Herve est occupé par un réseau de failles NO-SE qui peut être associé au graben du Rhin situé au nord-est du site étudié.

La réalisation d'une composition colorée R.V.B. (rouge, vert, bleu) (fig. 30-6, voir cahier couleur) réalisée à partir des canaux 4, 5 et 7, enregistrant plusieurs gammes d'infrarouge, permet d'affiner l'analyse de la dépression. Ces canaux, fortement influencés par la teneur en eau des sols et la turgescence de la végétation, permettent de déceler d'éventuelles failles et autres cassures.

Les différentes données ont subi une amélioration de contraste par égalisation des histogrammes. Ensuite, à chaque canal a été associée une couleur : le rouge pour le TM4, le vert pour le TM5 et le bleu pour le TM7.

Le document obtenu révèle toute une série de linéaments dont les orientations correspondent à celles observées sur l'image des orientations de pentes, à l'exception de la direction NO-SE. Peut-être faut-il y voir l'influence de la limite de résolution du capteur TM par rapport à la précision du M.N.T. (équidistance de 10 m). Ici se marque déjà la complémentarité des deux catégories de documents. De plus, le territoire couvert par l'image satellitaire permet de suivre ces linéaments sur plusieurs kilomètres, voire une dizaine de kilomètres.

La superposition du bloc-diagramme à la composition colorée (fig. 30-7, voir cahier couleur) permet de voir la correspondance des linéaments repérés sur l'image satellitaire avec la topographie, mettant particulièrement bien en évidence les bords abrupts de la dépression.

Ce type de document présente également un grand intérêt quant aux influences topographiques associées aux types d'affectation du sol que l'on y rencontre et sur l'évolution des paysages. Il suggère que les bords de la dépression sont associés à divers linéaments.

5. Conclusion

À la suite de cette étude, il apparaît que la dépression est caractérisée par toute une série d'orientations linéamentaires largement distinctes de celles rencontrées dans les zones avoisinantes. Si une solution n'a pas été trouvée quant à l'explication de sa genèse, il semble de plus en plus que celle-ci soit liée à tout un système de failles complexes de diverses orientations et d'âges différents. On retrouve un système faillé d'orientation NO-SE associé au Graben du Rhin, d'âge cénozoïque, ainsi qu'un ensemble de failles NE-SO en relation avec la structure condrusienne et d'âge hercynien. L'étude par l'imagerie satellitaire et la création d'un modèle numérique de terrain permet une approche originale du problème; la grande souplesse d'échelle des documents, leur complémentarité dans la résolution au sol et leur superposition admettent des observations supplémentaires à celles obtenues par les démarches traditionnelles dans ce type d'étude géomorphologique ainsi que de replacer un phénomène «local», la dépression d'Aubel, dans son contexte régional, le Pays de Herve.

6. Références

- DONNAY, J.-P. 1988. Constitution d'un modèle numérique de terrain : une approche en mode raster sur micro-ordinateur. Bulletin trimestriel de la Société belge de photogrammétrie-télé-détection et cartographie, n^{os} 171-172, p. 47-60.
- DONNAY, J.-P. et BINARD, M. 1993. GIPSY : un système d'information géographique orienté images. in DUBOIS, J.-M. M. et BLASCO, F. (réd.). Outils micro-informatiques et télé-détection de l'évolution des milieux. Troisièmes journées scientifiques du Réseau de télé-détection de l'UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990, Éditions AUPELF-UREF et Les Presses de l'Université du Québec, p. 281-307
- WILLEMS, L. 1990. L'apport de la télé-détection à l'étude géomorphologique de la dépression d'Aubel (Pays de Herve). Mémoire en Sciences géographiques, Université de Liège, 93 p.

**Compte rendu de la table ronde
portant sur le thème
« Télédétection et cartographie »**

31

Téledétection et cartographie

GOZE B. BÉNIÉ

Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1; téléphone : 819-821-7286; télécopieur : 819-821-7238

1. Introduction

Pour clore ses quatrièmes journées scientifiques, le réseau de télédétection de l'UREF a organisé une table ronde sur le thème «Télédétection et cartographie». À cette occasion, une invitation a été lancée aux divers présidents de session pour faire une brève synthèse des conférences présentées. Je passe sous silence ces synthèses parce que chaque article de ce compte rendu est précédé de son résumé. Ces synthèses ont été suivies d'un débat sur l'intérêt des chercheurs aux aspects cartographiques opérationnels de la télédétection et au transfert de technologie vers l'industrie et les autres utilisateurs. Mais avant de toucher aux points qui ont retenu l'attention des participants, je fais une rapide mise en situation de la cartographie par télédétection pour mieux cerner le problème.

2. Télédétection et cartographie

La télédétection est cette science pluridisciplinaire qui s'intéresse aux traitements analogique ou numérique d'images aérospatiales de la Terre, pour aider à réaliser la gestion des ressources naturelles renouvelables ou non. Ces traitements produisent des résultats de nature variée : des images, des cartes, des statistiques, etc.

En ce qui concerne particulièrement la cartographie par télédétection, elle a démarré par la photo-interprétation des résultats de traitement analogique d'images (transformation d'images rehaussées en photographies). Cette photo-interprétation nécessite une intervention humaine très importante.

Depuis les années 70, pour réduire cette intervention, et par le fait même une bonne part de subjectivité, et accélérer le processus de production, un accent a été mis sur l'automatisation du processus d'interprétation. Cette orientation a eu pour effet le développement de plusieurs méthodes d'analyse d'images (segmentation et classification) allant des plus simples (analyse pixel par pixel) aux plus complexes (analyse basée sur le contexte, système expert), vu la foule de contraintes qui continuent d'attirer l'intérêt des chercheurs.

C'est d'ailleurs dans cet esprit que les conférenciers ont exposé les résultats de leurs travaux de recherche. Ainsi les sujets développés tournaient autour des points suivants :

1) l'influence de la topographie dans le traitement numérique d'images de télédétection et la réduction de ses effets;

2) la cartographie des ressources en eau à partir d'une combinaison des méthodes de télédétection et d'hydrogéologie;

3) le suivi de l'évolution environnementale (désertification, milieux dégradés) par analyse diachronique d'images satellitaires;

4) la cartographie de la végétation (agriculture, forêt, environnement sahélien, dégradation du milieu végétal);

5) le développement de méthodologies d'extraction des données cartographiques.

Pourrait-on pour autant dire que l'interprétation automatisée d'images pour des fins cartographiques a pris le pas sur la photo-interprétation conventionnelle ? Les avis sont partagés comme on le verra plus tard dans la section débat.

Directement reliées à la question précédente, plusieurs autres questions ont été abordées dans le cadre de ce débat, les plus importantes étant :

1) Est-ce que les chercheurs se préoccupent des aspects opérationnels de cette nouvelle démarche cartographique?

2) Si les aspects opérationnels sont négligés au profit des intérêts de la recherche fondamentale, est-ce que ce cheminement suit les objectifs de l'UREF?

3) Si au contraire les chercheurs se préoccupent de l'opérationnalité de leurs méthodes, comment s'y prennent-ils pour faire le transfert des résultats vers les utilisateurs que sont la population, l'industrie privée et les gouvernements?

4) Que devraient faire les États et les organismes internationaux pour faciliter l'utilisation de la télédétection dans le monde et plus particulièrement dans les pays du Sud?

3. Débat

Les propos formulés ci-dessous ne sont pas un procès-verbal des débats, mais plutôt une synthèse des discussions. Les avis sont regroupés sous quelques thèmes qui nous ont paru représentatifs des questions soulevées.

3.1. La photo-interprétation conventionnelle et l'interprétation automatisée

Si la télédétection a démarré par l'interprétation d'images rehaussées, la préoccupation des chercheurs a été depuis les années 80 l'étalonnage des données et l'automatisation de l'extraction des objets de la scène. Aujourd'hui, même si cette tendance existe encore, ceux qui se préoccupent de la mise en pratique des méthodes automatisées se rendent compte rapidement des limites du processus d'automatisation : le manque de précision dans la définition de l'objet et dans l'étalonnage radiométrique. Ces limites sont en partie dues aux

effets atmosphériques difficiles à modéliser, aux problèmes d'échelle liés à la limite de résolution spatiale, aux fenêtres spectrales utilisées, etc. Cette constatation renvoie progressivement les spécialistes vers leur contribution importante au processus d'interprétation si ce n'est pas la photo-interprétation seule qui est adoptée. Les systèmes experts sont fortement suggérés pour améliorer la précision des méthodes automatisées mais le niveau de recherche n'est pas encore suffisant pour prendre le pas sur les approches conventionnelle et semi-automatisée.

3.2. Préoccupation aux aspects opérationnels de la recherche

L'opérationnalité des méthodes développées est un critère fondamental chez la plupart des chercheurs. Cet intérêt est plus prononcé pour la recherche au sein de l'industrie ou en collaboration avec cette dernière. Si elle est si importante, comment se fait-il alors que la plupart des travaux présentés étaient à un stade préliminaire? On pourrait croire que le cadre «universitaire» de l'UREF puisse être la cause de ce phénomène, mais les membres de l'assistance n'en croient rien. En fait, au lieu de répondre directement à la question, les membres de l'assistance se sont plutôt penchés sur les moyens à suivre pour satisfaire ce critère d'opérationnalité. Ainsi, ils ont manifesté le souhait d'avoir une contribution financière plus appréciable de l'industrie et des gouvernements pour parvenir plus rapidement à des résultats opérationnels. Ils ont aussi souhaité que des organismes tels que l'UREF accroissent leur budget d'aide à la recherche et qu'ils associent de plus en plus les utilisateurs aux rencontres scientifiques pour orienter les chercheurs vers leurs préoccupations. De plus, ce concept d'opérationnalité de la recherche deviendrait chose courante si on y mettait un accent particulier lors de la formation des chercheurs.

3.3. Transfert des résultats de recherche et développement vers les utilisateurs

À propos du transfert des résultats de recherche et développement vers les utilisateurs, c'est le même son de cloche que précédemment. Le transfert se ferait normalement si les utilisateurs contribuaient au financement des travaux en collaboration avec les organismes de financement de la recherche comme l'UREF. Encore ici, le transfert se ferait directement ou indirectement si l'on convoitait aux rencontres scientifiques les utilisateurs pour une diffusion plus large des résultats.

3.4. Intervention des États et des organismes internationaux

Il a d'abord été question de certains aspects de l'intervention de l'UREF auprès des chercheurs : les chercheurs ont souhaité l'augmentation des subventions de recherche et la considération, lors des soumissions de proposition, de projet de partenaires «Sud - Sud». Ils ont apprécié à juste titre la création d'une bourse de recherche de l'UREF au niveau doctoral. Une recommandation qui pourrait sortir de ce point est la création par l'UREF d'un programme de subvention «industrie - institution de recherche» dans les axes Nord - Sud ou Sud - Sud.

Ensuite, les chercheurs africains ont soulevé les difficultés rencontrées par le Centre régional de téledétection de Ouagadougou. Une suggestion a été faite sur la contribution de l'UREF à la sensibilisation des pays du Nord à la mise sur pied d'une station de réception d'images en Afrique de l'Ouest, station dont le rayon d'action pourrait s'étendre jusqu'en Afrique centrale. Il faut rappeler que l'Afrique de l'Ouest est actuellement desservie par des

stations aussi lointaines que celle des îles Canaries, à tel point que la disponibilité de certaines images pose d'énormes difficultés.

4. Synthèse

La table ronde, en plus de donner l'occasion aux présidents de session de faire la synthèse des communications présentées durant ces journées, a permis de constater le peu d'utilisations opérationnelles de la télédétection. L'une des causes est le manque de précision des méthodes automatisées d'interprétation d'images de télédétection qui constituent malgré tout un point d'intérêt marquant pour les chercheurs. La télédétection est alors considérée comme un outil parmi tant d'autres à intégrer dans les méthodes conventionnelles comme la photo-interprétation. Une autre cause provient du manque de concertation entre le monde des chercheurs et celui des utilisateurs. Pour ce dernier problème, les chercheurs ont suggéré quelques solutions dont le financement de la recherche par l'industrie, l'organisation de conférences scientifiques conjointes, etc. Le mode de financement de la recherche par l'UREF et le manque de station de réception d'images satellitaires en Afrique de l'Ouest ont aussi fait l'objet de la table ronde.


MARQUIS
Montmagny, Qc
janvier 1994



Créée à l'initiative de l'Université des réseaux d'expression française, la collection *Universités francophones* s'insère, depuis 1988, dans le paysage éditorial international. L'UREF met ainsi à la disposition des étudiants et chercheurs, des ouvrages de haute qualité scientifique.

Rédigés par des équipes à caractère multilatéral, manuels, monographies et actes de colloques abordent des problématiques intéressant l'ensemble du monde francophone. En outre, ils s'adaptent, grâce à une politique de prix particulière, à des différentes réalités économiques : autant de conditions contribuant à la reconnaissance et au succès de la collection.

La télédétection porte en elle les germes d'une révolution dans la façon d'élaborer et d'utiliser les cartes géographiques. Les *Quatrièmes journées scientifiques du « Réseau Télédétection »* de l'UREF ont permis de faire le point sur l'application de la télédétection à la cartographie. Cartographie topographique, nivale et des milieux à fort relief, cartographie des ressources en eau, cartographie des milieux dégradés, cartographie de la végétation, méthodologies d'extraction des données cartographiques, télédétection et cartographie ... soit six rubriques et trente et un textes produits par d'éminents auteurs de disciplines et d'origines géographiques très différentes. Une somme indispensable pour les étudiants comme pour les chercheurs.

Prix Canada : 45 \$ CAN • Prix France : 210 FF • Prix préférenciel UREF : 108 FF



9 782760 507524

ISBN 2-7605-0752-1

59-4530-8