UNIVERSITÉS FRANCOPHONES

Sous la direction de

Jean-Marie M. Dubois

Régis Caloz

Paul Gagnon

actualité scientifique

La Télédétection en francophonie : analyse critique et perspectives

Actes des Journées scientifiques de Lausanne 1999

Agence universitaire de la Francophonie

LA TÉLÉDÉTECTION EN FRANCOPHONIE : ANALYSE CRITIQUE ET PERSPECTIVES

Dans la même collection :

Manuels

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

BONN, F. (réd.). 1996. Précis de télédétection, Volume 2, Applications thématiques. Presses de l'Université du Québec, Québec, 633 p.

Actes de 1989 à 1993

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.

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 BLASCO, F. (réd.) 1993. Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Série Actualité scientifique, Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, 492 p.

DUBOIS, J.-M.M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (réd.) 1993. Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Série Actualité scientifique, Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, 422 p.

Diffusion de la collection :

Canada :

Presses de l'Université du Québec
2875, boul. Laurier
Sainte-Foy, Québec, Canada, G1V 2M3
Téléphone : +1 (418) 657-4390
Télécopieur : +1 (418) 657-2096

DPLU inc.
5165, rue Sherbrooke Ouest, bureau 112
Montréal, Québec, Canada, H4A 1T6
Téléphone : +1 (514) 484-3940
Télécopieur : +1 (514) 484-9325

France :

Ellipses
32, rue Bargue
75015 Paris, France
Téléphone : +33 (1) 45-67-74-19
Télécopieur : +33 (1) 47-34-67-94

Autres pays :

Hachette Diffusion Internationale
58, rue Jean Bleuzen
92178 Vanves cedex, France
Téléphone : +33 (1) 46-62-10-10
Télécopieur : +33 (1) 40-95-10-39

Actes de 1995 à 2000

DUBOIS, J.-M.M., BOUSSEMA, M. R., BOIVIN, F. et LAFRANCE, P. (réd.) 1995. Télédétection des ressources en eau. Série Actualité scientifique, Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, 304 p.

DUBOIS, J.-M.M., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.) 1997. Télédétection des milieux urbains et périurbains. Série Actualité scientifique, AUPELF-UREF, Montréal, 361 p.

DUBOIS, J.-M.M., BERNIER, M., FORTIN, J.-P., et BOIVIN, F. (réd.) 1998. La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Série Actualité scientifique, Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, 356 p.

Diffusion des actes :

Réseau Télédétection de l'AUF
Laboratoire d'écologie terrestre
UMR 5552-CNRS/UPS
B.P. 4403
31405 Toulouse cedex 4
France
Téléphone : +33 (5) 61-55-85-77
Télécopieur : +33 (5) 61-55-85-44

Catalogue de la collection : http://www.aupelf-uref.org/catalogue/

LA TÉLÉDÉTECTION EN FRANCOPHONIE : ANALYSE CRITIQUE ET PERSPECTIVES

Huitièmes journées scientifiques
du « Réseau Télédétection » de l'Agence universitaire de la Francophonie,
Lausanne, 22-25 novembre 1999

COMITÉ SCIENTIFIQUE ET DE LECTURE :
- Jean-Marie Dubois (coresponsable de l'édition)
- Régis Caloz (coresponsable de l'édition)
- Paul Gagnon (coresponsable de l'édition)
- François Blasco
- Claude Collet
- Jean-Michel Jacquet
- Otto Kölbl
- Aldelaziz Merzouk
- André Ozer
- Guy Rochon
- Emmanuel Tonyé

2000
Agence universitaire de la Francophonie
B.P. 400, succ. Côte-des-Neiges
Montréal (Québec) Canada
H3S 2S7

Données de catalogage avant publication (Canada)

AUPELF-UREF. Réseau Télédétection. Journées scientifiques (8es : 1999 : Lausanne, Suisse)

La télédétection en francophonie : analyse critique et perspectives : huitièmes Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la francophonie, Lausanne, 22-25 novembre 1999

(Universités francophones. Actualité scientifique)
Comprend des réf. bibliogr.

ISBN 2-920021-92-3

1. Télédétection – Francophonie – Congrès. 2. Urbanisme – Télédétection – Congrès. 3. Désertification – Télédétection – Congrès. 4. Ressources en eau – Exploitation – Télédétection – Congrès. 5. Images-satellite – Congrès. 6. Satellites artificiels en télédétection – Congrès. I. Dubois, J. M. M. (Jean Marie Maurice), 1944- . II. Caloz, Régis. III. Gagnon, Paul, 1945- . IV. Blasco, François. V. AUPELF-UREF. VI. Titre. VII. Collection.

G70.39.A85 1999 621.36'78'0917541 C00-942031-2

ISBN 2-920021-92-3
Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés © 2000
Agence universitaire de la Francophonie

Dépôt légal – 4e trimestre 2000
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
Imprimé au Canada

Table des matières

Liste des participants et auteurs XIII

Introduction. Jean-Marie Dubois et Régis Caloz XXIII

Partie I. **Télédétection des milieux urbains et périurbains** 1

1. **La télédétection urbaine à l'aube de la très haute résolution spatiale.**
   Jean-Paul Donnay, Claude Collet et Christiane Weber 3
2. **Influence de la précision absolue des points d'amer sur la qualité de la géoréférenciation des images à très haute résolution.**
   Roland Billen, Bernard Cornélis, David Sheeren, Jean-Paul Donnay et Dimos Pantazis 15
3. **Utilisation des données satellitaires pour l'actualisation décennale du découpage en secteurs statistiques du territoire de la Belgique.**
   Marc Binard, Pierre Jamagne et Fabrice Muller 23
4. **Cartographie de la densité urbaine par la morphologie mathématique : application dans les régions de Paris et Tachkent.**
   Akila Chelabi-Kemmouche et Catherine Mering 33
5. **Démarches de reconnaissance des formes urbaines et transfert méthodologique Nord - Sud (Europe - Afrique).**
   Claude Collet, Jean-Paul Donnay et Christiane Weber 41
6. **Impact de la croissance spatiale de Bamako sur celle des localités périurbaines : l'apport des images HRV de SPOT pour le suivi de leur dynamique comparée.**
   Balla Diarra et Jacques Champaud 49
7. **Analyse préliminaire en vue d'une modélisation des pertes d'énergie de la ville de Montréal : utilisation de la bande thermique TM de Landsat.**
   Ramata Magagi, Monique Bernier, Gaëtan Lafrance et Yves Gauthier 61

8. **Télédétection radar et délimitation des formes urbaines : application à la ville de Douala au Cameroun.**
Dieudonné Mouafo 71

9. **Fusion d'images de télédétection à l'aide de l'analyse multirésolutions par ondelettes.**
Solofoarisoa Rakotoniaina, Claude Collet et Jean Bruno Ratsimbazafy 85

10. **Extraction du réseau routier sur une image RSO de ERS-2 et sur une image HRV (XS) de SPOT par analyse de texture et morphologie mathématique : application à la ville de Yaoundé (Cameroun).**
Emmanuel Tonyé, Alain Akono, André Ndi Nyoungui et René-Joly Assako Assako 95

11. **Intégration des données fournies par la télédétection et la photogrammétrie dans un système d'information du territoire en vue d'étudier et d'évaluer les catastrophes naturelles en milieu urbain : exemple de Bucarest.**
Florea Zavoianu et Liviu Dinulescu 105

Partie II. **Télédétection et désertification** 111

12. **Contribution de la télédétection à l'étude de la désertification : exemples choisis en Afrique de l'Ouest.**
Marie-Françoise Courel, Patrice Bicheron, Éric Mougin et Lionel Jarlan 113

13. **Détection des feux en forêt amazonienne à partir des données HRVIR et VEGETATION de SPOT-4.**
Marie-France Bellan, Jean-Luc Carayon, Thierry Phulpin, François Lavenu et François Blasco 119

14. **Sur l'ensablement des palmeraies : apport de la télédétection numérique dans un secteur menacé du sud-est du Maroc.**
Robert Desjardins, El Mehdi Alem, Pierre Rognon, Patrick Maupin, Ibrahima Ndiaye et Mansour Benalla 127

15. **Apport de la télédétection à l'étude de la transformation de l'agriculture et de l'environnement dans le département de Bignona (Sénégal méridional).**
Mamadou Gueye et André Ozer 141

16. **Utilisation des indices décrivant la forme des spectres pour l'évaluation de la dégradation des sols d'un milieu semi-aride au sud-est de l'Espagne.**
Driss Haboudane, Ferdinand Bonn, Alain Royer, Stefan Sommer et Wolfgang Mehl 153

17. **Essai de corrélation, par traitement d'une image HRV (XS) de SPOT, entre la dégradation des milieux naturels et les densités de population autour du Parc national du mont Péko en Côte d'Ivoire forestière.**
Yao Bertin Kouadio, Augustin Tiyegbo Touré et Bizueli Koli 163

18. **Suivi de la désertification au Maroc à partir d'images AVHRR de NOAA.**
Abdellah Lemsanni, Mohamed Aït Belaïd, Mohammed-Faouzi Smiej et Nasser El Yamine 171

19. **Utilisation de l'imagerie aérienne et satellitale pour l'analyse de la mutation des espaces ruraux : cas de la sous-préfecture de Mandélia dans le département de Hadjer Lamis au Tchad.**
Hubert N'Djafa Ouaga et Marie-Françoise Courel 177

Partie III. **Télédétection des ressources en eau** 187

20. **La place des observations par satellite dans l'estimation et la régionalisation des ressources en eau.**
Guy Flouzat, Olivier Amram, Jean-Pierre Fortin 189

21. **Apport de la télédétection et des SIG pour la recherche hydrogéologique dans la région du Sahel central des Doukkala (Maroc occidental).**
Hafida Bouaouda et Youssef Timoulali 205

22. **Appréhension de la cinématique paysagère par télédétection spatiale en estuaire de Seine (Normandie, France) : contribution au Programme national de recherche sur les zones humides.**
Alban Bourcier, Jean-Come Bourcier et Thomas Pouchin 215

23. **Essai méthodologique exploitant les images spatiales dans un SIG pour la protection des ressources en eau de surface au Maroc.**
Abdelkader El Garouani, Raouf Jabrane et Abdelaziz Merzouk 225

24. **Suivi des anomalies pluviométriques en Afrique équatoriale et tropicale à l'aide d'images VISRR de Météosat : quelques résultats de recherche sur le bassin du fleuve Congo.**
Kamutanda Kalombo 233

25. **Application de la télédétection et d'un modèle de simulation d'écoulement des fluides pour l'identification de couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines en milieu cristallophyllien dans la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire).**
Fernand Koffi Kouamé, Pierre Gioan, Jean Biémi, Kouadio Affian et Kapo Coulibaly 241

26. **Approche de la géométrie des aquifères en milieu cristallophyllien fissuré par les analyses statistique et fractale des données linéamentaires extraites des images satellitales : cas de la région semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire.**
Fernand Koffi Kouamé, Pierre Gioan, Jean Biémi et Théophile Lasm 251

27. **Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso : cas du bassin versant de Bidi (province du Yatenga).**
Youssouf Koussoubé et Alain Nindaoua Savadogo 263

28. **Télédétection appliquée à l'étude de l'érosion hydrique et de l'ensablement des rizières dans la région sud du lac Alaotra (Madagascar).**
Léa Jacqueline Raharijaona Raharison, Tokinomena Aimbelontsiry Ramerison et Rafanomezantsoa Manuel Andrianilaina 271

29. **Cartographie des aquifères de fissures en milieu cristallin du nord-ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection.**
Issiaka Savané et Jean Biémi 279

30. **Utilisation d'une image HRV(P) de SPOT pour l'étude de courants côtiers et de mouvements tourbillonnaires près des côtes du Liban.**
Janine Somma et Nada Badaro-Saliba 289

Partie IV. **Paramètres de surface et signatures spectrales** 297

31. **Observation spatiale des paramètres de surface.**
Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Frédéric Adragna, Yann Kerr, Jean-Pierre Lagouarde, M. Leroy, Thuy Le Toan 299

32. **Intérêt du moyen infrarouge pour la cartographie des résidus de cultures : cas du capteur ETM+ de Landsat-7.**
Abderrazak Bannari, Driss Haboudane et Ferdinand Bonn 319

33. **Détermination d'indices texturaux pour la classification des unités urbaines appliquée à la région est de la ville d'Alger (Algérie).**
Aichouche Belhadj-Aissa, Mostéfa Belhadj-Aissa et Youcef Smara 333

34. **Méthodes de visualisation multivariée et multidate de données spectrales pour la caractérisation des surfaces agricoles.**
Christian Blumer et Régis Caloz 343

35. **Signatures spectrales et dégradation du couvert de forêt dense humide de Côte d'Ivoire.**
Cyrille Chatelain, Rodolphe Spichiger et Laurent Gautier 349

36. **Amélioration et comparaison de filtres adaptatifs pour la réduction du chatoiement dans les images radar RSO de ERS-1.**
Dalila Cherifi et Youcef Smara 357

37. **Utilisation des données TM de Landsat pour le suivi de l'état hydrique du couvert végétal en Algérie.**
Abderrahmane Hamimed, Khalladi Mederbal et Abdelkader Khaldi 369

38. **Caractérisation des landes montagnardes dans le Massif Central français à l'aide de l'information satellitale de HRV de SPOT.**
Christine Jacqueminet et Gilles Thébaud 379

39. Nouvel algorithme de calcul des paramètres de texture appliqué à la classification d'images satellitaires.
Assia Kourgli et Aichouche Belhadj-Aissa 385

40. Utilisation des images TM de Landsat pour estimer la variabilité spatiale de l'humidité du sol destinée aux modèles hydrologiques spatialisés : application au delta du Sénégal.
Medou Lo et Inge Sandholt 395

41. Utilisation de la durée d'ensoleillement et des images visibles du VISSR de METEOSAT pour le calcul du coefficient de réflexion du sol.
Ammar Mokhnache 405

42. Essai de mise en place d'une base de données de signatures spectrales standard : application à la vallée de la Garonne (France).
Étienne Muller 413

43. Corrections atmosphérique et topographique par la méthode des points nopirs améliorés et par intégration d'un modèle numérique d'altitude : application à la région de Florence (Italie).
Mounira Ouarzeddine et Aichouche Belhadj-Aissa 421

Partie V. **Bilan régionaux de la télédétection** 427

44. La télédétection en Amérique du Nord de 1985 à 1999 : un bilan régional.
Ferdinand Bonn 429

45. Bilan régional de la télédétection en Afrique subsaharienne.
Emmanuel Tonyé 439

46. Situation actuelle et perspectives de développement des laboratoires de télédétection de l'Europe Centrale et de l'Europe de l'Est.
Floréa Zavoianu, Vasile Grama et Vasso Barbaroussi 457

Avant-propos

La collection " *Universités francophones* " de l'Agence universitaire de la Francophonie

La diffusion de l'information scientifique et technique est un facteur essentiel du développement. Aussi, dès 1988, l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF), mandatée par les Sommets francophones pour produire et diffuser revues et livres scientifiques, a créé la collection " *Universités francophones* ". Lieu d'expression de la communauté scientifique de langue française, elle vise à instaurer une collaboration entre enseignants et chercheurs francophones en publiant des ouvrages coédités avec des éditeurs francophones et largement diffusés dans les pays du Sud, grâce à une politique tarifaire préférentielle.

La collection se décline en différentes séries :
– les usuels : mis à jour régulièrement, ils suivent l'étudiant tout au long de son cursus ;
– les ouvrages de référence de formation à et par la recherche incluant les plus récents acquis de la recherche ;
– les monographies de recherche : livres de 3ème cycle élaborés sous forme de manuels ou d'actes de journées scientifiques, notamment par les réseaux thématiques de recherche ;
– les ouvrages de synthèse de la collection " Savoir Plus Universités " vendus à 10F au Sud ;
– les dictionnaires et grands outils qui s'imposent par leur pertinence et leur rayonnement sur le marché éditorial francophone ;
– les ouvrages de prospective : ouvrages de réflexion donnant l'éclairage de la Francophonie sur les grandes questions contemporaines.

Notre collection, en proposant une approche plurielle et singulière de la science, adaptée aux réalités multiples de la Francophonie, contribue à promouvoir la recherche dans l'espace francophone et le plurilinguisme dans la recherche internationale.

Liste des participants et auteurs

Abdellaoui, Abdelkader, 115 Grande Rue, App. 27A, La Truche, 38700 France, abdellaoui.abdelkader@ujf-grenoble.fr

Adragna, Frédéric, CNES, 18 Av. Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 4, France

Affian, Kouadio, Université de Cocody (CURAT), 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire, affiank@ci.refer.org

Aït Belaid, Mohammed, Centre royal de télédétection spatiale (CRTS), 16 bis, avenue de France, Agdal, Rabat, Maroc, aitbelaid@crts.gov.ma

Akono, Alain, Laboratoire d'électronique et de traitement du signal (LETS), École nationale supérieure polytechnique, B.P. 8390, Yaoundé, Cameroun

Alem, El Mehdi, Département de télédétection, Institut scientifique, Université Mohammed V, avenue Ibn Batouta, B.P. 703, Rabat-Agdal, Maroc

Amram, Olivier, Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CNES-CNRS-UPS), B.P. 2801, 18 avenue Édouard-Belin, 31401 Toulouse cedex 4, France

Andrianilaina, Rafanomezantsoa Manuel, Département de géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, B.P. 1500, Antananarivo, Madagascar

Assako Assako, René-Joly, Département de géographie, Université de Douala, B.P. 8562, Douala-Deido, Cameroun, assako@hotmail.com

Auda, Yves, Laboratoire d'écologie terrestre, UMR 5552 - CNRS/UPS, B.P. 4403, Toulouse cedex 4, 31405 France

Bachari, Nour El Islam, Université des sciences et de la technologie d'Oran, Département de physique, B.P. 1505, El'Menouar, Oran, 31000 Algérie

Badaro-Saliba, Nada, Département de géographie, Faculté des lettres et des sciences humaines, Université Saint-Joseph, B.P. 175-208, Beyrouth, Liban, nsaliba@syfed.lb.refer.org

Bannari, Abderrazak, Laboratoire de télédétection et de géomatique, Département de géographie, Université d'Ottawa, C.P. 450, Succ. A, Ottawa (Ontario), Canada K1N 6N5, abannari@uottawa.ca

Barbalata, Julian, Université de Moncton, 165, boulevard Hébert, Edmundston (N.B.) E3V 2S8 Canada, jbarbala@cusem.ca

Barbaroussi, Vasso, École polytechnique d'Athènes, 27, rue Sirion, 16231 Athènes, Grèce

Belhadj-Aissa, Aïchouche, Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, USTHB, B.P. 32 - El Alia, Bab Ezzouar, Alger 16111, Algérie, h.belhadj@mailcity.com

Belhadj-Aissa, Mostéfa, Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P.32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111 Alger, Algérie

Bellan, Marie-France, Laboratoire d'écologie terrestre, UMR 5552 (CNRS/UPS), B.P. 4403, 31405 Toulouse cedex 4, France, marie-france.bellan@cict.fr

Benalla, Mansour, Département des sciences de la Terre, Université Mohammed V, avenue Ibn Batouta, B.P. 703, Rabat-Agdal, Maroc

Bernier, Monique, INRS-Eau, 2800, rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4C7, monique_bernier@inrs-eau.uquebec.ca

Bicheron, Patrice, Centre d'Études Spatiales de la Biosphère, 18, avenue Édouard Belin, 31401 Toulouse cedex 04, France, bicheron@cesbio.cnes.fr

Biémi, Jean, Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Billen, Roland, Laboratoire SURFACES, Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, 4000 Liège, Belgique, surfaces@geo.ulg.ac.be

Binard, Marc, Service universitaire de recherches fondamentales et appliquées en cartographie et en études spatiales (SURFACES), Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, B-4000 Liège, Belgique, surfaces@geo.ulg.ac.be

Blasco, François, Laboratoire d'écologie terrestre, UMR 5552 - CNRS/UPS, B.P. 4403 Toulouse cedex 4, 31405 France, francois.blasco@cict.fr

Blumer, Christian, Système d'information à référence spatiale, Département du génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse, christian.blumer@epfl.ch

Boillat, Véronique, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne CH-1015, Suisse, veronique.boillat@epfl.ch

Bonn, Ferdinand, CARTEL, Université de Sherbrooke, 2 500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1, fbonn@courrier.usherb.ca

Borda, Luis, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne CH-1015, Suisse, luis.borda@epfl.ch

Bornicchia, François, Université de Genève, CUEH 102, boulevard Carl-Vogt, Genève 4, 1211 Suisse, bornicch@uni2a.unige.ch

Bouaouda, Hafida, Faculté des sciences, Université Mohamed V, avenue Ibn Battouta, B.P. 1014, Rabat, Maroc, bouaouda @hotmail.com

Boulkroune, Khalef, AUF, 4 place de la Sorbonne, Paris, France

Bourcier, Alban, CIRTAL / CNRS, Université du Havre, 25, rue Ph. Lebon, Le Havre cedex, France, alban.bourcier@univ-lehavre.fr

Bourcier, Jean-Côme, Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales (CIRTAI), Groupe « Environnement & Estuaire », Université du Havre, 25, rue Lebon, 76057 Le Havre cedex, France

Boussema, Rached, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, LTSIRS, B.P. 37, Tunis-Belvédère 1002, Tunisie, Rached.Boussema@enit.tn

Caicedo, Maria Alejandra, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne CH-1015, Suisse

Caloz, Régis, Système d'information à référence spatiale, Département du génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse, regis.caloz@epfl.ch

Carayon, Jean-Luc, Laboratoire d'écologie terrestre, UMR 5552 (CNRS/UPS), B.P. 4403, 31405 Toulouse cedex 4, France

Castro, Flavio, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne CH-1015, Suisse, flavio.castro@epfl.ch

Chabaane, Zohra Lili, Institut national agronomique de Tunis, Département de génie rural, eau et forêt, 43, av. Charles Nicole, Tunis Mahrajene 1082, Tunisie, chabaane.zohra@inat.agrinet.tn

Champaud, Jacques, Laboratoire population - environnement, Université de Provence, B.P. 10, Centre Saint Charles, 3, Place V. Hugo, 13331 Marseille cedex 1, France, champaud@newsup.univ-mrs.fr

Chatelain, Cyrille, Conservatoire et Jardin botaniques de Genève, B.P. 60, 1292 Chambésy, Suisse, chatelain@cjb.unige.ch

Cheikh, Sana, École nationale d'ingénieurs de Tunis, Laboratoire de télédétection et SIRS, B.P. 37, Tunis-Belvédère 1002 Tunisie

Chelabi-Kemmouche, Akila, Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des Sciences et de Technologie Houari Boumédiène, Bab-Ezzouar, Alger, Algérie

Cherifi, Dalila, Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène (USTHB), B.P. 32, El-Alia Bab-Ezzouar, 16111 Alger, Algérie, dcherifi @hotmail.com

Collet, Claude, Université de Fribourg, Institut de Géographie, Pérolles, Fribourg CH-1700, Suisse, claude.collet@unifr.ch

Cornélis, Bernard, Laboratoire SURFACES, Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, 4000 Liège, Belgique, surfaces@geo.ulg.ac.be

Coulibaly, Kapo, Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Courel, Marie-Françoise, PRODIG – UMR 8586, 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France, courel@univ-paris1.fr

Daoud, Kamel, Laboratoire de télédétection et SIG, DGAT-IST, USTHB, B.P. 32 - El Alia, Bab Ezzouar, Alger 16110, Algérie

Daoudi, Mohamed, Laboratoire de télédétection et SIG, DGAT-IST, USTHB, B.P. 32 - El Alia, Bab Ezzouar, Alger 16111, Algérie

Desjardins, Robert, Département de géographie, Université du Québec à Montréal, B.P. 8888, Succ. Centre-ville, Montréal, Québec, Canada H3C 3P8, desjardins.robert@uqam.ca

Diarra, Balla, Institut supérieur de formation et de recherche appliquée (ISFRA), B.P. E475, Bamako, Mali, evima@ird.ml

Dinulescu, Liviu, Faculté de geodésie, Université technique de constructions de Bucarest, 124, boul. Lacul Tei, Sector 2, Bucarest, Roumanie

Donnay, Jean-Paul, Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, 4000 Liège, Belgique, donnay@geo.ulg.ac.be

Dubois, Jean-Marie, CARTEL, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec Canada J1K 2R1, jmdubois@courrier.usherb.ca

Duchesne, Jean, Institut National d'Horticulture, 2, rue Le Nôtre, Angers cedex 1, 49405 France, Jean.Duchesne@angers.inra.fr

El Garouani, Abdelkader, Faculté des sciences et techniques Fès-Saïss, Département de géologie, route d'Immouzzar, B.P. 2202, Fes-Saiss, Maroc, garouani@caramail.com

El Khadimi, Ahmed, Institut National des Postes et Télécommunications, B.P. 6201, Rabat-Instituts, Maroc, khadimi@hotmail.com

El Morjani, Zineelabidine, Université de Genève, Unité de télédétection et SIG, 13, rue des Maraîchers, Genève 4, 121 Suisse, zine.elmorjani@terre.unige.ch

El Yamine, Nasser, Université Mohammed V, École Mohammadia d'ingénieurs (EMI), avenue Ibn Sina, B.P. 765, Rabat-Agdal, Maroc, elyamine@emi.ac.ma

Flouzat, Guy, Université Paul Sabatier, CESBIO, 18, av. Édouard-Belin, Toulouse cedex 4, 31401 France, guy.flouzat@cesbio.cnes.fr

Fortin, Jean-Pierre, INRS-Eau, 2800, rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4C7, j.-p._fortin@inrs-eau.uquebec.qc.ca

Fotsing, Éric, Université de Dschang, Centre d'étude de l'environnement, B.P. 410, Maroua, Cameroun, efotsing@hotmail.com

Gallice, Claire, Université J. Moulin, Lyon III, CRGA, 38, rue Mélandine, Lyon, 69002 France, claire.gallice@netserver.univ-lyon3.fr

Gardiol, Fred, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, DE-LEMA, ELB-Écublens, Lausanne 1015, Suisse, fred.gardiol@epfl.ch

Gastellu-Etchegorry, Jean-Philippe, CESBIO (UPS-CNES-CNRS), 18, avenue Édouard-Belin, Toulouse cedex 4, 31401 France, gastellu@cesbio.cnes.fr

Gauthier, Yves, INRS-Eau, 2800, rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4C7, gautyves@inrs-eau.uquebec.ca

Gautier, Laurent, Conservatoire et Jardin botaniques de Genève, B.P. 60, 1292 Chambésy, Suisse

Gilgen, Marc, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne CH-1015, Suisse, marc.gilgen@epfl.ch

Gioan, Pierre, Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Giuliani, Grégory, Université de Genève, Unité de télédétection et SIG, 13, rue des Maraîchers, Genève 4, 1211 Suisse, greg_giuliani@hotmail.com

Gnerre,Daniel, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne, CH-1015 Suisse, daniel.gnerre@epfl.ch

Golay, François, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne, CH-1015 Suisse, francois.golay@epfl.ch

Grama, Vasile, Université technique de Moldavie, 41, boul. Dacia, Chisinau, République de Moldavie

Guete, Mamadou, Université de Liège, Laboratoire de géomorphologie et télédétection, Institut de géographie (Bâtiment B-11), allée du 6-Août, 2 Liège, 4000 Belgique, gueyem@hotmail.com

Gueye, Mamadou, Laboratoire de Géomorphologie et de Télédétection, Université de Liège, 2, allée du 6-Août, B11. Sart Tilman, B-4000 Liège

Haboudane, Driss, York University, 4700 Keele Street, North York, Ontario, Canada M3J 1P3, driss@terra.phys.yorku.ca

Hamimed, Abderrahmane, Université de Mascara, Laboratoire d'analyse des systèmes biologiques et de géomatique, B.P. 763, Mascara, 29000 Algérie, ab.hamimed@lemel.fr

Hirsch, Jacky, Université Louis Pasteur, Image et Ville, 3, rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France, jacky@lorraine.u-strasbg.**fr**

Houssa, Rachida, Centre régional de Nador, Institut national de recherche halieutique Beni Ansar, B.P. 197, Nador, Maroc, nador@nadornet.net.ma

Hugon, Frédéric, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne, CH - 1015 Suisse

Jabrane, Raouf, Laboratoire de géologie appliquée, Faculté des sciences et techniques Fès-Saiss, B.P. 2202 ; route d'Imouzzar, Fès-Saiss, Maroc

Jacqueminet, Christine, Centre de recherches pour l'aménagement et l'environnement (CRENAM), Université Jean Monnet, 6, rue Basse des Rives, 42023 Saint-Étienne, France, christine.jacqueminet@univ-st-etienne.fr

Jalade, Annick, Av. Marc-Dufour 42, Lausanne 1006, Suisse, a.jalade@csd.ch

Jallais, Joël, AUF, 4 place de la Sorbonne, Paris, France

Jamagne, Pierre, Institut national de statistique (I.N.S.), Unités territoriales, 44, rue de Louvain, B-1000 Bruxelles, Belgique, pierre.jamagne@statbel.mineco.fgov.be

Jarlan, Lionel, Centre d'Études Spatiales de la Biosphère, 18, avenue Édouard Belin, 31401 Toulouse cedex 04, France

Kaelin, David, École polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Suisse, david.kaelin@epfl.ch

Kalombo, Donatien, Université de Liège, Département de géographie physique, Institut de géographie (Bâtiment B11), allée du 6-Août, 2 Liège, 4000 Belgique

Kerr, Yann, CESBIO (UPS-CNES-CNRS), 18, avenue Édouard-Belin, 31401 Toulouse cedex 4, France

Khaldi, Abdelkader, Laboratoire d'analyse des systèmes biologiques et de géomatique, Centre universitaire Mustapha Stambouli , B.P. 763, Mascara 29000, Algérie

Kluser, Stéphane, Université de Genève, Unité de télédétection et SIG, 13, rue des Maraîchers, Genève 4, 1211 Suisse, stephane_kluser@hotmail.com

Koli, Bizueli, Institut de géographie tropicale (IGT), Université de Cocody-Abidjan,22 B.P. 744 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Kouadio,Yao Bertin, Institut de géographie tropicale (IGT), Université de Cocody-Abidjan, 22 B.P. 744 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, kouadiyb@hotmail.com

Kouamé Koffi, Fernand, Université de Cocody (CURAT), 22 B.P. 801, Abidjan 22, Côte-d'Ivoire, kouamef@syfed.ci.refer.org

Kourgli, Assia, Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, USTHB, B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, 16111 Algérie, a.kourgli@mailcity.com

Koussoubé, Youssouf, Université de Ouagadougou, Faculté des sciences et techniques, Laboratoire d'hydrogéologie, B.P. 7021, Ouagadougou 03, Burkina Faso, koussoube.youssouf@fast.univ-ouaga.bf

Lafrance, Gaëtan, INRS-Énergie et Matériaux, 1650, boul. Lionel-Boulet, B. P. 1020, Varennes, Québec, Canada J3X 1S2, lafrgat@inrs-ener.uquebec.ca

Lagouarde, Jean-Pierre, INRA - Bioclimatologie, Domaine de la Grande Ferrade, B.P. 81, 33883 Villenave d'Ornon, France

Lasm, Théophile, Laboratoire d'hydrogéologie, Université de Poitiers, UMR 6532-HydrASA-CNRS, 40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers cedex, France, Theophile.lasm@hydrasa.univ-poitiers.fr

Lavenu, François, Centre d'étude spatiale de la biosphère, B. P. 2801, 31401 Toulouse cedex 4, France, lavenu@cesbio.cnes.fr

Lemsanni, Abdellah, École Mohammadia d'Ingénieurs (EMI), Université Mohammed V, Avenue Ibn Sina, B.P. 765, Rabat-Agdal, 10050 Maroc, lemsanni33@hotmail.com

Leroy, M., CESBIO (UPS-CNES-CNRS), 18, avenue Édouard-Belin, 31401 Toulouse Cedex 4, France

Le Toan, Thuy, CESBIO (UPS-CNES-CNRS), 18, avenue Édouard-Belin, 31401 Toulouse Cedex 4, France

Lo, Médou, Centre de Suivi Écologique, B.P. 15532, Dakar, Sénégal, medou@cse.sn

Magagi, Ramata, INRS-Eau, B. P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4C7, magagira@inrs-eau.uquebec.ca

Maupin, Patrick, Département de génie électrique, École de technologie supérieure, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Mederbal, Khalladi, Laboratoire d'analyse des systèmes biologiques et de géomatique, Centre universitaire Mustapha Stambouli, B.P. 763, Mascara 29000, Algérie

Mehl, Wolfgang, Environment and Geoinformation, Space Applications Institute, Joint Research Centre, I-21020 Ispra (VA), Italie, wolfgang.mehl@jrc.it

Mejjati-Alami, Mohammed, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Département des sciences du sol, Rabat-Instituts-Agdal, B.P. 6202, Rabat-Agdal, Maroc, alami@mtds.com

Mering, Catherine, Laboratoire de géologie-géomorphologie structurale et télédétection, Université Pierre et Marie Curie, tour 26, 1er étage, B.P. 129; 4, place Jussieu, 75252 cedex Paris 05, France, mering@lgs.jussieu.fr

Merzouk, Abdelaziz, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Département des sciences du sol, Rabat-Instituts-Agdal, B.P. 6202, Rabat-Agdal, Maroc, merzouk@mtds.com

Mokhnache, Ammar, Université de Constantine, Département de physique, Constantine 25000, Algérie, a.mokhna@caramail.com

Moreni, Camila, École polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Suisse

Mouafo, Dieudonné, Centre d'information topographique (CIT), Géomatique Canada, 615 rue Booth, suite 750, Ottawa, Ontario Canada K1A 0E9, dmouafo@nrcan.gc.ca

Mougin, Éric, Centre d'Études Spatiales de la Biosphère, 18, avenue Édouard Belin, 31401 Toulouse cedex 04, France, bicheron@cesbio.cnes.fr /mougin@cesbio.cnes.fr

Muller, Étienne, Centre d'écologie des systèmes aquatiques continentaux (CESAC), UMR C.5576-C.N.R.S./Université Paul Sabatier-Toulouse III, 29, rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse cedex 4, France, muller@cesac.cemes.fr

Muller, Fabrice, Service universitaire de recherches fondamentales et appliquées en cartographie et en études spatiales (SURFACES), Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, 4000 Liège, Belgique, surfaces@geo.ulg.ac.be

Ndi Nyoungui, André, Institut universitaire de Ngaoundéré, Université de Ngaoundéré, B.P. 455, Ngaoundéré, Cameroun

N'djafa Ouaga, Hubert, Centre national d'appui à la recherche (CNAR), Ministère de l'Éducation nationale, B.P. 1228, N'Djamena, Tchad, cnar@sdntcd.undp.org

Ndiaye, Ibrahima, Département de gestion de l'environnement, Université Senghor, 1 place Ahmed, Orabi - El Mancheya, B.P. 21111-415, Alexandrie, Égypte

Niang, Med, Université Paris 7, CETP / CNRS, 10-12, avenue de l'Europe, 75000 Paris, France, niang@cer.jussieu.fr

Ouarzeddine, Mounira, Laboratoire de traitement d'images et télédétection, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (USTHB), B.P. 32, El Alia 16111, Alger, Algérie, n.ouarab@mailcity.com

Ozer, André, Université de Liège, Laboratoire de géomorphologie et télédétection, Institut de géographie (Bâtiment B-11), allée du 6-Août, 2 Liège, 4000 Belgique, aozer@ulg.ac.be

Ozer, Pierre, Université de Liège, Laboratoire de géomorphologie et télédétection, Institut de géographie (Bâtiment B-11), allée du 6-Août, 2 Liège, 4000 Belgique, pozer@ulg.ac.be

Pantazis, Dimos, TEI (Institute of Technological Education of Athens), 40, Anagenniseos, Krissoupoli - Peristeri, 12137 Athènes, Grèce, pantdonz@otenet.gr

Pham Trong Trinh, Institut de géologie (CNRS), Vien Dia Chat, Nghia Do, Cau Giay Hanoi, Viêt-nam, pttrinh@refer.edu.vn

Phulpin, Thierry, Centre national d'études spatiales, 18, avenue Édouard-Belin, 31401 Toulouse cedex 4, France, Thierry.Phulpin@cnes.fr

Pointet, Abram, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne, CH-1015 Suisse, abram.pointet@epfl.ch

Pouchin, Thomas, CIRTAL / CNRS, Université du Havre, 25, rue Ph. Lebon, 76086 Le Havre, France, thomas.pouchin@univ-lehavre.fr

Pouliot, Jacynthe, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne, CH-1015 Suisse, jacynthe.pouliot@epfl.ch

Puissant, Anne, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Image et Ville, 3, rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France, anne@lorraine.u-strasbg.fr

Raharijaonaraharison, Léa, École Supérieure Polytechnique, B.P. 1500 Antananarivo, Madagascar, girahari@syfed.refer.ms

Rakotoniaina, Solofoarisoa, Institut et observatoire géophysique d'Antananarivo (IOGA), Université d'Antananarivo, B.P. 3843 Antananarivo-101, Madagascar, ioga@syfed.refer.mg

Ramerison, Tokinomena Aimbelontsiry, Département de géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, B.P. 1500, Antananarivo, Madagascar

Ratsimbazafy, Jean Bruno, Institut et observatoire géophysique d'Antananarivo (IOGA), Université d'Antananarivo, B.P. 3843 Antananarivo-101 Madagascar, ioga@syfed.refer.mg

Riedo, Marc, École polytechnique fédérale de Lausanne, DGR - SIRS, Lausanne, CH-1015, Suisse, marc.riedo@epfl.ch

Rognon, Pierre, Département de géodynamique et des Milieux Continentaux, Case 114, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris, France

Royer, Alain, CARTEL, Université de Sherbrooke, 2 500 boul. de l'Université, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1, aroyer@courrier.usherb.ca

Sandholt, Inge, Institut de géographie de l'Université de Copenhague, Ostervoldgade, 10, DK-1350, Copenhague, Danemark, is@geogr.ku.dk

Sandoz, Alain, Station Biologique de la Tour du Valat, Le Sambuc, Arles, 13200 France, sandoz@tour-du-valat.com

Savadogo, Alain Nindaoua, Laboratoire d'hydrogéologie, Université de Ouagadougou, B.P. 7021, Ouagadougou, Burkina Faso

Savané, Issiaka, Laboratoire d'hydrogéologie et de télédétection, Centre de recherche en écologie, B.P. 109, Abidjan 08, Côte-d'Ivoire, savanei@syfed.refer.ci

Schaefli, Bettina, École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse

Sfar, Falfoul, Faten, Musée de l'Afrique, Rue de l'Ouvrage 17, Namur, 5000 Belgique, faten@africamuseum.be

Sheeren, David, Laboratoire SURFACES, Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, 4000 Liège, Belgique, surfaces@geo.ulg.ac.be

Silverio, Walter, Université de Genève, Unité de télédétection et SIG, 13, rue des Maraîchers, Genève 4, 1211 Suisse, silveri9@sc2a.unige.ch

Smara, Youcef, Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111 Alger, Algérie, y.smara@mailcity.com

Smiej, Mohammed-Faouzi, Centre royal de télédétection spatiale (CRTS), 16 bis, avenue de France, Agdal, Rabat, Maroc, smiej@crts.gov.ma

Somma, Janine, Université Saint-Joseph, Laboratoire de télédétection, B.P. 175-208, Beyrouth, Liban, jsomma@syfed.lb.refer.org

Sommer, Stefan, Environment and Geoinformation, Space Applications Institute, Joint Research Centre, I-21020 Ispra (VA), Italie, stefan.sommer@jrc.it

Spichiger, Rodolphe, Conservatoire et Jardin botaniques de Genève, B.P. 60, 1292 Chambésy, Suisse

Thébaud, Gilles, Centre de recherches pour l'aménagement et l'environnement (CRENAM), Université Jean Monnet, 6, rue Basse des Rives, 42023 Saint-Étienne, France

Timoulali, Youssef, Centre National de Coordination et Planification de la Recherche Scientifique et Technique (CNCPRST), 52, av. Omar Ibn Khattab, B.P. 8027, Rabat-Agdal, Maroc, timoulali@cnr.ac.ma

Tonyé, Emmanuel, Laboratoire d'électronique et de traitement du signal (LETS), École nationale supérieure polytechnique, B.P. 8390, Yaoundé, Cameroun, tonyee@hotmail.com

Tounsi, Ibtissem, Géosystèmes / CNRS, UMR 6554, Bures-sur-Yvette, 91440 France, tounsi@ens.fr

Touré, Augustin Tiyegbo, Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Université de Cocody-Abidjan, 22 B.P. 521 Abidjan 22, Côte d'Ivoire, Tiyegbo@hotmail.com

Tran Trong Hue, Institut de géologie (CNRS), Vien Dia Chat, Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Viêt-nam, tthue@ucst.ac.vn

Weber, Christiane, Université Louis Pasteur, Image et Ville, 3, rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France, chris@lorraine.u-strasbg.fr

Zaarour, Rita, Université Saint-Joseph, B.P. 175-208, Beyrouth, Liban

Zavoianu, Florea, Université technique de constructions de Bucarest, Faculté de géodésie, Boul. Lacul Tei N° 124, secteur 2, Bucarest, 72302 Roumanie, fzavoian@pcnet.pcnet.ro

Introduction

Le Réseau Télédétection de l'AUF a plus de 10 ans et il en est à ses huitièmes journées scientifiques. Toutes ces journées ont été un succès, que ce soit celles sur les bilans régionaux et thématiques en Francophonie lors de la formation du Réseau (Sherbrooke, 1988), sur les apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse (Thiès, 1989), sur les outils micro-informatiques et la télédétection de l'évolution des milieux (Toulouse, 1990), sur la télédétection et la cartographie thématique et topographique (Montréal, 1991), sur la télédétection des ressources en eau (Tunis, 1993), sur l'utilisation de la télédétection en milieux urbain et périurbain (Liège, 1995), sur la réalité de terrain en télédétection (Sainte-Foy, 1997) et maintenant celles de Lausanne. Les journées scientifiques de Sainte-Foy venaient compléter le tour d'horizon sur les thèmes de recherche partagée que le Réseau s'est donnés. Maintenant, celles de Lausanne se devaient de tracer un bilan thématique et régional de la télédétection en Francophonie afin de pouvoir évaluer le chemin parcouru depuis le bilan de départ, en 1988.

Du 22 au 25 novembre 1999, les journées scientifiques de Lausanne ont réuni 94 participantes ou participants de 16 pays d'Europe, d'Afrique, du Machrek, d'Amérique du Nord et d'Asie et on y a donné 80 communications dont 42 orales et 38 par affiche. De plus, Jean-Michel Jaquet a dirigé un premier atelier de formation sur les mesures spectroradiométriques au sol, Otto Kölbl, a dirigé un deuxième atelier sur l'image virtuelle, Murat Kunt et Jean-Philippe Thiran ont dirigé un troisième atelier sur l'analyse morphologique d'image avec application aux images médicales, Bertrand Merminod a dirigé un atelier sur l'utilisation du GPS et François Golay a dirigé un dernier atelier sur les corrections géométriques des images. Ces ateliers ont été très appréciés tout comme d'autres ateliers du même style l'avaient été à Sainte-Foy en 1997. Malgré un bon nombre de défections de conférenciers de pays en développement que nous n'avons malheureusement pu prendre en charge, les journées ont été un grand succès tant par le thème rassembleur et chargé d'enseignement que par la qualité des travaux présentés.

Il faut ici souligner qu'un Comité de la meilleure affiche avait été mis en place. Son président était Robert Desjardins, de l'Université du Québec à Montréal (Québec), et ses collègues étaient Janine Somma, de l'Université Saint-Joseph (Liban) et Mohamed Aït Belaid, du Centre royal de télédétection spatiale (Maroc). Il y a eu quatre équipes gagnantes. Le premier prix a été attribué à Alban Bourcier (Université du Havre) et Thierry Ranchin (École de mines de Paris), le deuxième a été attribué à André Ozer, François Charlier, Damien Closson, Yves Cornet, Morgan De Dapper, Chantal De Jagger, Beata-Maria De Vlieger et Stéphane Risack (Université de Liège), le troisième prix a été attribué à Zine el Abidine El Morjani et Jean-Michel Jaquet (Université de Genève) et Noureddine Bijaber (Centre royal de télédétection spatiale du Maroc) et un troisième prix ex aequo a

été attribué à Abdelkader El Garouani (Faculté des sciences et techniques de Fès-Saïss au Maroc), et Raouf Jabrane et Abdelaziz Merzouk (Institut agronomique et vétérinaire Hassan II de Rabat); le texte de cette dernière affiche est présenté dans les actes.

Les textes de 46 communications, acceptés par le Comité scientifique, se retrouvent dans les actes. Les actes sont divisés en cinq parties : 1) 11 articles portent sur la télédétection des milieux urbains et périurbains, 2) 8 articles sur la télédétection et désertification, 3) 11 articles sur la télédétection des ressources en eau, 4) 13 articles sur les paramètres de surface et les signatures spectrales, 5) 3 articles sur les bilans régionaux de la télédétection en Francophonie.

Les quatre premières parties représentaient jusqu'à tout récemment les thèmes de recherche partagée du Réseau Télédétection. La première communication représente une mise au point sur le thème par un ou des conférenciers invités. Il a pratiquement été impossible de faire un véritable bilan thématique de la dernière décennie, mais les conférenciers invités ont quand même soulevé certains points saillants et donné des pistes de travail. À propos des thèmes traités et des travaux de recherche futurs en télédétection, 4 pistes de réflexions méritent d'être formulées : 1) l'avènement des très hautes résolutions spatiales, 2) l'utilisation récente des images radar, 3) la possibilité de géométrie et de positionnement plus précis des objets ainsi que 4) le resserrement du lien entre les systèmes d'information géographique (SIG) et les données de télédétection.

La première piste porte sur l'offre, ces dernières années, en images satellitales qui a connu des nouveautés remarquables, notamment les images à très hautes résolutions. Nous invoquons ici les 6 m du satellite indien et, depuis la fin de septembre 1999, les 3-4 m en mode multibande et 1 m en mode panchromatique des images du satellite IKONOS. Ces dernières rejoignent la plage spatiale jusqu'à présent réservée aux photographies aériennes. Si, du point de vue numérique, les algorithmes développés jusqu'à maintenant sont aptes à traiter ces images, quel en sera le réel usage ? La très haute résolution donne accès à des échelles de travail qui ne sont plus celles des inventaires de l'occupation du sol auxquels nous étions accoutumés, mais plutôt celles des constructions d'ouvrages ou des aménagements locaux. Comment intégrer ces nouvelles informations dans la conception et la réalisation de projets ? Quelles procédures développer pour une interprétation interactive ? Quelles vont être les relations avec l'imagerie aérienne ? Concurrence ou complémentarité ?

La deuxième piste porte sur l'autre extrémité du spectre électromagnétique convenant à la télédétection, soit les images radar qui sont devenues aisément accessibles depuis moins d'une décennie. Les travaux publiés à leur sujet sont riches en volume et en qualité. Cependant, hormis quelques secteurs particuliers, ces images n'ont pas encore trouvé une véritable exploitation courante hors des universités et des centres de recherche. Quelle en est la cause ? Ne conviendrait-il pas de diriger plus de réflexions sur leur contenu thématique et leur compatibilité avec les modes conventionnels de gestion du territoire plutôt que d'investir beaucoup d'effort à la recherche d'algorithmes de traitements sophistiqués sans portée pratique réellement efficace ?

La troisième piste porte sur le fait que, parallèlement à l'acquisition d'images à très haute résolution spatiale, voire à très très haute résolution si l'on intègre les images aériennes de 10 cm, la localisation d'objets à la surface du sol par positionnement par satellite (GPS) se démocratise dans le sens que les coûts se réduisent. Lequel, de l'image ou du GPS, est-il le plus apte à nous fournir la géométrie des objets et leur positionnement ? Pour poser la question de façon moins binaire, quelle est la complémentarité entre les deux systèmes ? Il y aurait lieu de parcourir les besoins en gestion du territoire et de préciser à ce sujet des méthodologies sur l'acquisition des informations géométriques, d'une part, et thématiques, d'autre part.

La dernière piste porte sur le rôle du Réseau Télédétection en matière de SIG. En effet, à plusieurs reprises, ces dernières années, la question s'est posée s'il n'aurait pas été plus profitable pour la recherche et les services à la communauté que nous sommes tous appelés à rendre, d'associer plus étroitement les SIG et la télédétection dans le Réseau. Les récents développements de logiciel et de méthodes associées aux SIG confirment le bien-fondé de cette interrogation. Il conviendrait que les institutions d'enseignement qui n'ont pas encore franchi le pas de cette intégration le fasse au plus vite.

Dans le cas de la dernière partie, nous ne présentons que les bilans Amérique du Nord, Afrique subsaharienne et Europe Centrale-Europe de l'Est par défection des personnes pressenties pour les bilans Europe de l'Ouest, Asie du Sud-Est et Afrique du Nord. Il est donc difficile d'obtenir le bilan souhaité au départ puisque la vision actuelle des acquis et des besoins pour développer la télédétection en Francophonie est encore trop partielle. À titre d'exemple, on peut prendre comme base la répartition géographique des 112 auteurs et coauteurs des actes, lesquels proviennent de 19 pays répartis comme suit : 21 % d'Afrique du Nord et du Machrek, 21 % d'Afrique subsaharienne, 11 % d'Amérique du Nord, 44 % d'Europe de l'Ouest et 3 % d'Europe Centrale et d'Europe de l'Est. Cette répartition montre que les bilans régionaux publiés ne touche pas les 65 % de participants d'Afrique du Nord et d'Europe de l'Ouest, ainsi que ceux d'Asie du Sud-Est.

En terminant, nous voulons remercier toutes les collaboratrices et tous les collaborateurs du Comité de réseau, du Comité d'organisation, Comité scientifique, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (ÉPFL) et de l'AUF, ainsi que les conférenciers et les participantes et participants qui ont fait de cet événement un si grand succès. Nous avons apprécié de façon particulière le soutien financier et la grande collaboration de l'ÉPFL ainsi que le soutien financier de Gordon & Breach et de MFB-ERDAS Suisse. Nous tenons à remercier de façon particulière le travail de Khalef Boulkroune, de Sophie Hiéret et de Joël Jallais du bureau Europe de l'AUF, de François Golay, directeur, de Véronique Boillat-Kireev, secrétaire, et de Jean-Robert Gros, concepteur de logos et de textes, au Département de génie rural de l'ÉPFL, ainsi que les étudiantes et étudiants de l'ÉPFL : Abram Pointet, Camilla Moreni, Daniel Gnerre, Frédéric Hugon, David Kaelin et Bettina Schaefli.

Enfin, un grand merci va à ceux qui ont appuyé le coordonnateur au CARTEL de l'Université de Sherbrooke depuis le début et jusqu'en août 1999, soit successivement Pierre Lafrance, François Boivin et André Lavoie.

La série des journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF se poursuivra, en 2001, avec celles de Yaoundé dont le thème n'est pas encore défini. La publication d'actes est également prévue à la suite de cet événement dans la même collection.

Jean-Marie M. Dubois
Université de Sherbrooke
Coordonnateur du Réseau Télédétection de l'AUF

Régis Caloz
École polytechnique fédérale de Lausanne
Responsable des journées scientifiques de Lausanne

PARTIE I

Télédétection des milieux urbains et périurbains

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 3-13

1

La télédétection urbaine à l'aube de la très haute résolution spatiale

JEAN-PAUL DONNAY[1], CLAUDE COLLET[2] et CHRISTIANE WEBER[3]

[1] *Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20 Août, B-4000 Liège, Belgique; téléphone : +32-(0)4-366.54.24; télécopieur : +32-(0)4-366.56.93; courriel : donnay@geo.ulg.ac.be*

[2] *Institut de géographie, Université de Fribourg, Pérolles - CH-1700 Fribourg, Suisse; téléphone : +41-(0)26-300.90.23; télécopieur : +41- (0)26-300.97.46; courriel : claude.collet@unifr.ch*

[3] *IMAGE et VILLE (UPRES-A 7011), Faculté de géographie, Université Louis Pasteur, 3 rue de l'Argonne, F-67000 Strasbourg, France; téléphone : +33-(0)388.45.65.21; télécopieur : +33-(0)388.45.33.88; courriel : chris@lorraine.u-strasbg.fr*

Résumé

L'émergence et la reconnaissance de la télédétection urbaine apparaissent liées à l'amélioration continuelle de la résolution spatiale offerte par les générations successives de capteurs. On rappelle ici l'évolution de la discipline, en soulignant les innovations méthodologiques et en indiquant les applications jugées aujourd'hui opérationnelles. On constate ainsi le résultat d'une quinzaine d'années de travaux scientifiques diversifiés, mais aussi le caractère contingent des données de télédétection dans les applications urbaines. Le devenir de la télédétection urbaine est enfin imaginé à travers l'exploitation d'une nouvelle génération de capteurs.

1. Émergence de la télédétection urbaine

Très tôt, la télédétection aéroportée a été utilisée par toutes les disciplines ayant pour objet d'étude le milieu urbain, qu'il s'agisse, par exemple, de géographie (RIMBERT, 1973) ou d'urbanisme (CANTAT, 1987; GARRY, 1992). L'exploitation analogique de la photographie aérienne a ainsi permis d'identifier les contraintes de l'analyse et de fixer les critères de qualité de la télédétection urbaine. Les contraintes sont introduites tant par le système d'enregistrement de l'information (échelle et résolution des clichés, filtres éventuels, etc.) que par l'environnement urbain proprement dit (dimensions des objets et hétérogénéité des matériaux, ombres portées, pollution, etc.). Les critères de qualité, quant à eux, sont essentiellement exprimés en termes d'exactitude de position, en deux ou en trois dimensions (en photogrammétrie), alors que la précision sémantique de l'information repose presque exclusivement sur l'art du photo-interprète. Ce sont les conditions qui prévalent lorsqu'apparaissent les premières images satellitaires, qui semblent bien loin de pouvoir concurrencer, et encore moins se substituer, à la photographie aérienne dans un tel environnement d'application.

Dans les années 1970, la trop faible résolution spatiale du capteur MSS constitue manifestement une contrainte empêchant l'emploi des images dans des applications urbaines. Les autres facteurs, liés par exemple à la radiométrie, ne sont même pas évoqués, de sorte que les spécifications relatives aux nomenclatures urbaines d'occupation du sol ignorent purement et simplement l'apport potentiel de la télédétection satellitaire. L'interprétation de photographies à grande échelle reste la règle et permet, dans une certaine mesure, de maintenir un savant mélange entre usage et occupation physique du sol dans les nomenclatures proposées (ANDERSON *et al.*, 1976; JENSEN, 1983).

Afin d'élargir les capacités d'analyse d'une nouvelle génération de capteurs, plusieurs travaux sont consacrés à la détermination de la résolution nécessaire à l'étude des objets urbains, prenant en compte leur taille, leur densité et leurs contrastes caractéristiques. Ainsi, en Amérique du Nord, avec des entités urbaines de grande taille, montrant des contrastes francs, on a pu estimer qu'une résolution de 20 à 30 m constituait un bon compromis (CLARCK, 1980; WELCH, 1982). Cependant, l'analyse de la contamination radiométrique entre pixels voisins montre rapidement qu'une résolution plus fine est nécessaire pour passer de la détection à l'identification des objets (FORSTER, 1983; BAUDOT, 1997). C'est ainsi, qu'avec les analyses menées sur les images MSS et les premières images TM, on détecte seulement l'emprise de l'urbanisation ou l'avancée du front urbain au détriment des milieux agricole ou naturel environnants, tant dans les pays développés que dans ceux en voie de développement (COLVOCORESSES, 1985; WILMET, 1987). Les capacités thermographiques du capteur TM sont également exploitées dans des études de micro-climats urbains ou de pollution urbaine (CANTAT, 1987). Mais, à quelques exceptions près, par exemple OLIVA et HUSSON (1982), ces premiers travaux cherchent rarement à identifier les « masses » urbaines ainsi détectées. Dans cet ordre des choses, et comme on l'indique dans diverses études de faisabilité (COLWELL and POULTON, 1984; MILAZZO and DEANGELIS, 1984) et les études pilotes de l'époque (FORSTER *et al.*, 1988; MALAN *et al.*, 1988; QUARMBY *et al.*, 1988), l'apparition du satellite SPOT doit permettre à la télédétection urbaine de s'affirmer dès le milieu des années 1980, grâce à son capteur HRV offrant une double résolution [10 m en panchromatique (P) et 20 m en multispectral (XS)].

2. Phase des recherches méthodologiques

Avec les images HRV, on espère passer de la simple détection à l'identification, voire de l'identification à l'analyse. Il est vrai que l'image panchromatique ressemble à une photographie aérienne à petite échelle, invitant à l'interprétation analogique, à la résolution des structures et à l'exploitation de la texture urbaine. Par contre, les images multispectrales (XS) montrent rapidement leurs limites. La résolution spatiale de 20 m et la disponibilité de seulement trois bandes spectrales, dont deux très corrélées, ne parviennent pas à satisfaire pleinement les exigences des classifications des modes d'occupation du sol en milieu urbain et péri-urbain. Par conséquent, des efforts méthodologiques considérables sont consentis pour améliorer les performances des analyses. Depuis près de quinze ans, les applications urbaines se trouvent ainsi mêlées très étroitement aux techniques de pointe du traitement d'images de télédétection.

2.1. Analyses multisources

Une première tentative pour augmenter les performances de l'analyse consiste à améliorer artificiellement la résolution spatiale des images multispectrales. Lorsque l'application a pour objectif la classification, les images multispectrales, HRV (XS) ou TM, sont simplement rééchantillonnées au pas de l'image panchromatique. Au fur et à mesure de leur disponibilité, des images panchromatiques de résolution de plus en plus fine sont utilisées : outre les images HRV (P), celles enregistrées par les satellites IRS (*Indian Remote Sensing Satellite*) ou Kosmos sont aussi employées, banalisant ainsi les traitements multi-sources en télédétection urbaine. Si l'application envisagée consiste en la réalisation d'une composition colorée, où trois canaux seulement sont permis, l'intégration des images panchromatiques à haute résolution dans les images multispectrales implique un processus de fusion. Parmi ceux-ci plusieurs variantes de la substitution de canaux via une conversion du référentiel des couleurs RVGB-TSI-RVB (RVB : rouge, vert, bleu; TSI : teinte, saturation, intensité) et la technique reposant sur une transformation en ondelettes sont aujourd'hui les plus pratiquées. Les premières ont la possibilité de contrôler localement les variations de contraste (DE BÉTHUNE *et al.*, 1998), tandis que la seconde a l'avantage de pouvoir conserver la radiométrie originale des canaux fusionnés (WALD *et al.*, 1997; POHL and VAN GENDEREN, 1998). Il est significatif de noter que l'intégration par fusion des premières photographies satellitaires Kosmos, numérisées à des résolutions de 2 à 5 m, a pour principal objectif la réalisation de spatiocartes d'agglomérations urbaines en compositions colorées, telles que Berlin, Munich (GAF, 1993) ou Varsovie (KACZYNSKI *et al.*, 1995). Les compositions à haute résolution obtenues par fusion ont atteint une qualité suffisante pour favoriser le retour des techniques d'interprétation visuelle, remises au goût du jour sous l'appellation de photo-interprétation assistée par ordinateur ou PIAO (LENCO, 1997), ou encore plus générale d'interprétation d'image assistée par ordinateur IIAO (COLLET, 1999).

2.2. Adaptation des procédures de classification automatique

Afin d'enrichir l'information de départ, les chercheurs se penchent sur la construction et l'interprétation de pseudo-canaux de texture (RIMBERT, 1984; COULOMBE *et al.*, 1989) ou de pseudo-canaux résultant de divers indices de végétation, analysant, en quelque

sorte, la ville « en négatif » (COLLET et ABEDNEGO, 1987; BANNARI *et al.*, 1997). Les techniques statistiques de classification sont elles-mêmes révisées. Ainsi, la prise en compte des probabilités *a priori* et la fixation des probabilités *a posteriori* par itérations font l'objet de recherches diverses (BARNSLEY and BARR, 1996). La résolution spatiale reste pourtant une difficulté : les pixels urbains persistent à mélanger différentes affectations (mixels) et des stratégies distinctes de classification sont envisagées. À l'échelle du sous-pixel, des méthodes nouvelles (classifications floues, réseaux de neurones, algorithme de Dempster-Schafer, etc.) sont censées détecter les combinaisons des modalités de la classification, tout en vérifiant la complétude des nomenclatures et l'homogénéité des sites d'entraînement (ZANG and FOODY, 1998; HE and COLLET, 1999; HE *et al.*, 1999). À l'inverse, des techniques de classification par zones sont élaborées, utilisant une segmentation préalable de l'image, sur base des contrastes (COLLETTE *et al.*, 1991) ou des variations d'un indice de végétation par exemple (TERRETTAZ, 1998). À la limite, la segmentation est dictée par un découpage arbitraire, tel que celui des quartiers statistiques, autorisant la prise en compte de multiples variables exogènes (WEBER *et al.*, 1990; HARRIS and VENTURA, 1995).

2.3. Modélisation et analyse spatiale

Les techniques sophistiquées de classification, appliquées à des images multispectrales à la résolution améliorée, permettent de délimiter et d'identifier les principaux types de couvertures du sol au sein du tissu urbain. Mais, dans bien des applications, la classification des seuls canaux radiométriques et des pseudo-canaux qui en sont issus ne peut conduire qu'à des résultats incomplets ou insatisfaisants. Si, en sciences naturelles, agronomie, foresterie, et même en planification physique, une valeur d'usage peut être accordée à une portion du sol en fonction de ses caractéristiques physiques, la valeur d'échange de l'espace urbain, une fois celui-ci identifié, est fixée par des critères sociaux, économiques et même spatiaux (par exemple la rente de situation) qui échappent totalement aux mesures physiques des capteurs. Pour dépasser l'aspect strictement biophysique des résultats des classifications, qu'elles soient automatiques ou visuelles, la télédétection urbaine doit s'ouvrir sur des démarches nouvelles, relevant de l'analyse et de la modélisation spatiales. Intégrés au sein d'un système d'information, les résultats des traitements de télédétection fournissent ou précisent la référence spatiale de multiples données géographiques et permettent la mise en œuvre de modèles spatiaux statiques ou dynamiques, tels que les modèles densimétriques et de potentiel par exemple (WEBER et HIRSCH, 1989; DONNAY, 1992; LANGFORD and UNWIN, 1994; NADASDI, 1995; COLLET *et al.*, 2000).

3. Caractère opérationnel de la télédétection urbaine

Un certain nombre de signes laissent entendre que la télédétection urbaine a aujourd'hui, sinon atteint un stade de maturité, au moins engrangé quelques résultats concrets. La publication de plusieurs ouvrages (DUREAU et WEBER, 1995; WEBER, 1995) et l'organisation de plusieurs colloques internationaux, parmi lesquels celui du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF (DUBOIS *et al.*, 1997) ont récemment permis de faire le point sur plus de dix ans d'efforts méthodologiques. Dans un volumineux rapport, le *Centre for Earth Observation* (CEO) évalue les très nombreux domaines où la télédétection présente des potentialités en faveur des villes (GALAUP, 1997). Mais plus encore, c'est

l'inscription de la télédétection urbaine au rang des moyens requis par des programmes nationaux et internationaux qui donne à celle-ci son caractère opérationnel.

Il est clair que toutes les applications qui sont directement liées à un phénomène physique perceptible par les capteurs de télédétection, présentent le même degré d'opérationnalité en milieu urbain, qu'à l'extérieur de celui-ci. Au rang de ces applications, on peut citer les études des îlots de chaleur et de la pollution au-dessus des villes, menées par thermographie (POLI *et al.*, 1994; GILG et BILDGEN, 1994; LO *et al.*, 1997; CORNÉLIS *et al.*, 1998; NICHOL, 1998) et celles relatives aux espaces verts urbains (THIBAULT et GUILLARD, 1986; WEBER, 1998; RICHMAN, 1999).

Dans le même ordre d'idées, l'analyse des écosystèmes urbains, ou de l'environnement urbain, reposant sur une classification non fonctionnelle de l'occupation du sol, le plus souvent obtenue par PIAO, est aujourd'hui courante. Initiées sur diverses grandes agglomérations (GAMBA et POITEVIN, 1990; NASCIMENTO, 1992), ces études sont à présent menées à grande échelle sur de nombreuses villes moyennes (LENCO, 1997)

L'identification et la délimitation des espaces bâtis réservés à la résidence constituent des tâches de difficulté très variable selon les risques de confusions fonctionnelles propres aux milieux observés. Dans les villes des pays en voie de développement, généralement pauvres en données géographiques, la technique qui consiste à utiliser l'espace résidentiel observé par télédétection comme support d'enquêtes démographiques est maintenant régulièrement mise en pratique (DUREAU *et al.*, 1989; DUREAU, 1995). En Europe, à l'instigation de l'agence statistique européenne (EUROSTAT, 1995), plusieurs pays ont recours à des traitements d'analyse spatiale, incorporant données de télédétection et données exogènes, pour délimiter les agglomérations urbaines et assurer le suivi de la dynamique des quartiers statistiques (FANOUILLET, 1994; BINARD *et al.*, 2000).

Enfin, il faut signaler que les spatiocartes ou orthoimages, en fonction des corrections géométriques effectuées, formées par des compositions colorées, sont particulièrement appréciées en milieu urbain. Tout particulièrement, les compositions à haute résolution obtenues par fusion constituent un support de travail efficace aux échelles communes des études d'aménagement du territoire.

4. Nouveaux capteurs

Depuis quelques années, on sait que l'offre en imagerie satellitaire est appelée à se diversifier considérablement, notamment dans le domaine de la très haute résolution géométrique (APLIN *et al.*, 1997). En dépit des retards inhérents à tous les programmes spatiaux et de plusieurs échecs successifs de lancement, on doit s'attendre à disposer à court terme d'images panchromatiques et multispectrales de résolution inférieure à 5 m et, dans certains cas, avec des possibilités de stéréoscopie. En toute logique, la télédétection urbaine devrait constituer le premier bénéficiaire d'une telle innovation.

Au regard des applications énumérées aux sections précédentes, et tout particulièrement celles jugées opérationnelles, cette amélioration sensible de la résolution n'est pourtant pas pleinement exploitable. Il est évident que des compositions colorées à très haute résolution constitueraient un support d'autant meilleur pour l'interprétation visuelle, malgré quelques difficultés techniques supplémentaires. Ainsi, une orthorectification des images risque fort de s'avérer indispensable dans tous les cas, tandis que les coordonnées des points de contrôle devront sans doute être mesurées au GPS sur le terrain, l'exactitude requise dépassant les normes de qualité de la plupart des cartes de base (BILLEN *et al.*, 2000). En outre, la taille des fichiers-images pourrait s'avérer assez considérable et constituer un

frein, au moins temporairement, aux traitements numériques. En ce qui concerne les classifications automatiques, les avantages sont difficiles à prévoir. Si quelques cas de mixels ont des chances d'être résolus (JENSEN and COWEN, 1999), c'est sans doute au prix d'une plus grande hétérogénéité et, par là d'une identification plus difficile, des affectations les plus couvrantes. Mais quels que soient les avantages que peuvent tirer les classifications, visuelles ou automatiques, des images à très haute résolution, il faut se souvenir que l'utilité de ces classifications passe par leur intégration dans des systèmes d'information. Or, ceux-ci ne se préoccupent pas d'une extrême qualité géométrique, limités qu'ils sont par des critères d'un tout autre ordre, tels que le secret statistique des données, la prise en compte d'objets non matérialisés et de limites abstraites, etc.

Il est un autre domaine vis-à-vis duquel la disponibilité d'images à très haute résolution et aux capacités stéréoscopiques pourrait s'avérer capitale. C'est celui de la restitution bi- et tridimensionnelle des objets urbains. Depuis l'apparition des images panchromatiques décamétriques, de nombreuses recherches ont été menées pour extraire de façon automatique ou semi-automatique soit les objets linéaires (les éléments du réseau routier par exemple), soit les contours d'objets polygonaux massifs. COULOIGNER (1998) présente une bonne analyse critique de ces méthodes qui, jusqu'ici, sont souvent restées au stade expérimental. L'apparition d'images stéréoscopiques de résolution métrique permettrait de poser le problème dans un contexte méthodologique totalement différent : celui de la photogrammétrie numérique. Une véritable restitution en deux ou trois dimensions des objets isolés, tels les voiries ou les bâtiments, devrait garantir une qualité spatiale des données suffisante pour la plupart des travaux de nature urbanistique. En outre, la propriété synoptique de l'image satellitaire ajoute à la possibilité de traiter des gabarits urbains, dont l'élaboration est aujourd'hui requise pour résoudre des problèmes de télécommunications, d'environnement ou pour les grands projets d'infrastructure (OEEPE, 1996). Le potentiel de ce type d'images satellitaires a été très sérieusement évalué par l'*Ordnance Survey* sur des données de simulation (RIDLEY *et al.*, 1997). Ces études laissent entrevoir un développement considérable de ce nouveau domaine de la télédétection urbaine, pourvu que suivent les outils de traitements (photogrammétrie satellitaire et SIG 3D par exemple) et que les images arrivent, enfin, avec les performances annoncées.

5. Conclusion

L'efficacité de la télédétection urbaine peut être évaluée dans le cadre général de la qualité des données géographiques. Le schéma courant considère le producteur de données, responsable de la « qualité interne » des données (respect des spécifications de production), face à l'utilisateur des données, jugeant la « qualité externe » des données sur base de leur adéquation à leur utilisation finale (*fitness for use*) (GUPTILL and MORRISON, 1995). Or, en télédétection, les données primaires sont transformées en données secondaires (tels les résultats de classifications) avant d'entrer dans l'application finale de l'utilisateur et, en télédétection urbaine tout particulièrement, l'utilisateur final est rarement le producteur de données secondaires. Il s'ensuit des modèles de référence distincts et, par conséquent, des ambiguïtés lors de l'évaluation de la qualité des données qui ont pu faire douter de la signification de la télédétection urbaine.

Les termes de référence de l'utilisateur ont été posés par comparaison avec les résultats atteints par la photo-interprétation et la photogrammétrie. On constate que la quête d'une résolution toujours plus fine et le recours privilégié à la PIAO ont réconcilié la télédétection satellitaire avec le modèle de référence de l'utilisateur basé sur la démarche de photo-

interprétation d'images analogiques. L'avènement des capteurs à très haute résolution spatiale et la mise en œuvre d'une véritable photogrammétrie satellitaire devraient à court terme rapprocher le modèle de données satellitaires de celui posé dans le cadre de la photogrammétrie traditionnelle.

Maintenant que l'utilisateur et le producteur de données (secondaires) semblent en phase, il est légitime d'attendre de ce dernier qu'il documente ses informations et ses performances, de sorte que l'utilisateur puisse exercer, à son niveau, son propre contrôle de qualité. En termes de qualité géométrique des données-images, on en est déjà au stade de la normalisation des métadonnées (groupe de travail 1 du comité technique 211 de l'ISO). Par contre, la description et l'évaluation des différents paramètres formant la qualité sémantique des données sont plus longues à mettre en place (Commission sur la cartographie dérivée de l'imagerie satellitaire de l'Association cartographique internationale; voir aussi MISHRA *et al.*, 1999). On peut cependant espérer rendre toute leur portée aux expressions bien connues, mais longtemps équivoques, du « risque du producteur » et du « risque de l'utilisateur ».

Au terme de ce tour d'horizon de la télédétection urbaine, il nous semble avoir été bien incomplet, et très arbitraire dans la sélection. Des pans entiers de la discipline ont été négligés, tels que l'exploitation de l'imagerie radar, intéressante notamment pour son aspect textural, ou les techniques particulières d'analyses diachroniques, qui trouvent un terrain d'application privilégié en milieu périurbain (LE TOURNEAU, 1999). Les références citées ignorent vraisemblablement des communications fondamentales et traduisent sans doute la relative facilité d'accès à la littérature. Elles s'efforcent au moins de souligner les contributions des auteurs francophones et l'on comprendra aisément qu'il ne pouvait être question d'être exhaustif dans le cadre d'un simple article. Il ne nous semblait pourtant pas inutile d'effectuer cette courte synthèse, à l'heure où la télédétection urbaine pourrait bien suivre deux démarches distinctes, l'une confondue avec la photogrammétrie numérique, l'autre indissociable des systèmes d'information géographique.

6. Références

ANDERSON, L.L., HARDY, E.E., ROACH, J.T. and WITMER, R.E. 1976. A Land Use and Land Cover Classification System for use with Remote Sensor Data. US Geological Survey Professional Paper, n° 964.

APLIN, P., ATKINSON, P.M. and CURRAN, P.J. 1997. Fine spatial resolution satellite sensors for the next decade. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n° 18, p. 3873-3882.

BANNARI, A., MORIN, D. et HE, D.-C. 1997. Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide d'indices de végétation dérivés à partir de données de hautes résolutions spatiale et spectrale. *In* DUBOIS J.-M., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.) Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éditions AUPELF, Montréal, p. 47-64.

BARNSLEY, M.J. and BARR, S.L. 1996. Inferring Urban Land Use from Satellite Sensor Images Using Kernel-Based Spatial Reclassification. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 62, n° 8, p. 949-958.

BAUDOT, Y. 1997. L'influence de la résolution effective des données télédétectées sur les possibilités d'analyse des milieux urbains complexes. *In* DUBOIS J.-M., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.) Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éditions AUPELF, Montréal, p. 3-13.

BILLEN, R., CORNÉLIS, B., SHEEREN, D., DONNAY, J.-P.et PANTAZIS, D. 2000. Influence de la précision absolue des points d'amer sur la qualité de la géoréférenciation des images à très haute résolution. *In* DUBOIS, J.-M., CALOZ, R. et GAGNON, P. (réd.) La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éditions Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, p. 15-22.

BINARD, M., JAMAGNE, P. et MULLER, F. 2000. Utilisation des données satellitaires pour l'actualisation décennale du découpage en secteurs statistiques du territoire de la Belgique. *In* DUBOIS, J.-M., CALOZ, R. et GAGNON, P. (réd.) La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éditions Agence universitaire de la Francophonie, p. 23-31.

CANTAT, O. 1987, Télédétection spatiale et microclimats : le cas de la région Île-de-France. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France, Paris, 190 p.

CLARCK, J. 1980. The Effect of Resolution in Simulated Satellite Imagery on Spectral Characteristics and Computer Assisted Land Use Classification. Rapport du Jet Propulsion Laboratory, p. 75-22.

COLLET, C. 1999. Vers un système d'assistance à l'interprétation d'images numériques de télédétection (IIAO). Colloque international télédétection et géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux, 67e Congrès de l'ACFAS, Ottawa, 10-12 mai 1999.

COLLET, C. et ABEDNEGO, B. 1987. L'évolution du paysage urbain étudiée à l'aide d'un indice de végétation. *In* DONNAY J.-P. (réd.) Télédétection satellitaire et espaces urbains. Notes de recherches de la Société Géographique de Liège, n° 9, p. 3-16.

COLLET, C., DONNAY, J.-P. et WEBER, C. 2000. Démarches de reconnaissance des formes urbaines et transfert méthodologique Nord - Sud (Europe - Afrique). *In* DUBOIS, J.-M., CALOZ, R. et GAGNON, P. (réd.) La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éditions Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, p. 41-48.

COLLETTE, B., NADASDI, I. et DONNAY, J-P. 1991. Essai de discrimination du tissu urbain par segmentation d'image. Mappemonde, n° 4, p. 31-35.

COLVOCORESSES, A. 1985. Mapping of Washington D.C. and Vicinity with the Landsat 4 T.M. EARSeL News, août 1985, p. 43-46.

COLWELL, R.N. and POULTON, C.E. 1984. SPOT simulation imagery for urban monitoring - A comparison with Landsat TM and MSS imagery and with high altitude color infrared photography. SPOT simulation applications handbook - Proceedings of the 1984 SPOT Symposium, Scottsdale (Arizona), SPOT Image Corporation, Washington, p. 139-147.

CORNÉLIS, B., BINARD, M. et NADASDI, I. 1998. Potentiels urbains et îlots de chaleur. Publications de l'Association internationale de climatologie, vol. 10, p. 223-229

COULOIGNER, I. 1998. Reconnaissance des formes dans des images de télédétection en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, p. 98 + annexes.

COULOMBER, A., CHARBONNEAU, L., BROCHU, R., MORIN, D. et RHEAULT, M. 1989. Révision cartographique et analyse de texture : essais méthodologiques sur la frange urbaine. *In* BERNIER R., BONN F. et GAGNON P. (réd.) Télédétection et Gestion des Ressources, vol. 6, L'association québecoise de télédétection, p. 103-113.

DE BÉTHUNE, S., MULLER, F. and BINARD, M. 1998. Adaptive intensity matching filters : a new tool for multi-resolution, data fusion. AGARD Conference Proceedings 595, Multi-Sensor Systems and Data Fusion for Telecommunications, Remote Sensing and Radar, Lisbon (Portugal), 29 September - 2 October 1997, p. 28-1-28-15

DONNAY, J.-P. 1992. Applications de la télédétection satellitaire à l'aménagement du territoire et à l'urbanisme. *In* Centre National d'Études Spatiales (réd.) Télédétection spatiale. Cépaduès-Éditions, Toulouse, p. 221-241.

DUBOIS, J.-M., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.) 1997. Télédétection des milieux urbains et périurbains. Collection Universités francophones - Actualités scientifiques, éditions AUPELF-UREF, Montréal, 361 p.

DUREAU, F. 1995. Images satellite et démographie : Présentation d'une nouvelle méthode de production d'information sur les populations citadines. *In* DUREAU, F. et WEBER, C. (réd.) Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Paris, p. 271-284.

DUREAU, F., BARBARY, O., MICHEL, A. et LORTIC, B. 1989. Sondages aréolaires sur image satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain. Manuel de formation, Éditions de l'ORSTOM, Paris.

DUREAU, F. et WEBER, C. (réd.) 1995. Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Paris, 379 p.

EUROSTAT, 1995. Projet pilote – Délimitation des agglomérations européennes par télédétection. Résultats et conclusions. EUROSTAT : Document statistique, Office des publications officielles des Communautés européennes, Thème 3, Série D, Luxembourg.

FANOUILLET, J.-C. 1994. Essai d'utilisation de la télédétection pour la délimitation des unités urbaines. Série des documents de travail de la Direction des Statistiques Démographiques et Sociales, F9407, INSEE, Paris, 56 p. + annexes.

FORSTER, B.C. 1983. Some urban measurements from Landsat data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 49, n° 12, p. 1693-1707.

FORSTER, B.C., SMITH, C., FARRINGTON, R. and JONES, C. 1988. Mapping and urban multi-experimental. Assessment of SPOT - Urban results. *In* Centre National d'Études Spatiales (réd.) SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Cépaduès-Éditions, Toulouse, p. 669-674.

GAF, 1993. Satellitenbildkarte 1:25 000, 7835 München. Angewandte Fernerkundung mbH, Munich.

GALAUP, M. 1997. User workshops to define the requirements of town/city local government departments. The European Community Joint Research Centre, Space Applications Institute, document HDB/97504sg. CEO RGC9D, 2 volumes.

GAMBA, A. et POITEVIN, J. 1990. La télédétection satellitaire au service d'un observatoire urbain de l'aire métropolitaine de Buenos Aires. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France, Paris, 15 p. + annexes.

GARRY, G. (réd.) 1992. Environnement et aménagement - 3. L'usage des photographies aériennes. Les éditions du STU, Paris, 154 p.

GILG, J.-P. et BILDGEN, P. 1994. Analyse et étude de la thermicité de la région parisienne à travers l'imagerie Landsat. Ministère de l'Environnement, Paris.

GUPTILL, S.C. and MORRISON, J.L. (réd.) 1995. Elements of spatial data quality. Publié au nom de l'Association Cartographique Internationale. Elsevier Sciences, Oxford, 202 p.

HARRIS, P.M. and VENTURA, S.J. 1995. The Integration of Geographic Data with Remotely Sensed Imagery to Improve Classification in an Urban Area. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 61, n° 8, p. 993-998.

HE, H. and COLLET, C., 1999. Combining spectral and textural features for multispectral image classification with artificial neural networks. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, Part 7-4-3 W6.

HE, H., COLLET, C. and SPICHER, M., 1999. Evaluation and Comparison of two Fuzzy Classifiers for Multi-Spectral Imagery Analysis. IGARSS'99, Hambourg.

JENSEN, J.R. (réd.) 1983. Urban/Suburban Land Use Analysis. *In* ESTES, J.E. and THORLEY, G.A. (réd.) Manual of Remote Sensing, vol. 2. American Society of Photogrammetry, Falls Church, p. 1571-1666.

JENSEN, J.R. and COWEN, D.C. 1999. Remote Sensing of Urban/Surburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 65, n° 5, p. 611-622.

KACZYNSKI, R., DONNAY, J-P. and MULLER, F. 1995. Satellite image maps of Warsaw in the scale 1:25,000. EARSeL Advances in Remote Sensing, vol. 4, n° 2, p.100-103 + 1 pl. h.t.

LANGFORD, M. and UNWIN, D.J. 1994. Generating and mapping population density surfaces with a geographical information system. The Cartographic Journal, vol. 31, p. 21-26.

LENCO, M. 1997. Étude par télédétection des écosystèmes urbains des grands agglomérations françaises à l'échelle du 1 : 25 000. *In* DUBOIS, J.-M. ., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.) Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éditions AUPEF-UREF, Montréal, p. 191-206.

LE TOURNEAU, F. M. 1999, Utilisation d'une séquence d'images ERS et d'une méthode d'extraction automatique des zones urbaines pour le suivi de la croissance de la ville de MCAPA (Amapa , Brésil). Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (sous presse).

LO, C.P., QUATTROCHI, D.A. and LUVALL, J.C. 1997. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n° 2, p. 287-304.

MALAN, O.G., ERASMUS, P.F. and FOURIE, C. 1988. Comparison of SPOT, Landsat TM and combined data for urban studies. *In* Centre National d'Études Spatiales (réd.) SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Cépaduès-Éditions, Toulouse, p. 681-687.

MILAZO, V.A. and DEANGELIS, R.H. 1984. Applications of simulated SPOT data to mapping land cover patterns and changes in an urban fringe environment. SPOT simulation applications handbook. Proceedings of the 1984 SPOT Symposium, Scottsdale (Arizona), SPOT Image Corporation, Washington, p. 177-186.

MISHRA, J.K., PERMANA, D.S., NAKAJIMA, T., YUASA, T. and AKATSUKA, T. 1999. Remotely Sensed Data based Information System : Considerations for Unvertainty, Errors and Limitations. *In* SHI, W., GOODCHILD, M.F. and FISHER, P.F. (réd.) Proceedings of The International Symposium on Spatial Data Quality '99, Hong Kong, 1999. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, p. 605-615.

NADASDI, I. (1995). Inventaires biophysiques de l'occupation du sol et pratique des plans d'organisation du territoire : expériences de l'Euregion Meuse-Rhin, de la Wallonie et du Grand-Duché de Luxembourg. Jornadas tecnicas sobre sistemas de informcion geografica y teledeteccion espacial a la ordenacion del territorio y el medio ambiente, Vitoria-Gasteiz, 21-24 November 1994, p. 171-198.

NASCIMENTO, I. 1992. Rio de Janeiro. L'imagerie satellitaire, un outil prospectif pour l'aménagement urbain et rural. Rapport de synthèse 1989-1992. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France, Paris, 70 p. + annexes.

NICHOL, J.E. 1988. Visualisation of urban surface temperatures derived form satellite images. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 9, p. 1639-1650.

OEEPE, 1996. Survey on 3D-City Models. Organisation Européenne d'Études Photogrammétriques Expérimentales (OEEPE) and Institute of Photogrammetry of the University of Bonn, http://www.ipb.uni-bonn.de/OEEPE/oeepe.html, consultation le 10 août 1999.

OLIVA, P. et HUSSON, P. 1982. Classification supervisée des ensembles urbains et péri-urbains de la région d'Aix-en-Provence. Aspects méthodologiques. Journées de télédétection en milieu urbain, 6-7 mai 1982, C.N.R.S., p. 28-42.

POHL, C. and VAN GENDEREN, L. 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 5, p. 823-854.

POLI, U., PIGNATARO, F., ROCCHI, V. and BRACCO, L. (1994) Study of the heat island over the city of Rome from Landsat-TM satellite in relation with urban pollution. *In* VAUGHAN R. (réd.) Remote sensing from research to operational applications in the new Europe. Proceedings of the 13th EARSeL Symposium, Dundee, 28 June-1 July 1993, p. 413-42

QUARMBY, N.A., TOWNSHEND, J.R.G. and CUSHNIE, J.L. 1988. Monitoring urban land cover changes at the urban fringe from SPOT HRV imagery in South-East England. Centre National d'Études Spatiales (réd.) SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Cépaduès-Éditions, Toulouse, p. 575-582.

RICHMAN, A. 1999. Urban Releaf. CEO Product Development and Marketing projects. http://ewse.ceo.org/anonymous/vfs.pl?id=889117&name=summary.PDF, consultation le 10 août 1999.

RIDLEY, H.M., ATKINSON, P.M., APLIN, P., MULLER, J.-P. and DOWMAN, I. 1997. Evaluating the potential of the forthcoming commercial U.S. high-resolution satellite sensor imagery at the Ordnance Survey, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 63, n° 8, p. 997-1005.

RIMBERT, S. 1973. Les paysages urbains. Collection Uprisme, Armand Colin, Paris, 240 p.

RIMBERT, S. 1984. Des néo-variables polygéniques au secours d'une image hivernale, L'espace géographique, n° 3, p. 185-200 et 299-300.

TERRETTAZ, P. 1998. Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitales SPOT HRV. Application aux villes de Genève, Strasbourg et Liège. Thèse de doctorat, Université de Fribourg (Suisse), 304 p.

THIBAULT, C. et GUILLARD, H. 1986. Mesurer la végétation urbaine par télédétection. Du satellite au terrain. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France, Paris, 82 p.

WALD, L., RANCHIN, T. and MANGOLINI, M. 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions : assessing the quality of resulting images. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 63, n° 6, p. 691-699.

WEBER, C. 1995. Images satellitaires et milieu urbain. Collection Géomatique, Hermès, Paris, 185 p.

WEBER, C., 1998, Des indicateurs "objectifs" de la qualité de vie : espaces verts et télédétection . *In* REYMOND H., CAUVIN C. et KLEINSCHMAGER (réd.) L'espace des villes. Pour une synergie multistrate. Anthropos, Collection Villes, Paris, p. 393-414.

WEBER, C. et HIRSCH, J. 1989. Intégration des données multisources : les problèmes de désagrégation et agrégation de données dans une approche de système d'information géographique. Fiabilité et utilisation optimum des informations. Communication au colloque SIGEO : Les systèmes d'information géographique, Rouen, 10 p.

WEBER, C., HIRSCH, J. et SERRADJ, A. 1990. Classification pixels et classification par zones : tests sur image SPOT en milieu urbain. Communication aux 2es journées Télédétection de Bondy, ORSTOM : Caractérisation et suivi d'espaces urbains, 6 p.

WELCH, R. 1982. Spatial resolution requirements for urban studies. International Journal of Remote Sensing, vol. 3, n° 2, p. 139-146.

WILMET, J. 1987. Contribution de la télédétection à l'analyse de l'environnement des grandes villes africaines. *In* Recherches de géographie urbaine - Mélanges offerts à J.A. SPORCK. Presses Universitaires et Société Géographique de Liège, Liège, p. 712-719.

ZANG, J. and FOODY, G.M. 1998. A fuzzy classification of sub-urban land cover from remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 14, p. 2721-2238.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 15-22

2

Influence de la précision absolue des points d'amer sur la qualité de la géoréférenciation des images à très haute résolution

ROLAND BILLEN [1 2], BERNARD CORNÉLIS [1], DAVID SHEEREN [1], JEAN-PAUL DONNAY [1] et DIMOS PANTAZIS [3]

[1] *Laboratoire SURFACES, Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, 4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (0) 4 366-57-42; télécopieur : +32 (0) 4 366-56-93; courriel : surfaces@geo.ulg.ac.be*

[2] *Aspirant au Fond National de la Recherche Scientifique (FNRS); courriel : roland.billen@ulg.ac.be*

[3] *TEI (Institute of Technological Education of Athens), 40, Anagenniseos, Krissoupoli - Peristeri, 12137 Athènes, Grèce; téléphone : +30 1 578-19-78; télécopieur : +30 1 578-19-78; courriel : pantdonz@otenet.gr*

Résumé

Pour étudier le milieu urbain, les télédétecteurs disposent d'images et de photographies satellitaires de très haute résolution géométrique. Le processus de correction géométrique menant à la géoréférenciation de ces données est entaché de plusieurs erreurs. Certaines sont inhérentes aux données de départ, d'autres sont introduites lors des traitements. Ces dernières peuvent provenir des algorithmes de corrections des déformations géométriques, des données externes nécessaires aux corrections ou des algorithmes de rééchantillonnage. Le but de cette étude est d'analyser l'impact de la précision absolue des points d'amer sur la qualité géométrique de l'image géoréférencée. Deux tests sont réalisés à partir de la même image (KVR-1000) sur des zones différentes. Des transformations polynomiales ont été appliquées à partir de points d'amer de précision absolue différente. Ces points ont été extraits de cartes topographiques, d'une base de données topographique et d'un levé au GPS. Il apparaît que, pour obtenir une géoréférenciation de l'ordre de la résolution

géométrique de l'image, il faut des points d'amer de précision absolue d'un ordre de grandeur inférieur. L'utilisation de points plus précis ne permet pas d'obtenir une meilleure géoréférenciation. Cela montre, qu'en deçà d'une certaine précision absolue, il n'y a plus de gain possible en terme de qualité géométrique du géoréférencement. On se trouve face aux limites d'identification des points imposées par la résolution de l'image à corriger. Les perspectives de recherche reposent sur la prise en compte du problème dans sa globalité, en jouant en plus sur la distribution et le nombre de points et en utilisant différents algorithmes de correction.

1. Introduction

L'évolution technologique des capteurs utilisés par la nouvelle génération de satellites offre (IRS-1CD pan, IKONOS) ou offrira (Quickbird, OrbView, IRS-P5, EROS) aux télédétecteurs des images de très haute résolution géométrique comparables aux photographies satellitaires existantes (KVR-1000 de KOSMOS). Sur la base de la résolution géométrique, un continuum se constitue entre les photographies aériennes (résolutions centimétrique et décimétrique) et les images et photographies satellitaires (résolutions métrique et décamétrique). L'utilisation de ces données à des fins cartographiques (RIDLEY *et al.*, 1997; RONGXING, 1998), leur intégration commune (données multisources) dans les systèmes d'information géographique et les problèmes de fusion de données (TOUTIN, 1995), rendent indispensable un géoréférencement correct.

Les données télédétectées subissent une série de déformations qui affectent leur géométrie. Ces déformations peuvent être qualifiées de systématiques (liées au système d'enregistrement) ou de non systématiques (liées à des causes fortuites) (WILMET, 1996). Le processus de correction géométrique mis en œuvre pour palier ces déformations est entaché de plusieurs erreurs. Certaines sont inhérentes aux données de départ, d'autres sont introduites lors des traitements. Ces dernières peuvent provenir des algorithmes de correction des déformations géométriques, des données externes nécessaires aux corrections ou encore des algorithmes de rééchantillonnage (BILLEN et CORNÉLIS, 2000). Dans cette étude, les données externes envisagées correspondent aux points d'amer qui permettent de fixer les paramètres de transformation de l'image brute vers l'image géoréférencée. Leur précision absolue, leur type, leur nombre et leur distribution influencent le processus de correction géométrique. Le but de cette étude est d'analyser l'impact de la précision absolue des points d'amer sur la qualité géométrique de l'image géoréférencée. Deux tests sont réalisés à partir de la même image (KVR-1000) sur des zones différentes. Le géoréférencement recherché est de l'ordre de la résolution de l'image, à savoir 3,5 m. Afin de ne mettre en évidence que l'impact de la précision absolue des points d'amer, leur nombre, leur distribution et leur type restent les mêmes, ainsi que les algorithmes de correction (polynomiale) et de rééchantillonnage (plus proche voisin).

2. Points d'amer

Les différentes sources de points d'amer utilisées dans cette étude sont les cartes de l'Institut géographique national belge (IGNB), le levé au GPS (*Global Positioning System*) et la base de données topographiques.

2.1. Cartes de l'Institut géographique national belge

Qu'elles soient toujours sur papier ou qu'elles soient directement sous forme numérique, les données des instituts nationaux de cartographie sont toujours, sinon les plus précises, les plus riches et les plus complètes. Le coût de leur acquisition est généralement raisonnable, en tout cas pour les documents sur support papier, les bases de données étant pour le moment relativement plus chères. Elles représentent dès lors la source principale d'information pour l'obtention de points de contrôle.

2.1.1. Carte 1 : 25 000

Les points relevés sur la carte 1 : 25 000 ont une précision planimétrique absolue de 6,25 m, si on se réfère aux normes de qualité éditées par la Commission de coordination pour la banque de données topographiques (1990).

2.1.2. Carte 1 : 10 000 numérisée

Une série de points a été collectée sur des cartes à 1 : 10 000 de l'IGNB numérisées et géoréférencées. La précision planimétrique de ces points devrait être théoriquement de 2,5 m. Ces données sont en réalité dérivées des cartes de base à 1 : 25 000. Donc, sans tenir compte des déformations dues à la numérisation des documents, la précision planimétrique est de 6,25 m. Dans le reste de l'article, nous qualifierons cette source de données de « faux 1 : 10 000 » pour éviter toute confusion.

2.2. Levé au GPS

La technologie GPS est de plus en plus abordable pour de nombreux utilisateurs. Bon nombre de travaux font référence à son emploi dans des problèmes de corrections géométriques (KRAUSS, 1997, KARDOULAS *et al.*, 1996). Dans cette étude, un matériel de haute précision réservé à des usages topographiques (Leica SR9500) a été employé. Un réseau de points de haute précision (planimétrique et altimétrique inférieures à 10 cm) a été établi. Pour l'établissement du réseau de points, la technique dite du levé en statique rapide (BOTTON *et al.*, 1997) a été adoptée. Les coordonnées mesurées par GPS dans le système WGS84 ont été transformées dans le système belge de coordonnées cartographiques. Cette transformation est possible soit en utilisant les formules globales de passage d'un système à l'autre, soit en ajustant localement le réseau de points GPS au réseau de l'IGNB en Lambert belge 72. Cette dernière option a été retenue et l'opérateur a levé, par GPS, une dizaine de points géodésiques de l'IGNB.

2.3. Base de données topographiques

Une base de données topographiques a été mise à notre disposition. Elle répond à un cahier des charges spécifique de la régie des télégraphes et téléphones de Belgique (1990) et comprend des objets relatifs à la voirie et aux bâtiments. Elle a été réalisée par des méthodes classiques de topographie. Les points relevés ont une précision planimétrique absolue annoncée de 15 cm.

3. Test 1

3.1. Matériel

L'imagerie utilisée consiste en une photographie KVR-1000 obtenue par le satellite russe KOSMOS le 9 mai 1992, numérisée à une résolution de 3,5 m. La zone de plus ou moins 23 km sur 23 km couvre la région liégeoise. Les points d'amer sont issus, d'une part, de cartes numérisées de l'IGNB « faux 1 : 10 000 » et, d'autre part, du levé GPS réalisé. Les corrections géométriques ont été assurées par le logiciel PCI OrthoEngine 6.03 et les données GPS ont été traitées par le logiciel SKI de Leica.

3.2. Méthode

L'image brute a été corrigée suivant des polynomiales d'ordre 1 et 2. Les coefficients des transformations ont été calculés à partir de quinze points d'amer répartis de façon homogène sur la zone. Ces points d'amer étant connus aussi bien dans le système GPS (précision absolue de 10 cm) que dans le système de la carte numérisée (précision absolue de 6,25 m). En prenant les mêmes points d'amer, on évite ainsi l'effet d'un changement de distribution des points sur la qualité géométrique de la correction. Deux méthodes permettent d'apprécier la qualité géométrique des différentes corrections : le calcul de l'erreur quadratique moyenne (eqm) sur les points d'amer et le calcul de l'eqm par validation croisée. Cette méthode peut être décrite de la manière suivante (MACGWIRE, 1996) : le premier point de contrôle est retiré de l'ensemble des points et la transformation géométrique est calculée en utilisant les points restants. Cette transformation est appliquée au premier point et la différence avec sa vraie valeur est calculée. Le premier point est alors replacé dans l'ensemble et le processus est appliqué itérativement à tous les points de l'ensemble. Ceux-ci fournissent donc des résidus indépendants des modèles calculés, ce qui offre une idée plus pertinente de la qualité réelle de la correction. Cette méthode d'évaluation de la précision géométrique est particulièrement bien adaptée à notre situation vu le peu de points d'amer disponibles. En effet, il n'a pas été possible dans les délais du levé de collecter suffisamment de points au GPS pour constituer un échantillon distinct de points de contrôle.

3.3. Résultat

Les erreurs quadratiques moyennes (eqm) sur les points d'amer issus des cartes numérisées « faux 1 : 10 000 » et du levé au GPS ainsi que les eqm des validations croisées effectuées sur ces points d'amer sont présentées sur le tableau 1.

Tableau 1. Méthode de correction, eqm des points d'amer et eqm de la validation croisée des points de contrôle pour le test 1

Nature des points de contrôle	Méthode de correction	eqm des points d'amer (en m)	eqm de la validation croisée (en m)
Carte « faux 1 : 10 000 » numérisée	Polynomiale ordre 1	6,65	9,31
Carte « faux 1 : 10 000 » numérisée	Polynomiale ordre 2	6,09	8,72
GPS	Polynomiale ordre 1	5,18	5,49
GPS	Polynomiale ordre 2	4,02	5,07

3.4. Discussion

Les points de contrôle issus des cartes numérisées n'ont pas permis d'obtenir la précision recherchée (géoréférencement de l'ordre de 3,5 m). Les scores obtenus avec la validation croisée sont particulièrement mauvais. En ce qui concerne les points de contrôle issus du levé au GPS, la différence entre les eqm des points de contrôle et les eqm issues de la validation croisée est peu importante. Cette géoréférenciation tend vers la valeur cible. Vu la précision de ces données (inférieure à 10 cm) un résultat plus significatif était attendu. Ceci pose le problème du choix des points et de leur identification sur l'image: en d'autres termes, la qualité du travail des opérateurs (terrain et logiciel). Même si des éléments caractéristiques, comme des intersections d'alignement de routes, ont été recherchés pour obtenir une localisation sub pixel des points, la qualité géométrique du géoréférencement ne passe pas sous le pixel (3,5 m). Ceci est dû à la difficulté d'identification des points sur l'image mais également aux limitations inhérentes à l'emploi du GPS en milieu urbain. Les principales difficultés rencontrées lors du levé ont été : l'accessibilité et le déplacement, la visibilité des points sur l'image, la diachronie entre l'acquisition de l'image et le travail de terrain, les masques (bâtiments et arbres) et le temps de mesures (un peu près 15 minutes pour un levé statique rapide) souvent trop long pour pouvoir stationner facilement à des endroits caractéristiques comme des carrefours.

4. Test 2

4.1. Matériel

La même photographie KVR-1000 a été utilisée. L'extrait corrigé couvre une zone de 1 km sur 3,25 km à l'est de l'agglomération liégeoise. Cette localisation correspond à la base de données topographiques disponible. Les points d'amer sont issus d'une carte papier de l'IGNB au 1 : 25 000, d'une carte numérisée de l'IGNB au « faux 1 : 10 000 » et de la base de données topographiques. Les corrections géométriques ont été réalisées par le logiciel *Image Analyst d'Intergraph*.

4.2. Méthode

L'image brute a été corrigée suivant des polynomiales d'ordre 1. Comme dans le premier test, les coefficients des transformations ont été calculés à partir de quinze points d'amer, connus dans le système de la base de données topographiques (précision absolue de 15 cm) et dans le système des cartes (précision absolue de 6,25 m). Ces points ont été répartis de façon homogène sur la zone. Pour ce test, on dispose de suffisamment de points de haute précision (base de données topographiques) pour constituer un échantillon de 10 points de contrôle indépendants. Cet échantillon permet d'évaluer la qualité géométrique de la transformation indépendamment des points d'amer.

4.3. Résultat

Les eqm sur les points d'amer issus de la carte au 1 : 25 000, de la carte numérisée au « faux 1 : 10 000 » et de la base de données topographiques ainsi que les eqm sur l'échantillon de points de contrôle sont présentées sur le tableau 2.

Tableau 2. Méthode de correction, eqm des points d'amer, eqm de la validation croisée et eqm sur les points de contrôle pour le test 2

Nature des points de contrôle	Méthode de correction	eqm des points d'amer (en m)	eqm de la validation croisée (en m)	eqm sur les points de contrôle (en m)
Carte 1 : 25 000	Polynomiale ordre 1	8,57	10,47	12,80
Carte « faux 1 : 10 000 » numérisée	Polynomiale ordre 1	8,19	9,91	9,50
Base de données topographiques	Polynomiale ordre 1	3,70	4,72	4,17

4.4. Discussion

Les scores obtenus en partant des points d'amer issus de la base de données topographiques sont bons et répondent aux attentes. Ceux obtenus pour les données issues des cartes sont plus mitigés. En ce qui concerne le « faux 1 : 10 000 », les différentes eqm sont plus ou moins de 9 m. Les scores sont plus mauvais pour la carte au 1 : 25 000. En se basant sur les résultats obtenus pour les points de contrôle indépendants, on arrive pour la carte a « faux 1 : 10 000 » à un géoréférencement une fois et demi plus grand que la précision absolue des points d'amer (6,25 m). Pour la carte au 1 : 25 000 qui possède pourtant la même précision absolue, il est deux fois plus grand. La raison en est la plus grande difficulté de pointé sur la carte comparée à l'image numérisée du « faux 1 : 10 000 ».

5. Conclusion

Il apparaît que l'utilisation, dans de bonnes conditions d'acquisition (carte au « faux 1 : 10 000 » numérisée) de points d'amer de précision absolue de 6,25 m permet une géoréférenciation de la KVR-1000 entre 8 et 10 m, à savoir entre deux et trois pixels. Pour obtenir une géoréférenciation de l'ordre du pixel (3,5 m), on peut émettre l'hypothèse que des points d'amers de précision absolue de l'ordre de 2,5 m peuvent suffire. L'utilisation

de points beaucoup plus précis (entre 10 et 15 cm) ne permet pas d'obtenir une géoréférenciation meilleure que 3,5m, ce qui permet de penser qu'en deçà d'une certaine précision absolue, il n'y a plus de gain possible en terme de qualité géométrique du géoréférencement. On se trouve face aux limites d'identification des points imposées par la résolution de l'image à corriger.

On peut avancer l'idée que la précision absolue des points d'amer doit être d'un ordre inférieur à la résolution géométrique de l'image à corriger, soit 2,5 m pour la KVR-1000 utilisée, 4 m pour de l'IRS-CD Pan, 70 cm pour IKONOS. Cependant, les données disponibles ne permettent pas toujours d'atteindre ce rapport optimal. Dans notre étude, il aurait fallu disposer de données offrant une précision planimétrique de 2,5 m ce qui correspond grosso modo à une échelle de 1:10 000 pour des documents cartographiques si l'on se réfère aux normes de qualité précitées. Si nos suppositions s'avèrent exactes, la correction d'image de résolution de 1 m sur 1 m nécessitera des données de précision correspondant à l'échelle du 1 : 3000, ce qui correspond à une précision de levé topographique (notamment GPS).

La qualité géométrique d'un géoréférencement est influencée par de nombreux facteurs. L'étude entreprise avait pour but d'isoler un de ces facteurs, la précision absolue des points d'amer, et d'étudier son influence sur la qualité. Il serait intéressant d'étudier le problème dans sa globalité en jouant en plus sur la distribution et le nombre de points (CORNÉLIS and PATTYN, 1997), et en appliquant différents algorithmes de correction. Il paraît essentiel d'envisager des techniques photogrammétriques (TOUTIN, 1996) pour la correction géométrique d'image de très haute résolution sur le milieu urbain. Ces techniques permettent en outre de tenir compte des déformations dues au relief (TOUTIN, 1996). L'utilisation d'image IKONOS permet ce type de traitement ce qui n'était pas le cas de la photographie KVR-1000 utilisée.

6. Références

BILLEN, R et CORNÉLIS, B. 2000. Corrections géométriques. *in* J-P. DONNAY (éd.). Spatiocartographie. Société géographique de Liège, 30 p.

BOTTON, S., DUQUENNE, F., EGELS, Y., EVEN, M. et WILIS, P. 1997. GPS localisation et navigation. Hermès, Paris, 159 p.

COMMISSION DE COORDINATION NATIONALE POUR LA BANQUE DE DONNÉES TOPOGRAPHIQUES, 1990. Normes de qualité, Commission de coordination nationale, 111 p.

CORNÉLIS, B. and PATTYN, F. 1997. Geocoding SPOT image coverage of Belgium : evaluation and optimization of rectification procedures. Étude de faisabilité, SURFACES, Université de Liège et Geografisch Instituut, Vrije Universiteit Brussel, 52 p.

KARDOULAS, N., BIRD, A. and LAWAN, A. 1996. Geometric correction of SPOT and Landsat imagery : a comparaison of map- and GPS-derived control points. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 62, n°10, p. 1173-1177.

KRAUSS, K. 1997. Photogrammetry, advanced methods and applications. Volume 2. Dümmlers Verlag, Bonn, 446 p.

MACGWIRE, K. 1996. Cross-validated assessment of geometric accuracy. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 62, n°10, p. 1179-1187.

RÉGIE DES TÉLÉGRAPHES ET DES TÉLÉPHONES DE BELGIQUE, 1990. Cahier des charges type (RN 13), confection de plans de routes digitaux par aérophotogrammétrie, levées terrestres, ou digitalisation de plans existants. 21 p.

RIDLEY, H., ATKINSON, P., ALPIN, P., MULLER, J-P. and DOWMAN, I. 1997. Evaluating the potential of the forthcoming commercial U.S. high-resolution satellite sensor imagery at the ordnance survey(r). . Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 63, n° 8, p. 997-1005.

RONGXING, L. 1998. Potential of high-Resolution satellite imagery for national mapping products. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 64, n°12, p. 1165-1169.

TOUTIN, T. 1995. Intégration de données multisources : comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. International Journal of Remote Sensing, Vol. 16, n°15, p. 2795-2811.

TOUTIN, T. 1996. La correction géométrique rigoureuse : un mal nécessaire pour la santé de vos résultats. Journal canadien de télédétection. vol. 22, n° 2, p. 184-189.

WILMET, J. 1996. Télédétection aérospatiale, méthodes et applications. SIDES, Fontenay-sous-Bois, 300 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 23-31

3

Utilisation des données satellitaires pour l'actualisation décennale du découpage en secteurs statistiques du territoire de la Belgique

MARC BINARD [1], PIERRE JAMAGNE [2] et FABRICE MULLER [1]

[1] *Service universitaire de recherches fondamentales et appliquées en cartographie et en études spatiales (SURFACES), Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, B-4000 Liège, Belgique; téléphone: +32 (4) 366-57-42; télécopieur: +32 (4) 366-56-93; courriel : surfaces@geo.ulg.ac.be*

[2] *Institut national de statistique (I.N.S.), Unités territoriales, 44, rue de Louvain, B-1000 Bruxelles, Belgique; téléphone: +32 (2) 548-65-97; télécopieur: +32 (2) 548-66-26; courriel : pierre.jamagne@statbel.mineco.fgov.be*

Résumé

À la fin des années 1960, afin de répondre aux besoins des autorités locales, l'Institut national de statistique (I.N.S.) a pris l'initiative de découper le territoire communal de toute la Belgique en une vingtaine de milliers de secteurs statistiques. En vue du recensement de 2001, l'I.N.S. a décidé d'actualiser les limites des secteurs. À cette fin, un projet pilote de deux ans a été conçu. Il a pour objectif la mise au point d'une filière de production permettant : 1) de repérer, sur des images satellitaires, les zones rurales présentant des noyaux d'habitat (utilisation des 59 images HRV de SPOT de 1995 et 1996); 2) de réaliser l'actualisation des secteurs statistiques par photo-interprétation assistée par ordinateur (PIAO) à partir des orthophotoplans. La méthodologie retenue comprend notamment : 1) le découpage du projet en « zones » homogènes de travail; 2) la réalisation du masque du bâti par classification non dirigée; 3) la détection des noyaux de bâti; 4) l'élaboration de la liste des secteurs dont le découpage doit être vérifié; 5) la création des nouveaux secteurs

statistiques d'habitat groupé par PIAO. Quelques 7 467 noyaux ont été détectés dans 3 673 secteurs candidats à l'actualisation. Ces secteurs sont généralement localisés à la périphérie des villes et correspondent souvent à de nouveaux lotissements ou à un accroissement au départ d'anciens noyaux d'habitat. À terme, le nouveau découpage permettra à l'I.N.S. de ventiler ses statistiques sur des unités territoriales épousant mieux les limites des agglomérations.

1. Introduction

En vue du recensement du 31-12-1970, l'I.N.S. a découpé le territoire de la Belgique (30 513 km^2) en secteurs statistiques (ZÉGUERS, 1998). Ce découpage a été réalisé afin d'avoir une meilleure connaissance des structures à l'intérieur des communes au point de vue : de la démographie, du logement, des moyens de communications, de l'économie et du domaine social (I.N.S., 1984). Il permet aussi de mieux appréhender les modèles de répartition de la population (caractéristiques et délimitations des noyaux d'habitat). Le développement des SIG a favorisé l'utilisation de ces données à une échelle infra-communale tant en aménagement du territoire qu'en études de marché.

Bien que le découpage en secteurs statistiques ait déjà été mis à jour une première fois pour le recensement de 1981, DONNAY et LAMBINON (1997) ont mis en évidence la nécessité de procéder à une nouvelle mise à jour dans des secteurs dits d'habitat dispersé. En effet, dans ces secteurs localisés à la périphérie des agglomérations, on observe de nombreux lotissements récents.

La mise à jour proprement dite des secteurs est faite par interprétation d'orthophotoplans en noir et blanc réalisés par l'Institut géographique national belge (I.G.N.B.) à partir de photographies aériennes au 1 : 40 000 dont la résolution spatiale est de 1 m. L'objet principal de ce projet est de détecter, à partir d'images HRV, les surfaces bâties constituant des noyaux d'au moins 3 ha au sein des secteurs dits d'habitat dispersé (code 8 et 9). Une liste des secteurs candidats à une éventuelle mise à jour pour le recensement de 2001 est élaborée.

2. Matériel de base

Ont servi de base à ce projet :

- les couvertures HRV (XS) de SPOT de 1995 et la couverture HRV (P) de 1996 couvrant toute la Belgique et constituées de 59 images;
- les limites des 19 373 secteurs de l'I.N.S. sous format vectoriel; chaque secteur possède un identifiant (9 caractères) et est formé d'un ou quelques fois de plusieurs polygones qui présentent parfois des îles (polygones complexes).

3. Méthodologie

Dans la mesure du possible, l'imagerie satellitaire a été sélectionnée de manière à couvrir chaque secteur en entier. L'espace occupé par l'ensemble des secteurs analysés à partir d'un même jeu d'images HRV (un extrait d'image multispectrale de 1995 et un extrait d'une

ou plusieurs scènes panchromatiques de 1996) (voir 3.1.3) est appelé « zone » ou « zone de travail ».

3.1. Sélection des images et détermination des zones de travail

Les zones de travail doivent être aussi grandes que possible en tenant compte à la fois de la disposition des recouvrements entre les images panchromatiques et multispectrales ainsi que de la qualité de ces dernières. Avant de pouvoir déterminer de manière précise l'étendue de la zone et d'établir la liste des secteurs statistiques qu'elle contient, il faut déterminer le rectangle sur lequel les images de chaque zone seront corrigées géométriquement. Les zones sont déterminées les unes après les autres et constituent une partition du territoire (ni vide ni intersection entre les zones) (figure 1).

3.1.1. Importation et positionnement des images

Dans un premier temps, les images ont été positionnées sans effectuer de corrections géométriques précises par de simples rotations, mises à l'échelle, et translations effectuées grâce aux paramètres orbitaux contenus dans les en-têtes des fichiers-images (figure 2).

3.1.2. Évaluation de la qualité des images

L'évaluation de la couverture nuageuse et de la qualité technique des images a été réalisée de manière visuelle. En plus d'une appréciation des difficultés qui seront rencontrées lors des classifications, cette évaluation est principalement réalisée pour faire le choix entre les couvertures multispectrales de printemps et d'été.

Figure 1. Partition du territoire belge en « zones » de travail réalisée en fonction des secteurs statistiques et des images satellitaires

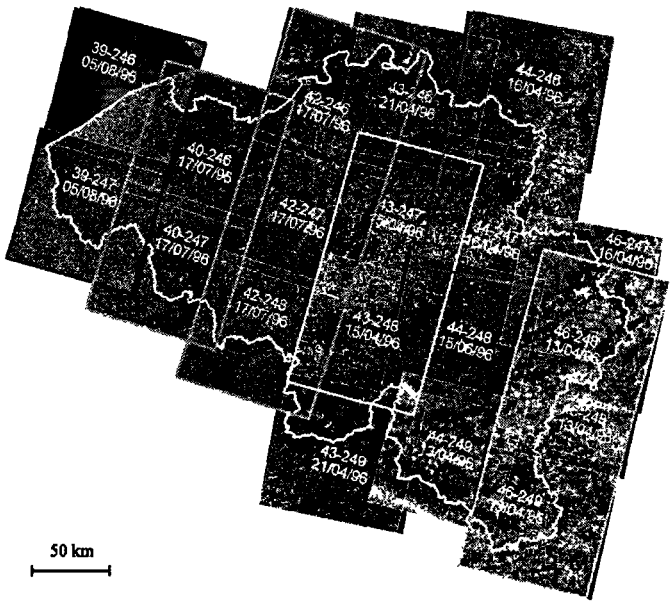


Figure 2. Disposition des scènes HRV (P) de SPOT sur le territoire belge

3.1.3. Regroupement des images

Les images acquises par un même capteur lors d'un même passage sont regroupées de manière à réduire le fractionnement en différentes zones. Après prise de renseignements chez SPOT-IMAGE, seules les images produites après août 1995 par le Centre d'archivage et de prétraitement (CAP) peuvent être regroupées. En effet, dans la zone de recouvrement (nord/sud), l'ancien algorithme ne reproduisait pas exactement les mêmes valeurs d'une scène à l'autre (images produites au niveau 1b). Contrairement à ce qui avait été prévu initialement, seules 5 bandes d'images panchromatiques ont pu être regroupées, soit 12 images (figure 1).

3.2. Corrections géométriques et fusion des images

En vue de la fusion des informations multispectrale et panchromatique, les corrections géométriques se font en deux étapes : la première consiste à corriger le panchromatique par rapport aux orthophotoplans (5 m de résolution spatiale) de l'I.G.N.B., tandis que la deuxième consiste à rectifier le multispectral vis-à-vis du panchromatique.

3.2.1. Corrections géométriques

Comme la surface à traiter est considérable et qu'aucun modèle numérique d'altitude n'est disponible dans le cadre de ce projet, un simple modèle de correction du premier degré a été appliqué aux images. L'algorithme de rééchantillonnage au plus proche voisin a été utilisé de manière à préserver l'information spectrale. L'erreur quadratique moyenne est généralement inférieure à la taille du pixel (10 m pour le panchromatique et 20 m pour le

multispectral) sauf pour certaines images en Haute Belgique où la dynamique du relief est trop importante pour respecter ce critère. Sur ces zones, les classifications ont été effectuées uniquement sur les données HRV (XS) de manière à réduire les décalages entre images.

3.2.2. Fusion

La méthodologie utilisée pour interpréter les classifications non dirigées implique l'analyse d'une image de synthèse par photo-interprétation assistée par ordinateur (PIAO). Pour la fusion des images, on utilise la méthode par égalisation de moyennes et de variances locales (DE BÉTHUNE *et al.*, 1998).

3.3. Détermination de la zone de travail

Deux masques des pixels véhiculant de l'information spectrale sont réalisés par simple seuillage suivi d'un recodage de l'image panchromatique et de l'image multispectrale. Le troisième masque résulte de la multiplication des masques précédents et correspond à l'intersection de la partie « utile » des deux images. Ce masque est vectorisé pour réaliser une intersection avec le vectoriel des limites des secteurs statistiques. Après intersection, la surface des secteurs est recalculée et seuls sont conservés les secteurs non encore affectés à une zone qui ont une surface identique avant et après intersection (figure 1). De cette manière, les secteurs partiellement couverts par l'information satellitaire sont rejetés de la zone de travail. La liste des secteurs de la zone devient disponible et le fichier des limites des secteurs retenus est transformé en mode image sous forme d'un masque nécessaire à la procédure de classification.

3.4. Classification et détection des noyaux de bâti

La classification est réalisée dans le but bien spécifique de détecter les noyaux de bâti suivant les critères de l'I.N.S. À la demande de cet institut, le masque du bâti doit être plutôt « généreux » que trop « restrictif ». En effet, la classification n'est pas le but ultime du travail mais elle doit principalement servir à mettre en évidence tous les secteurs qui doivent être vérifiés de manière plus fine. Les classes retenues avant la conversion de la classification en un masque sont : l'eau, les cultures et les sols nus, les forêts, les herbages, le bâti, le non classé.

3.4.1. Classification

La classification est réalisée en trois étapes constituées chacune de deux phases (classification non dirigée + interprétation des résultats par PIAO) (figure 3). L'algorithme de classification utilisé est celui de la méthode dite « compétitive » (INTERGRAPH, 1997).

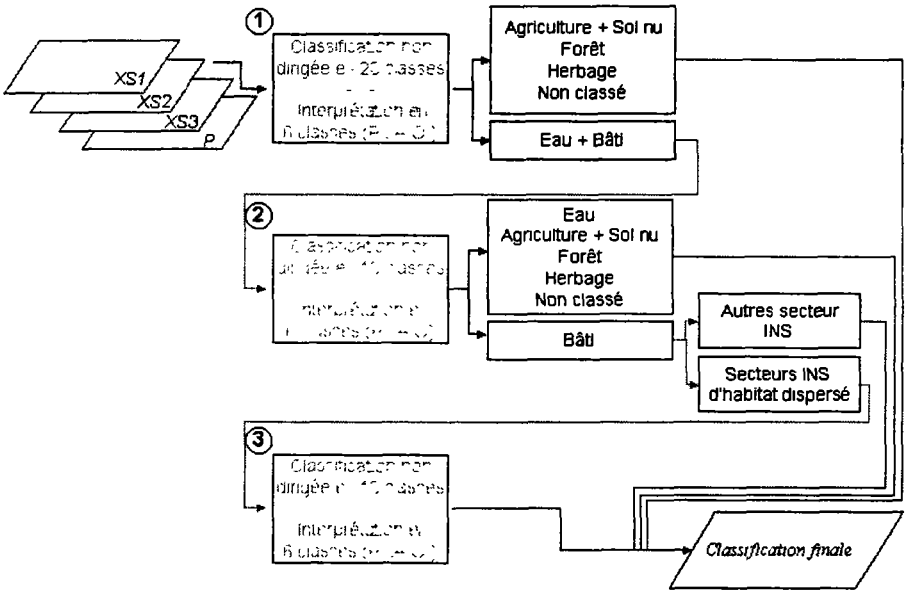


Figure 3. Organigramme de la procédure de classification

Lors de la première étape, la classification non dirigée est faite sur 20 classes uniquement pour le masque de la zone de travail. L'interprétation en six classes est réalisée par PIAO sur l'image de fusion (voir section 3.2.2.). Afin d'améliorer le thème du bâti et de lever les confusions avec le thème eau, la deuxième classification non dirigée est effectuée uniquement sur le masque des classes du bâti et de l'eau de la première classification. La dernière classification porte uniquement sur les pixels du masque du bâti de la deuxième classification qui appartiennent aux secteurs statistiques dits d'habitat dispersé (codes 8 et 9). Cette dernière étape permet souvent de lever la confusion entre les sols nus et le bâti sur base de la forme (quadrilatère révélateur du parcellaire).

3.4.2. Détection des noyaux de bâti

Le masque du bâti est soumis à une procédure de fermeture morphologique sur une fenêtre de 100 m de diamètre (une dilatation suivie d'une érosion) (BINARD et COLLETTE, 1993) qui permet de combler la plupart des discontinuités de moins de 100 m observées dans le masque du bâti (critère de l'I.N.S.).

Une intersection est ensuite opérée entre ce dernier masque et les limites des secteurs statistiques dits d'habitat dispersé (figure 4). La surface de chacun des noyaux est ensuite calculée en mode vectoriel à l'intérieur de chaque secteur afin d'aboutir à la typologie des noyaux suivante : type 1 (3 – 10 ha), type 2 (10 – 20 ha), type 3 (20 ha et plus).

L'intersection entre les limites des orthophotoplans de l'I.G.N.B. et les noyaux permet d'établir une liste des orthophotoplans à acquérir en priorité. Les prévisions budgétaires ont été établies avec l'hypothèse que 10 à 20 % de la couverture complète devra être acquise.

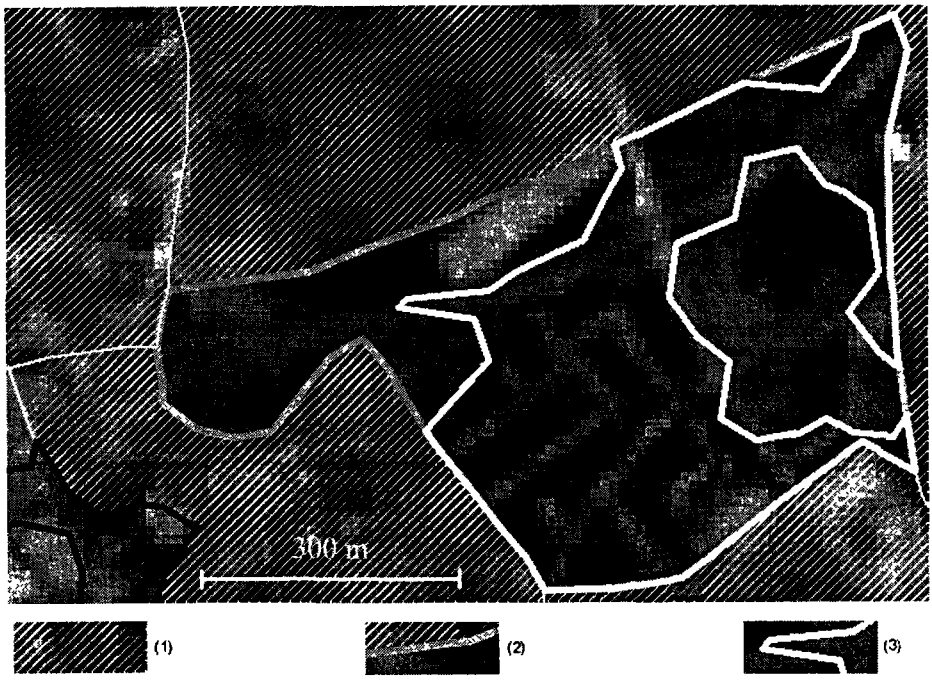


Figure 4. Détection d'un noyau du bâti sur le secteur « 52012B492 ». 1) Secteur bâti; 2) limite du secteur 52012B492; 3) limite du noyau.

3.5. Limite des agglomérations "morphologiques"

Les premiers tests réalisés selon des critères proches de ceux recommandés par EUROSTAT (EUROSTAT, 1992) (LEMONNIER, 1997) (NADASDI et BINARD, 1997) montrent qu'une fermeture morphologique sur une fenêtre de 200 m de diamètre n'est pas adaptée à la réalité belge ou à la méthodologie utilisée dans ce projet. Des simulations sur des fenêtres de taille plus petite seront effectuées dans un proche avenir.

4. Résultats

Les 22 zones de travail traitées couvrent les 30 513 km² du pays dont 24 916 km² en secteurs dits d'habitat dispersé. Les 7 467 noyaux se répartissent en 3 673 secteurs candidats à une révision sur les 6 692 secteurs dits d'habitat dispersé. La surface totale des noyaux retenus est de 713 km² (tableau 1). Ceux de type 1 sont les plus nombreux (5 677) et ils occupent une surface légèrement supérieure à celle des 640 noyaux de type 3 (respectivement 289 et 266 km²). Les 1 150 noyaux de type 2 occupent une surface de 158 km². Grâce aux bases de données, aux fichiers vectoriels qui y sont attachés et aux différentes listes reçues, l'I.N.S. procède actuellement à l'interprétation des orthophotoplans afin de créer de nouveaux secteurs.

Tableau 1. Noyaux du bâti détectés dans les secteurs dits d'habitat dispersé

	Type 1 (3 - 10 ha)	Type 2 (10 - 20 ha)	Type 3 (20 ha et plus)	Total
Nombre de noyaux	5 677	1 150	640	7 467
Surface (km^2)	289	158	266	713

5. Discussion et conclusion

La mise au point de la méthode et la standardisation des fichiers échangés ont pris plus de temps que prévu. L'I.N.S est satisfait du résultat et va bientôt atteindre la phase de production.

Ce sont des contraintes opérationnelles qui ont guidé tant le choix de la classification pour obtenir le masque du bâti que les méthodes simples de corrections géométriques des images. En effet, les recherches pointues ne sont pas toujours directement applicables sur de vastes zones ou sur des images de qualité variable. Le revers de cette approche est que les images produites ne peuvent être utilisées que pour cette application précise. La seule validation envisagée est celle qui sera pratiquée à l'I.N.S. sur les orthophotoplans qui constituent un substitut de la réalité du terrain. En outre, le prix d'acquisition de trois couvertures HRV ne peut se justifier que si elles sont utilisées par différents ministères.

6. Remerciements

Le projet pilote d'une durée de deux ans (1998-1999) est réalisé dans le cadre du Programme de recherche scientifique dans le domaine de la télédétection spatiale (TELSAT/ 12/024), pour le compte de l'État belge.

7. Références

BINARD, M. et COLLETTE, B. 1993. Traitement contextuel en post-classification pour l'élaboration d'une spatio-carte destinée à la gestion et à l'aménagement du territoire. *in* J.-M. Dubois, F. Cavayas et P. Lafrance (réd) Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Collection Universités francophones-Actualités scientifiques, Editions AUPELF-UREF et Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, p. 285-295.

DE BÉTHUNE, S., DONNAY, J.P. et MULLER, F. 1998. Fusion d'images multirésolution par égalisation de moyennes et de variances locales: comparaison avec la fusion par la méthode des ondelettes. *in* J.-M. Dubois, M. Bernier, J.-P. Fortin et F. Boivin (réd) La réalité de terrain en télédétection: pratiques et méthodes, Collection Universités francophones-Actualités scientifiques, Editions AUPELF-UREF, Montréal, p. 119-126.

DONNAY, J.-P. et LAMBINON, M. 1997 Détermination des limites d'agglomération par télédétection: discussion méthodologique et application au cas de Huy (Belgique). *in* J.-M. Dubois, J.-P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd) Télédétection des milieux urbains et périurbains, Collection Universités francophones-Actualités scientifiques, Editions AUPELF-UREF, Montréal, p. 239-246.

EUROSTAT. 1992. Définition de l'agglomération dans la communauté européenne. Groupe de travail "Statistiques démographiques". Doc. E3/SD/11b/92. Eurostat, Luxembourg, 4 p.

I.N.S. 1984. Subdivision des communes en secteur statistiques/quartiers en vue des recensements généraux de 1981. Étude statistique n°72, Institut National de Statistique, Bruxelles, p. 39-53.

INTERGRAPH. 1997. Image Analyst – User's Guide. Huntsville, 372 p.

LEMONNIER, H. 1997. Apport de la précision spatiale des futures données SPOT5 dans le contexte du projet Eurostat sur la délimitation des agglomérations, in EUROSTAT, Télédétection, aménagement, environnement et statistiques urbaines, Actes du séminaire de Lille, 24 et 25 juin 1996, EUROSTAT, thème O, Série D, Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg, 1997, 63-67.

NADASDI, I. et BINARD, M.. 1997. Images de haute résolution au service des statistiques et de l'aménagement urbains : une application sur l'agglomération arlonaise, in EUROSTAT, Télédétection, aménagement, environnement et statistiques urbaines, Actes du séminaire de Lille, 24 et 25 juin 1996, EUROSTAT, thème O, Série D, Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg, 1997, 69-75.

ZÉGUERS, D. 1998. Actualisation des secteurs statistiques en vue du recensement 2001. Mémoire de stage présenté au Ministère des Affaires Économiques - Institut National de Statistique, Bruxelles, 56 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUPELF-UREF. 2000. p. 33-40

4

Cartographie de la densité urbaine par la morphologie mathématique : application dans les régions de Paris et Tachkent

AKILA CHELABI-KEMMOUCHE [1] et CATHERINE MERING [2]

[1] *Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des Sciences et de Technologie Houari Boumédiène, Bab-Ezzouar, Alger, Algérie; téléphone: +213(2)24 79 63; poste 806; télécopieur: +213(2)247187*

[2] *Laboratoire de géologie-géomorphologie structurale et télédétection, Université Pierre et Marie Curie, tour 26, 1er étage, case 129; 4, place Jussieu, 75252 cedex Paris 05 France; téléphone: +33 (1) 44 27 58 39; télécopieur: +33 (1) 44 27 50 85; courriel: mering@lgs.jussieu.fr*

Résumé

Notre étude a pour but la quantification de la densité urbaine à partir des images satellitaires. L'approche que nous avons utilisée s'inspire de l'analyse quantitative des échantillons de sol par le tamisage des éléments de tailles différentes et leur pesée. C'est ce qu'on appelle la granulométrie. Pour décrire la macro-texture autour d'un point à l'intérieur d'une fenêtre, nous avons utilisé les valeurs obtenues par le calcul de la densité granulométrique sur l'image binaire considérée. L'implémentation informatique consiste à créer les variables descriptives pour chaque pixel comme des images en niveaux de gris. Chaque image correspond au résultat du calcul de la densité granulométrique pour une taille d'ouverture. Sur cette image, chaque pixel est affecté de la densité granulométrique résultant de l'analyse granulométrique sur la fenêtre correspondante. Nous obtenons donc autant d'images que de valeurs non nulles de la densité granulométrique calculée sur l'ensemble des fenêtres glissantes sur l'image binaire. L'étape finale revient à effectuer une classification multicanaux sur ces images. Pour obtenir une carte de la macrotexture d'un ensemble, nous avons effectué une classification automatique des pixels à l'aide de la

méthode des nuées dynamiques. Nous avons analysé et cartographié les différents types de macro-textures d'une image binaire obtenue à partir d'une sous-image TM sur le sud-est de Paris. On peut constater sur la carte des macro-textures que la limite entre Paris et la banlieue suit à peu près les limites administratives. Nous avons également expérimenté cette méthode sur la ville de Tachkent (Ouzbékistan) à l'aide des images HRV (XS) de SPOT.

1. Introduction

L'étude de la croissance urbaine ou de la démographie des villes repose sur la possibilité d'analyser la densité du bâti sur les images (DUREAU, 1995). Le problème de la quantification de cette densité à l'aide des images satellitaires reste néanmoins posé dans le cas général, puisque chaque élément du bâti ne peut être reconnu individuellement. Dans cet article nous montrons qu'il est possible d'effectuer une description quantitative des formes d'organisation du bâti. Nous avons appelé macrotexture l'organisation spatiale des entités connexes d'un ensemble euclidien défini par une image binaire quelconque.

L'outil développé nous permet de cartographier la densité urbaine par analyse des macrotextures sur les images binaires. Une telle cartographie implique donc la classification de tous les points en considérant la description de la macrotexture autour de chaque point. Il s'agit donc de construire des indicateurs de la macrotexture se référant à un voisinage du point. Ces indicateurs que sont les densités granulométriques seront les variables quantitatives qui seront utilisées pour la classification des pixels.

2. Principe de l'analyse granulométrique des images binaires

Une image binaire peut être considérée comme un ensemble de l'espace euclidien R^2. Cet ensemble peut être considéré comme composé de sous-ensembles dont les éléments sont les composantes connexes de l'image binaire. Pour décrire les sous-ensembles, on peut choisir d'utiliser un critère tel que la taille des éléments qui les composent (VOIRON, 1995). Cette approche a été choisie par MATHERON (1967) pour décrire les milieux poreux. C'est ainsi qu'il a défini l'analyse granulométrique à l'aide d'une série d'axiomes dans le cadre de sa théorie des ensembles aléatoires compacts. MATHERON (1975) a montré qu'une famille d'ouvertures morphologiques à l'aide d'éléments structurants convexe B de taille croissante obéit aux axiomes définissant une granulométrie euclidienne. C'est donc en utilisant de telles transformations que nous effectuerons l'analyse granulométrique des images binaires.

L'analyse granulométrique permet donc de caractériser quantitativement la texture formée par les éléments connexes résultant du seuillage d'une image de télédétection produite par un capteur de résolution quelconque. L'analyse granulométrique par ouverture bidimensionnelle d'un ensemble X quelconque, permet d'effectuer une série de mesures G_λ :

$$G_\lambda = 1 - Mes(X_{\lambda B})/MesX$$

où

MesX est la mesure de Lebesgue dans R^2 (i.e. la surface);
$X_{\lambda B}$ est l'ensemble X ouvert par l'élément structurant de taille λ.

Au lieu de caractériser chaque image par sa distribution $G_\lambda(x)$, on peut la décrire par la densité granulométrique, c'est-à-dire la mesure $g_\lambda(x)$ des sous-ensembles qui disparaissent entre deux ouvertures successives :

$$g_\lambda(X) = \left(\text{Mes}(X_{\lambda B}) - \text{Mes}\left(X_{(\lambda+1)B}\right)\right) \Big/ \text{Mes}(X)$$

Une analyse d'image basée sur les densités granulométriques est un bon indicateur des gabarits-types des éléments connexes composant un ensemble. C'est pourquoi nous avons utilisé cette approche pour décrire les différentes textures sur une image binaire (MERING *et al.*, 1997). La mesure est basée sur la transformation de l'image binaire par ouvertures successives à l'aide d'un élément structurant convexe de taille croissante. Le calcul de la surface et du nombre de particules éliminées à chaque ouverture permet d'évaluer la distribution des tailles des unités de chaque image.

3. De la macrotexture à la carte de la densité

3.1. Principes de la cartographie de la macrotexture

Pour réaliser une carte basée sur la macrotexture de l'ensemble extrait sous forme d'une image binaire, nous avons effectué au préalable l'analyse de la macrotexture au voisinage de chaque pixel P de l'image, matérialisé par une fenêtre glissante F(P). Chaque pixel est alors décrit par les paramètres définissant la macrotexture de son voisinage. La carte finale sera obtenue à l'aide d'une classification automatique de la totalité des pixels de l'image d'origine. Pour décrire la macrotexture autour d'un pixel P, nous avons donc effectué l'analyse granulométrique à l'intérieur de la fenêtre glissante F(P) centré sur P. Nous n'avons retenu que les densités granulométriques gi, comme variables descriptives. Les variables de macrotexture décrivant le pixel P seront Vi tel que :

$$Vi(P) = gi[F(P)]$$

où gi[F(P)] est la valeur de la densité granulométrique calculée après l'étape i d'ouverture d'ensemble F(P) par l'élément structurant convexe B de taille i. Ce calcul permet de produire une image en teintes de gris que nous appellerons V_1 (figure 1). De cette façon, on produit I images en teintes de gris correspondant chacune à une étape i de l'ouverture morphologique dans le processus granulométrique. Pour obtenir une carte de la macrotexture d'un ensemble, nous avons effectué une classification automatique des pixels à l'aide de la méthode des nuées dynamiques.

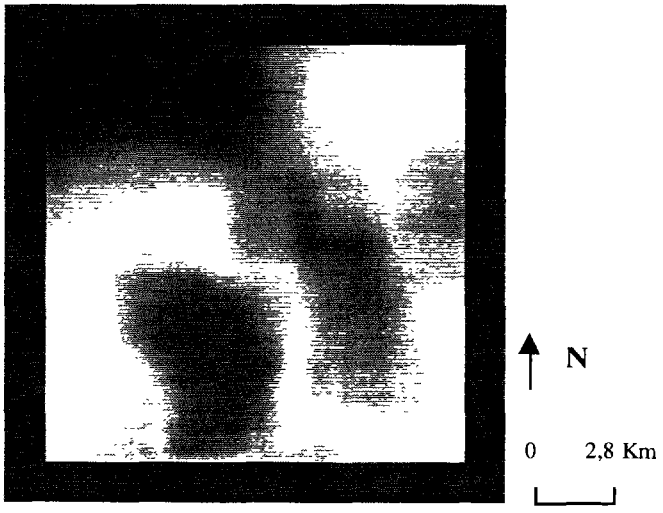


Figure 1. Image de densité granulométrique produite à partir de l'image binaire de la figure 2

3.2. Choix de la taille de la fenêtre

La valeur de la densité granulométrique dépend bien sûr de la taille de la fenêtre glissante F(P). La covariance d'un ensemble binaire permet de détecter la dispersion spatiale des entités connexes dans une direction donnée. C'est donc un bon indicateur de l'occurrence d'entités connexes à l'intérieur du masque d'analyse. En particulier, les pics du covariogramme correspondant indiquent l'apparition de nouvelles structures dans la direction analysée (COSTER et CHERMANT, 1989). Aussi avons nous choisi d'analyser les images binaires à l'aide d'une fenêtre carrée dont le côté serait approximativement égal à la distance maximale entre deux pics du covariogramme.

3.3. Classification des pixels

L'image résultant de la classification des images des densités granulométriques est une image à k couleurs, k étant le nombre de classes fixé par l'opérateur. Chacune des classes doit en effet être interprétée en terme de macrotexture. Par définition, une classe correspond à une catégorie de macrotexture. Par exemple, si, en moyenne, une classe a de fortes valeurs de Vi pour une valeur faible de i, elle pourra être interprétée comme une macrotexture essentiellement composée d'éléments de petite taille. Une analyse soigneuse de ces valeurs permettra d'interpréter les macrotextures et donc de passer de l'image classée à une carte.

4. Application à l'étude de la densité du bâti du milieu urbain

4.1. Analyse d'une sous-scène TM de Landsat de la région de Paris

Après avoir opéré un seuillage haut de la deuxième composante principale d'une sous-

image de TM sur le sud-est de Paris, nous avons produit une image binaire que nous avons assimilée à l'image de la densité granulométrique, au sud-est de l'agglomération parisienne (figure 2).

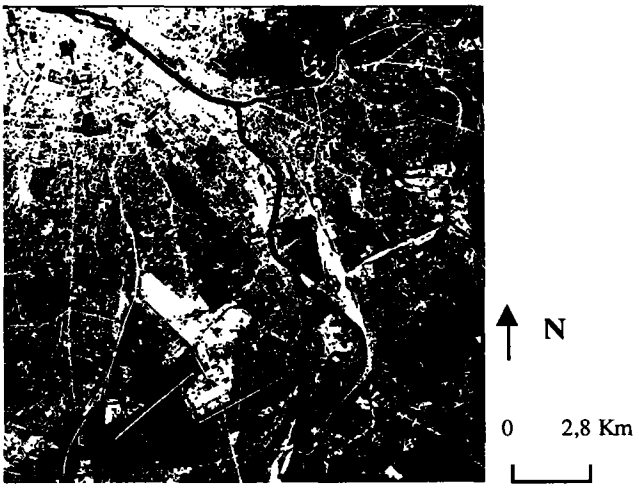


Figure 2. Image binaire du bâti de la région sud-est de Paris

Nous avons donc établi l'analyse macrotexturale de l'image binaire à l'aide d'une fenêtre carrée de 101 pixels de côté. L'analyse granulométrique s'effectue au sein de cette fenêtre glissante à partir de l'image de la figure 2, de 600 pixels de côté. Huit images de densités granulométriques Vi ont ainsi été produites. Nous avons effectué une classification en cinq classes à partir des huit images Vi ainsi produites. Les résultats de la classification sont résumés sur le tableau 1.

Pour déduire une carte de la macrotexture de cette image, nous avons réordonné les classes en fonction de la finesse croissante de la macrotexture. Chaque classe est affectée par une couleur, du noir au blanc, qui rend compte de la taille moyenne des agrégats qui composent la macrotexture. Les couleurs claires désignent les macrotextures à gros agrégats et les couleurs sombres celles à petits agrégats. Le noir sera utilisé pour représenter l'absence d'agrégat. Une telle carte est présentée sur la figure 3. On peut interpréter cette carte comme une carte de la densité du bâti. On peut constater sur la carte des macrotextures que la limite entre Paris et la banlieu suit à peu près les limites administratives, bien qu'il s'agisse dans ce cas de limites physiques.

Tableau 1. Classification des macrotextures de la scène de Paris: valeurs granulométriques des positions des centres de classes,

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8
Classe 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Classe 2	19,3	18,5	16,2	11,4	7,2	8,7	4,3	5,4
Classe 3	38,5	26,6	14,4	6,8	2,7	3,5	1,3	0,9
Classe 4	57,9	27,7	7,2	2,9	0,5	0,6	0,2	0,3
Classe 5	74,7	20,4	2,8	0,4	0,1	0	0	0

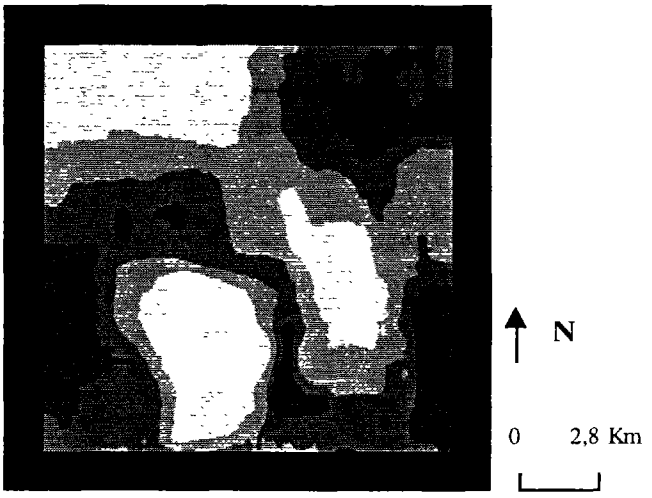


Figure 3. Carte de la densité des surfaces bâties du sud-est de Paris produite à partir de l'image binaire de la figure 2

4.2. Analyse d'une sous-scène HRV (XS) de SPOT de la ville de Tachkent

La même méthode de cartographie a été utilisée pour produire une carte de la densité de l'espace urbain de la ville de Tachkent (Ouzbékistan) acquise le 2 mai 1990. L'analyse granulométrique de l'image binaire (figure 4) a mis à jour trois tailles significatives. Les classes ont été réordonnées par ordre croissant de la taille moyenne dominante des agrégats. On présente sur la figure 5 la carte des macrotexures associée à cette classification.

5. Conclusion

Ces cartes servent à représenter l'organisation d'un thème, ici la densité du bâti du milieu urbain, suivant la taille des éléments qui le constituent. Une utilisation simple de ces cartes pourrait être la quantification systématique des zones bâties. Cette application de la description des macrotextures au milieu urbain reste bien sûr expérimentale. En ce qui concerne l'analyse macrotexturale proprement dite, il nous semble qu'il serait intéressant de l'appliquer à la délimitation physique des grandes concentrations urbaines.

Le champ d'application de l'analyse granulométrique, par les possibilités qu'elle offre de décrire quantitativement les ensembles spatiaux composés d'éléments de tailles différentes, ne se limite pas à l'étude de la croissance urbaine; on l'a utilisé pour évaluer quantitativement les différents degrés de contraction de la végétation en zone aride dans l'espace et dans le temps (MERING *et al.*, 1997).

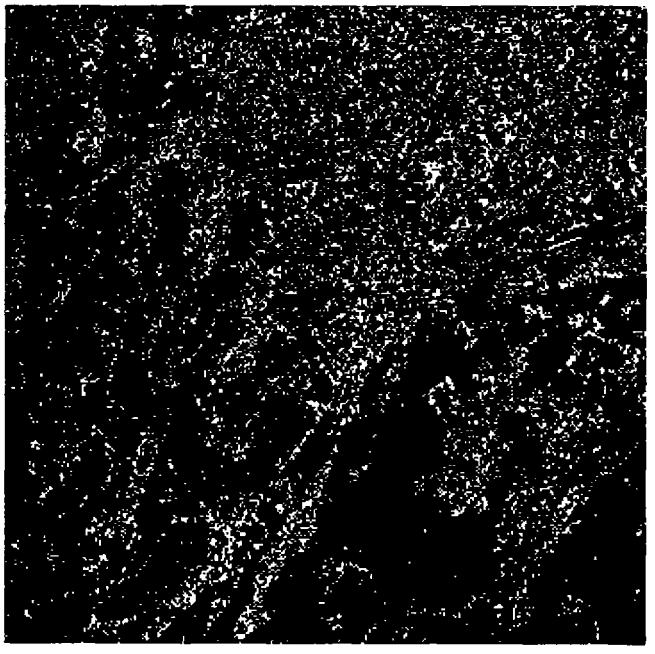


Figure 4. Image binaire du bâti de la région de Tachkent

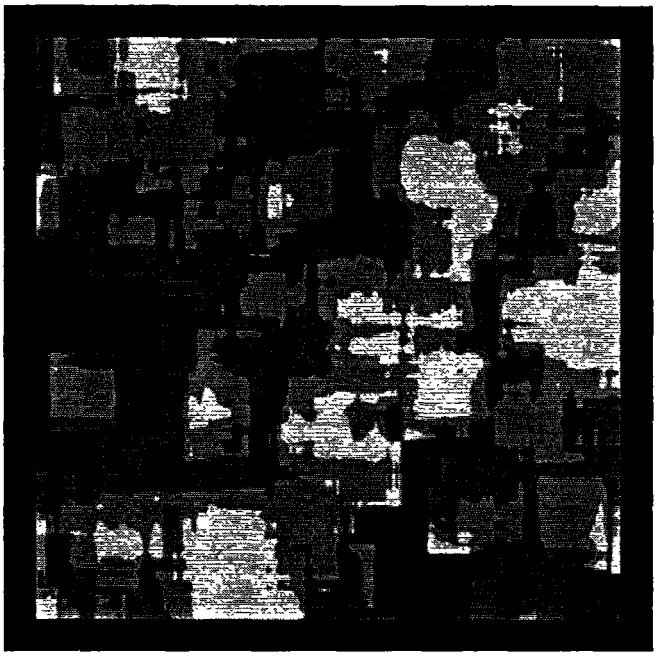


Figure 5. Carte de la densité des surfaces bâties de la région de Tachkent produite à partir de l'image binaire de la figure 4

6. Références

COSTER, M. et CHERMANT, J.L. 1989. Précis d'analyse d'image. Éditions CNRS, Paris, 423 p.

DUREAU, F. 1995. Images Satellites et démographie. Présentation d'une nouvelle méthode de production d'information sur les populations citadines. in F. Dureau et C. Weber. Télédétection et systèmes d'information urbain. Éditions collection Villes Anthropos, Paris, p. 271-284.

MATHERON, G. 1967. Éléments pour une Théorie des milieux poreux. Éditions Masson, Paris, 170 p.

MATHERON, G. 1975. Random Sets and Integral Geometry. John Wiley & Sons, New York.

MERING, C., CALLOT, Y. and KEMMOUCHE, A. 1997. Analysis and Mapping of Natural landsapes from satellites images using Morphological Filters. Microscopic, Microanalysis, Microstructure, n° 7, p. 323-330.

VOIRON, C. 1995. Analyse spatiale et analyse d'images. Éditions RECLUS, Montpellier.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUPELF-UREF. 2000. p. 41-48

5

Démarches de reconnaissance des formes urbaines et transfert méthodologique Nord - Sud (Europe - Afrique)

CLAUDE COLLET[1], JEAN-PAUL DONNAY[2] et CHRISTIANE WEBER[3]

[1] *Institut de géographie Université de Fribourg (IGUF), Pérolles, CH-1700 Fribourg, Suisse; téléphone : +41 (26) 300-90-23; télécopieur : +41 (26) 300-97-46; courriel : Claude.Collet@unifr.ch*

[2] *Département de géomatique, Université de Liège, 7, place du 20 Août, B-4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (4) 366-54-24; télécopieur : +32 (4) 366-56-93; courriel : Donnay@geo.ulg.ac.be*

[3] *IMAGE et VILLE (UPRES-A 7011), UFR de géographie, Université Louis Pasteur, 3, rue de l'Argonne, F-67000 Strasbourg, France; téléphone : +33 (388) 45-65-21; télécopieur : +33 (388) 45-33-88; courriel : Chris@lorraine.u-strasbg.fr*

Résumé

Les travaux de cette action de recherche partagée de l'AUF ont porté sur le développement de démarches de délimitation et de segmentation de l'enveloppe urbaine à l'aide d'images de télédétection. Elles ont été évaluées dans des contextes fort différents, autant sur le plan de l'organisation et de la dynamique des espaces urbains que sur celui de l'information à disposition. Que l'analyse s'oriente sur l'interprétation d'image assistée par ordinateur (IIAO) ou sur une chaîne de traitements numériques dirigés, l'intégration des images de télédétection dans une base de données géographiques est une nécessité, tant pour le calage et la validation des méthodes que pour l'exploitation des informations non spectrales. Dans le cadre d'une approche visuelle, la fusion d'une image panchromatique à haute résolution spatiale avec celles multispectrales, combinée à la production d'un indice de végétation, offre à l'interprète une information adaptée aux tâches de délimitation et de segmentation

de l'enveloppe urbaine. Dans un contexte de traitements numériques dirigés, les démarches de délimitation et de segmentation doivent intégrer la dimension spatiale de l'information. Les approches élaborées et retenues font appel à des outils de l'analyse contextuelle, tels que les opérateurs de morphologie mathématique. Cet article présente une vue synthétique et structurée des démarches expérimentées dans le cadre de cette recherche et appliquées à des agglomérations d'Europe et d'Afrique.

1. Introduction

Dans cet article on propose une présentation des résultats et des conclusions de travaux de recherche entrepris dans le cadre de l'action de recherche partagée de l'Agence universitaire francophone (AUF) (ARP 94.18) achevée à la fin de 1998.

L'objectif de cette recherche vise au développement et à l'évaluation de démarches méthodologiques de reconnaissance des formes urbaines à l'aide de l'imagerie de télédétection. À partir des nombreuses techniques de traitement d'image propres à ce domaine, il s'agit avant tout d'établir des chaînes méthodologiques applicables en analyse urbaine. L'accent porte principalement sur la cohérence des démarches et sur leur capacité de reproductibilité. L'ambition de transfert méthodologique Nord-Sud justifie d'autant plus le souci de reproductibilité des démarches élaborées.

Le déroulement des recherches réalisées dans les trois instituts concernés s'est opéré en deux temps. De nombreuses techniques de traitement d'image ont été évaluées et sélectionnées, puis combinées pour produire différentes démarches de reconnaissance. Puis, ces dernières ont été appliquées à trois sites européens (agglomérations de Genève, Liège et Strasbourg). Dans la seconde phase, les démarches qui ont démontré une certaine robustesse, elles ont été appliquées à des sites africains (Dakar, Sousse et Yaoundé). Ces dernières applications ont été réalisées par des chercheurs de différentes institutions du Sud, invités comme stagiaires dans nos trois instituts.

L'expérimentation et l'élaboration de telles démarches, mais aussi leur mise en application, exigent la disponibilité d'informations auxiliaires sur le site d'étude, tant pour le calage des méthodes que pour leur validation. Si cette disponibilité est souvent réalisée dans les pays du Nord, il en va différemment pour les pays du Sud. C'est en fait souvent la carence d'informations auxiliaires fiables et homogènes sur le territoire qui motive l'utilisation de documents de télédétection. Face à cette situation de lacune en informations exogènes, à laquelle nous avons été confrontés dans le cadre de ce projet de recherche, seules la connaissance et l'expérience de terrain de l'analyste permettent ces tâches de calage et de validation. Il nous est dès lors apparu évident de considérer aussi des démarches de délimitation et de segmentation de l'espace bâti faisant appel à l'interprétation d'image numérique assistée par ordinateur (IIAO). Cette dernière appellation nous semble plus appropriée à la situation de l'imagerie numérique actuelle que celle de PIAO (COLLET, 1999).

Pour la plupart des sites d'expérimentation, nous disposions d'une image HRV (XS) de SPOT et le plus souvent de son image panchromatique (P) associée. Pour certains autres sites d'application, nous ne disposions que d'images radar ou de photographies aériennes; ces situations nous ont ainsi permis de tester la souplesse des démarches retenues.

Les démarches méthodologiques élaborées relatives aux thèmes de la délimitation et de la segmentation de l'espace urbain sont brièvement présentées et commentées en fonction de leur potentiel et leurs limites dans la section suivante. Finalement, quelques réflexions sur la mise en œuvre de ces démarches et sur les travaux de continuation en cours sont

esquissées.

L'objectif de cet article est avant tout de présenter, de situer et de commenter les méthodes expérimentées dans le contexte plus vaste des démarches de traitement d'image. On ne peut y décrire dans le détail chacune des méthodes mentionnées, mais on propose au lecteur, par une bibliographie étoffée, des références aux articles descriptifs et justificatifs de ces méthodes.

2. Démarches méthodologiques élaborées

Les démarches méthodologiques élaborées pour la délimitation et la segmentation de l'espace urbain sont constituées d'une séquence d'étapes de traitements d'images. Le contenu et l'ordonnancement de chacune d'elles peuvent évidemment varier d'une situation d'application à une autre ainsi que les valeurs des paramètres des procédures de transformation. Cette propriété de flexibilité d'une démarche doit être vue plus comme un gage de robustesse face aux diverses situations d'application que comme un développement inachevé. De même, plusieurs des démarches proposées partagent des étapes constituées de techniques de traitement semblables : dans cet article on s'efforcera de cerner les traitements de base qu'elles contiennent. Les descriptions qui suivent supposent que les images traitées ont préalablement été géoréférencées. La présentation de ces démarches est structurée en trois volets, le premier relatif aux méthodes dans un contexte d'IIAO, le deuxième concernant le thème de la délimitation de l'espace urbain et le troisième relatif à sa segmentation.

2.1. Méthodes de rehaussement en IIAO

Les deux démarches d'assistance à l'interprétation visuelle retenues dans ce contexte d'application sont celles de fusion d'image et de production d'un indice de végétation. Elles assistent l'analyste de manière efficace à la fois à la délimitation et à la segmentation de l'espace urbain.

Parmi les nombreuses méthodes de fusion d'images HRV (XS et P) de SPOT testées (TERRETTAZ, 1998; RAKOTONIAINA, 1999; RAKOTONIAINA et COLLET, 1997), ce sont celles faisant appel à la transformée en ondelettes (ZHOU *et al.*, 1998) et celle nommée HPF (CHAVEZ *et al.*, 1991) qui produisent les images fusionnées les plus riches. Bien que la technique de transformée en ondelettes soit théoriquement plus élégante et d'un emploi plus large que celui de la fusion d'images, nous donnons cependant la préférence à la méthode HPF car elle est plus simple à mettre en œuvre et produit un aspect visuel fort comparable. Sur la figure 5-1 (voir cahier couleur), on présente un exemple de fusion par cette méthode sur la région de Strasbourg. Conjointement avec la production d'informations de calage et de validation, l'image composite fusionnée XS+P a permis une délimitation et une segmentation de l'enveloppe urbaine de Dakar (THIAM, 1998) satisfaisantes par une démarche d'IIAO.

La transformation des bandes spectrales originales rouge et proche-infrarouge (canaux XS2 et XS3 pour une image HRV de SPOT) en un indice de végétation permet une lecture de l'image en terme de densité de végétation (COLLET et ABEDNEGO, 1987). La densité du bâti est ainsi inversement proportionnelle à la valeur de l'indice de végétation. Les confusions subsistant entre le bâti, l'eau et les sols nus pourront généralement être dissipées par les connaissances du terrain et la capacité visuelle de l'analyste. Des multiples indices

de végétation proposés dans la littérature (BANNARI *et al.*, 1997), c'est l'indice de végétation perpendiculaire (PVI) qui a retenu notre attention. Il allie une relative simplicité de mise en œuvre à une robustesse face aux variations d'éclairage. Dans le cas d'une exploitation diachronique, on pourra faire appel à l'indice de végétation perpendiculaire normalisé (NPVI).

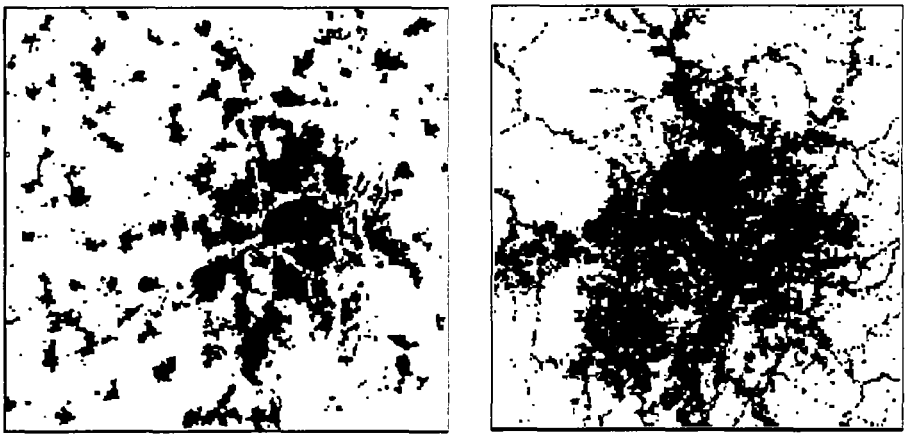
Cette transformation en indice de végétation a aussi été largement exploitée dans le cadre des autres démarches de délimitation et de segmentation de l'espace urbain.

2.2. Délimitation de l'espace urbain par approches numériques

La tâche de délimitation de l'enveloppe urbaine consiste à identifier, dans l'image, l'extension du bâti sous la forme d'une zone la plus compacte possible. Les limites définies devront donc être à la fois continues, fermées et présenter une sinuosité minimale. Lorsque l'application requiert une mise en relation de cette zone avec l'entité d'agglomération suivant une définition administrative, il sera nécessaire d'ajuster la démarche de délimitation par ajout d'étapes de traitement ou par aménagement à l'intérieur de certaines étapes. Les mots clés de la délimitation spatiale étant posés, il n'est pas surprenant que les démarches retenues fassent appel à des outils de morphologie mathématique ou d'autres outils de l'analyse spatiale contextuelle.

Pour les mêmes raisons, il n'y a rien d'étrange au fait que les méthodes strictement spectrales (classification, seuillage) produisent des résultats souvent médiocres dans le cadre de ces tâches. Les tentatives de délimitation de l'enveloppe urbaine sur la seule base d'une image PVI seuillée ont clairement montré, outre le potentiel de cet indice de végétation, que l'enveloppe produite souffre de nombreuses discontinuités spatiales (mitage) et que la définition de la valeur de seuil entre urbain et non urbain est particulièrement délicate et critique (WEBER, 1995; THIAM, 1998).

Plusieurs démarches faisant appel aux outils de morphologie mathématique ont été évaluées (WEBER, 1995 et 1997; WEBER *et al.* 1997, WEBER et HIRCH, 1997); c'est la démarche générale de texture par morphologie mathématique (TMM), variante d'une méthode décrite par ARMAND (1995), qui a produit la délimitation la plus efficace pour l'ensemble des zones urbaines traitées. Le principe général de la démarche consiste à dériver une image des structures sombres et claires à partir de l'image originelle, puis une image de texture (variabilité) en est déduite, sur laquelle on applique finalement une série d'opérateurs de morphologie mathématique pour produire l'image de l'enveloppe du bâti (TERRETTAZ, 1998). Cette démarche a été mise en œuvre sur des images de nature et d'origine différentes (P, XS2, XS2+P, RSO de ERS-1, photographies aériennes couleur, indice PVI). Elle a été évaluée de façon très positive par les auteurs de ces applications qui ont relevé sa grande adaptabilité (ASSAKO ASSAKO, 1998; GALLICE, 1999; MOUAFO, 1999; TERRETTAZ, 1998; THIAM, 1998; WEBER, 1997 et 1998). Les résultats de la méthode TMM sur les agglomérations de Strasbourg et de Yaoundé sont illustrés à la figure 2.



a) b)

Figure 2. Résultats de la méthode TMM sur les agglomérations de Strasbourg et de Yaoundé. En a) le masque du bâti de Strasbourg produit à partir de l'image HRV P de SPOT du 3/92. En b) le masque des surfaces minéralisées de Yaoundé établi à partir de l'image HRV (XS2) de SPOT du 2/92

Une approche alternative, basée sur la méthode du potentiel (DONNAY, 1992; BINARD et NADASDI, 1997) a été expérimentée avec succès sur plusieurs sites d'expérimentation. On y propose une alternative à la démarche TMM, tant du point de vue de l'information contenue dans l'image originelle (des catégories de bâti) que de celui de l'information dérivée. Son champ d'application se situe aussi bien dans la problématique de la délimitation de l'enveloppe urbaine que dans celui plus complexe de sa segmentation (DONNAY, 1992; THIAM, 1998). Cette image résultante peut ensuite être traitée pour satisfaire aux exigences de la notion d'agglomération opérationnelle (DONNAY et LAMBINON, 1997).

2.3. Segmentation de l'espace urbain par approches numériques

La tâche de segmentation consiste à découper l'enveloppe urbaine en sous-unités homogènes d'un point de vue thématique (densité du bâti ou de la population) et compactes sur le plan spatial. Les reproches formulés à l'égard de la démarche faisant uniquement appel aux valeurs de l'indice PVI sont les mêmes que ceux mentionnés précédemment. Suite aux expériences réalisées, deux approches ont été retenues, qui intègrent des étapes d'analyse contextuelle.

La démarche de potentiel mentionnée ci-dessus permet, par un seuillage multi-niveau, de segmenter la surface de potentiel de densité en zones (BINARD et NADASDI, 1997; THIAM, 1998).

La seconde approche, dénommée austèrement par son auteur PVI-MM-VOI (TERRETTAZ, 1998), propose l'exploitation de l'indice PVI dans une succession d'étapes de traitement contextuel : morphologie mathématique (MM) et analyse de voisinage (VOI). Un exemple de segmentation de l'enveloppe bâtie de l'agglomération de Genève à l'aide de cette méthode est présenté à la figure 5-3 (voir cahier couleur).

3. Conclusion

L'expérience acquise au cours de ces travaux de recherche a conforté notre position pour un certain nombre de constats, mais nous en a aussi fait découvrir et confirmer d'autres.

Le premier est que tout traitement d'image de télédétection requiert une géoréférence préalable de l'image, afin de l'intégrer aux informations spatiales auxiliaires dans le cadre d'une base de données géographique (BDG). Dans les rares situations où aucune information exogène n'est disponible, cette géoréférence permettra de constituer, avec l'image de télédétection traitée, une ébauche de BDG. C'est dans ce contexte notamment que le développement de méthodes d'IIAO est important, mais cette approche visuelle doit aussi être vue comme complémentaire à celles numériques dirigées ou automatiques (DONNAY *et al.*, 1999).

Le deuxième est que l'élaboration et l'évaluation de démarches méthodologiques exigent à la fois une grande rigueur et des ressources humaines importantes. Au fil de l'avancement de nos travaux et de nos collaborations multiples, nous avons produit un canevas méthodologique sous la forme d'un triplet de fiches (WEBER, 1997 et 1998), l'une décrivant les caractéristiques et paramètres de la démarche (fiche « méthode»), la deuxième relative à la description géographique des villes traitées et à la nature et à la propriété des images de télédétection sélectionnées (fiche « ville »), et la troisième présentant, pour chacune des démarches et des villes, les valeurs de paramètres et une évaluation des résultats (fiche « application »). Compte tenu des ressources humaines disponibles dans le cadre de ce projet, il n'a pas été possible de réaliser une évaluation exhaustive des approches sélectionnées pour chacun des sites, ni de peaufiner le contenu de ce canevas méthodologique.

Le troisième est que les problématiques de délimitation et de segmentation de l'espace urbain ne peuvent être traitées de manière satisfaisante en ne prenant en compte que le contenu thématique des images de télédétection ou de leurs dérivés. Si l'indice de végétation tel que le PVI a prouvé son intérêt dans l'approche de ces problématiques, il doit être exploité dans le cadre de procédures contextuelles, afin de prendre en compte la dimension spatiale de cette information. Les travaux de recherche poursuivis actuellement dans les instituts concernés s'orientent à la fois vers l'intégration plus poussée de cette composante spatiale (HE et COLLET, 1999) et l'évaluation des démarches proposées sur d'autres sites ou avec des images de systèmes d'acquisition différents (GALLICE, 1999; MOUAFO, 1999).

Finalement, le quatrième est que la robustesse des démarches méthodologiques établies ne se mesure pas uniquement en fonction de la diversité des sites analysés, mais aussi par rapport à leur capacité de traiter des images de télédétection de nature et de résolution variées. Ceci est d'autant plus actuel avec l'émergence des capteurs à haute résolution spatiale et spectrale (DONNAY *et al.*, 1999).

4. Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien de l'Agence universitaire de la francophonie (anciennement AUPELF-UREF) à travers l'action de recherche partagée (ARP 94.18) et des bourses de stage doctorante et post-doctorale (Fribourg, 1997, 1998); nous les en remercions vivement.

5. Références

ARMAND, M. 1995. Télédétection, urbanisme et aménagement. Les Cahiers pédagogiques du GDTA, Cahier A4, Toulouse, 150 p.

ASSAKO ASSAKO, R.J. 1998. Yaoundé : essai de délimitation de l'enveloppe urbaine à partir d'une image HRV de SPOT. Rapport de stage AUPELF-UREF, Fribourg, 12 p.

BANNARI, A., MORIN, D. et HE, D.-C. 1997. Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide d'indices de végétation dérivés à partir de données de hautes résolutions spatiale et spectrale. In DUBOIS, J.-M. *et al.* (réd.). Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éditions AUPELF-UREF, Montréal, p. 47-64.

BINARD, M et NADASDI, I. 1997. Modélisation des données issues des traitements d'image satellitaire en vue de la réalisation d'un schéma de structure transfrontalier. Rapports scientifiques et techniques 10, SURFACES, Université de Liège, Belgique, 41 p.

CHAVEZ, P.S., SIDES, S. and ANDERSON, J. 1991. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data : Landsat TM and SPOT Panchromatic. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , vol. 57, n° 3, p. 295-303.

COLLET, C. et ABEDNEGO, B. 1987. L'évolution du paysage urbain étudiée à l'aide d'un indice de végétation. DONNAY, J.-P. (réd.). Télédétection satellitaire et espaces urbains. Notes de Recherches de la Société Géographique de Liège, n° 9, p. 3-17.

COLLET, C. 1999. Vers un système d'assistance à l'interprétation d'images numériques de télédétection (IIAO). Colloque International Télédétection et Géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux, 67ème Congrès de l'ACFAS, Ottawa, 10-12 mai 1999.

DONNAY, J.-P. 1992. Applications de la télédétection satellitaire à l'aménagement du territoire et à l'urbanisme. In Télédétection spatiale. Cépaduès-Éditions, Toulouse, p. 221-241.

DONNAY, J.-P., COLLET, C. et WEBER, C. 1999. La télédétection urbaine à l'aube de la très haute résolution spatiale. Programme et résumés des VIIIes journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'IAUF, Lausanne, 22-25 novembre 1999, p. 34.

DONNAY, J.-P. et LAMBINON, M. 1997. Détermination des limites d'agglomération par télédétection : discussion méthodologique et application au cas de Huy (Belgique). In DUBOIS, J.-M. *et al.* (réd.). Télédétection des milieux urbains et périurbains. Montréal, AUPELF-UREF, p. 239-246.

GALLICE, C. 1999. Extraction d'informations en milieu périurbain par photo-interprétation assistée par ordinateur. Rapport de stage à l'Institut de géographie de l'Université de Fribourg, Université Jean Moulin, Lyon 3, 114 p.

HE, H. et COLLET, C. 1999. Combining spectral and textural features for multispectral image classification with artificial neural networks. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June 1999.

MOUAFO, D. 1999. Intégration d'images de télédétection et de données multisources dans un SIG en vue de la cartographie urbaine et du suivi de l'urbanisation à Douala au Cameroun. Rapport de stage AUPELF-UREF, Fribourg, 47 p.

RAKOTONIAINA, S. 1999. Analyse multirésolution par ondelettes en traitement du signal. Exemples d'application en télédétection et en géophysique. Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, 132 p.

RAKOTONIAINA, S. et COLLET, C. 1997. Élaboration d'un outil mathématique : la transformée en ondelettes pour l'exploitation des données de télédétection. Applications dans les Sciences de la terre. Rapport de stage doctoral en télédétection AUPELF-UREF, Fribourg, 53 p.

TERRETTAZ, P. 1998. Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitales SPOT HRV. Thèse de Doctorat, Université de Fribourg Suisse, 304 p.

THIAM, S. 1998. Délimitation et segmentation urbaine à partir de la télédétection satellitaire : Application à la ville de Dakar (Sénégal). Rapport de stage AUPELF-UREF, Rapports scientifiques et techniques 15, SURFACES, Université de Liège, Belgique, 41 p.

WEBER, C. 1995. Télédétection des milieux urbains et péri-urbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. Rapport d'activité (1ère année), Action de recherche partagée de l'AUPELF-UREF. X/1.20.04/01/94.18.0., 55 p.

WEBER, C. 1997. Télédétection des milieux urbains et péri-urbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. Rapport d'activité (2ème année), Action de recherche partagée de l'AUPELF-UREF. X/1.20.04/01/96.18.0., 33 p.

WEBER, C. 1998. Télédétection des milieux urbains et péri-urbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. Rapport final, Action de recherche partagée de l'AUPELF-UREF. X/1.10.04/01/97.18.0., 20 p.

WEBER, C., DONNAY, J.-P. et COLLET, C. 1997. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. In DUBOIS, J.-M. *et al.* (réd.). Télédétection des milieux urbains et périurbains. Montréal, AUPELF-UREF, p. 133-144.

WEBER, C. et HIRSCH, J. 1997. Processus de croissance et limites urbaines. Photo-Interprétation n°. 97-1-2, p. 21-33.

ZHOU, J., CIVCO, D.L. and SILANDER, J.A. 1998. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT Panchromatic data. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 4, p. 743-757.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 49-59

6

Impact de la croissance spatiale de Bamako sur celle des localités périurbaines : l'apport des images HRV de SPOT pour le suivi de leur dynamique comparée

BALLA DIARRA[1] et JACQUES CHAMPAUD[2]

[1] *Institut Supérieur de formation et de recherche appliquée (ISFRA), BP: E475, téléphone et télécopieur : (223) 21 04 66, Bamako, Mali ; evima@ird.ml*

[2] *Laboratoire population - environnement, Case 10, Centre Saint Charles, 3, Place V. Hugo, 13331 Marseille Cedex 1, France; téléphone : 0491085302 ou 0491106357; champaud@newsup.univ-mrs.fr*

Résumé

À partir de 1945, et plus encore de 1960, Bamako, la capitale du Mali, a connu une croissance spatiale toujours plus forte. Cette extension démesurée pose aujourd'hui des problèmes cruciaux de maîtrise et d'aménagement de l'espace. Le renchérissement du coût de la parcelle de terrain a poussé les populations à s'installer dans un premier temps dans des zones spontanées. Celles-ci ayant été toutes « phagocytées » par la ville et dans l'impossibilité d'en créer de nouvelles, les populations se dirigèrent vers les réserves foncières des villages environnants qui connurent dès lors un étalement d'autant plus difficile à contrôler qu'il se déroule à un rythme très rapide. Les objectifs de ce travail sont : 1) de montrer cette évolution en taches d'huile de Bamako; 2) de mesurer sa croissance spatiale et celle des villages environnants depuis l'interdiction au début des années 1980, sous risque de démolition, des installations spontanées. À ces fins ont été utilisés d'anciennes cartes de Bamako et deux couples d'images HRV (P et XS) prises en 1986 et 1996. Des traitements d'amélioration et de recalage ont été effectués sur ces images afin d'obtenir deux bonnes compositions colorées P+XS (une de chaque année). Ces images

améliorées ont été imprimées à une grande échelle, celle du 1 : 25 000 et les contours des zones bâties interprétés visuellement sur calque. Il en fut de même pour les cartes. Ces différentes limites ont ensuite été numérisées et récupérées dans un logiciel de SIG afin de permettre les combinaisons diachroniques. L'analyse des cartes montre l'évolution en taches d'huile de la capitale malienne et son importante extension entre 1974 et 1986. L'autre résultat essentiel est que les zones périurbaines les plus importantes aujourd'hui se sont véritablement développées à partir de 1986.

1. Introduction

La croissance des villes des pays en développement et particulièrement celle des villes des pays d'Afrique au sud du Sahara a fait l'objet de nombreuses études à partir notamment de la fin des années 1970. La fin de ces années marque en effet une prise de conscience de l'importance des problèmes nés d'une urbanisation aussi rapide qu'incontrôlée particulièrement dans les capitales nationales. Bamako, capitale du Mali, voit ainsi apparaître son premier schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme.

Si les études urbaines de ces villes ont donc débuté il y a maintenant une bonne vingtaine d'années, un examen rapide de leur contenu montre qu'elles se sont davantage intéressées aux aspects démographiques et fonciers. L'analyse de l'extension spatiale comme vrai problème d'urbanisme et d'environnement n'apparaît que très partiellement, en ce qui concerne Bamako en tout cas. Même dans le schéma de Bamako et de ses environs, si on a toujours parlé de la maîtrise de la croissance spatiale, il fallut attendre ces dernières années pour souligner avec force qu'elle induit l'efficacité des aménagements à opérer. Mais ce qui a peu été étudié, c'est l'impact de cette urbanisation galopante des villes - capitales sur la consommation des terres des villages des environs immédiats. Il y a là un vrai champ d'étude, en ce qui concerne les environs de Bamako, pour les études urbaines à venir. La problématique est d'autant importante et d'actualité que les autorités chargées de l'urbanisme se sont vues contraintes soit de les intégrer au district (Bamako est un district depuis 1978), soit de les prendre en compte dans son schéma d'aménagement.

Mais le suivi de la dynamique des espaces urbains n'est pas toujours facile dans les pays pauvres. Il faut des documents cartographiques à jour et ce à des intervalles de temps réguliers. La faiblesse du budget alloué au Service de la cartographie et de la topographie fait que les couvertures photographiques aériennes, qui restent la première source de cartographie des espaces au Mali, ne peuvent être régulières. Quand elles sont acquises, leur traitement, effectué en dehors du pays, prend beaucoup de temps et aboutit à des cartes dépassées avant leur parution. Dans ces conditions l'image satellitaire peut être d'un grand apport pour la mise à jour de la cartographie des modes d'occupation du sol et pour la mesure des extensions spatiales. En effet ses avantages de coût, de rapidité d'acquisition et de traitement, de l'étendue de l'espace cartographié d'un tenant, font de l'image une source cartographique appropriée pour les analyses spatiales ne demandant pas la précision au centimètre près. Notre étude constitue une première ébauche pour le suivi comparé de l'évolution spatiale de Bamako et de six villages de la périphérie : Kalabancoro, Missabougou, Sébénikoro, Sénou, Sirakoro et Yirimadjo.

1.1. Présentation de Bamako

Située sur 12°30' de latitude nord et 8° de longitude ouest dans la partie sud-ouest du pays (figure 1), Bamako est aujourd'hui une ville millionnaire. Au recensement d'avril 1998, elle compte 1 016 000 habitants soit près de 40 % de la population urbaine totale du pays. Cette nombreuse population est la conséquence d'un fort taux d'accroissement annuel (4,5% en moyenne entre les deux derniers recensements, 1987 et 1998) entretenu essentiellement par l'exode rural. Ce gonflement rapide de la population a provoqué une demande de plus en plus forte de logement et a donc forcément entraîné une pression sur le foncier. En effet, se loger signifie à Bamako l'acquisition d'une parcelle de terrain. En l'absence de politiques d'attribution de terrain équitables et saines, une telle situation conduit à une spéculation immobilière (dans les domaines locatif et foncier) généralisée conduisant en une augmentation vertigineuse des prix : ce qui est effectivement le cas aujourd'hui à Bamako. Dès lors, les plus démunis, qui ne peuvent acquérir un logement dans ces conditions, ont une filière toute trouvée : celle des installations illégales dites spontanées. Jusqu'en 1979, l'installation dans ces zones pouvait se faire sans grande difficulté. Parfois quelques noix de cola suffisaient pour avoir une parcelle de terrain auprès des propriétaires coutumiers. La conséquence est une extension spatiale trop rapide de la ville. Mais les exigences d'une urbanisation maîtrisée ne permettaient pas de tolérer indéfiniment de telles installations. Des déguerpissements furent donc opérés à partir de 1979 jusqu'à une interdiction totale ces dernières années. Mais aucune mesure viable n'est prise pour permettre l'accès des pauvres au logement. Ils se tournèrent alors vers les villages environnants qui connurent un étalement considérable. Les plus importants de ces villages sont ceux que nous avons choisis d'étudier.

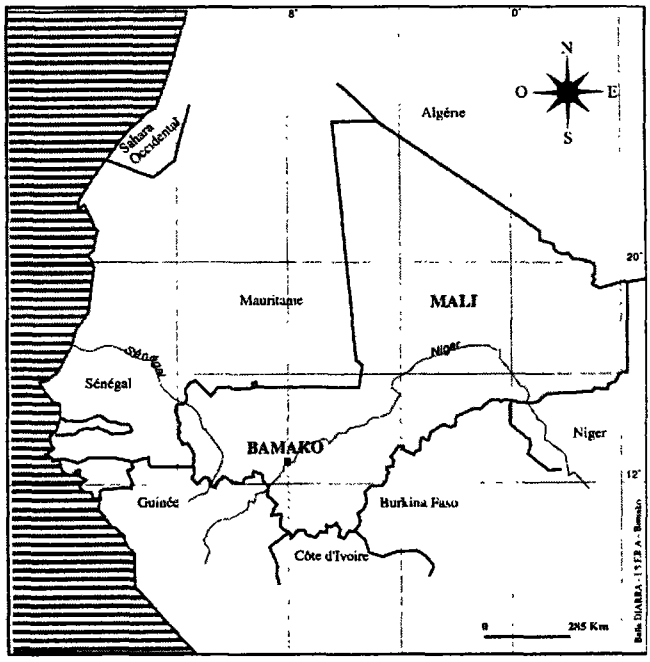


Figure 1. Localisation de Bamako au Mali et en Afrique de l'Ouest

1.2. Présentation des villages

Kalabancoro, situé au sud-ouest de la capitale, est un vieux village relevant de la circonscription administrative de Kati, devenu une importante ville secondaire située à seulement 15 km au nord-ouest de Bamako. Mais le village a atteint aujourd'hui sa limite naturelle avec la capitale. Cette extension importante est le fait d'une population d'origine essentiellement bamakoise, qui se recrute de plus en plus dans les couches moyennes et même supérieures de la fonction publique et du secteur privé. Ce phénomène, que l'on constate également dans les autres villages étudiés et qui se traduit par un renchérissement des coûts du terrain, explique le départ des populations sur des villages encore plus éloignés de Bamako.

Missabougou, Yirimadjo et Sirakoro sont des villages de l'est de la capitale. Les deux premiers sont considérés comme des quartiers de la capitale. Ils sont en effet intégrés au district et sont donc tout naturellement pris en compte dans son schéma d'aménagement. Sirakoro, par contre, relève de la circonscription de Kati. Plus ancien et plus proche de la capitale que les deux autres, sa croissance spatiale avait été aussi plus rapide.

Sénou et Sébénikoro sont également intégrés au district. Si le deuxième se situe à l'ouest de Bamako, le premier se situe au sud-est et a la particularité d'abriter l'aéroport international du pays depuis 1978.

De façon générale, l'extension spatiale de ces zones se déroulait dans des conditions illégales qui conduisirent l'État à opérer des déguerpissements violents en avril et mai 1995. L'objectif principal de cette étude est de mesurer la croissance spatiale de Bamako et de ces zones périphériques à partir de cartes mais aussi d'images du capteur HRV de SPOT pour montrer l'apport de celles-ci dans la régularité du suivi spatial au Mali. Un autre objectif est de faire ressortir la relation qui a existé entre les étapes de l'extension de la capitale et celle des villages périphériques.

2. Méthodologie

2.1. Documents cartographiques utilisés

Il n'est pas toujours facile de réunir, pour les localités africaines, une gamme intéressante de documents cartographiques permettant un suivi régulier de leur évolution spatiale. Pour un bon contrôle de la dynamique spatiale des villes ayant le rythme d'extension de Bamako, un intervalle régulier de 5 ans (comme le prévoit d'ailleurs le SDAU) entre les cartes nous paraît nécessaire. Le premier critère ayant présidé au choix des documents est donc l'intervalle de temps qui les sépare. Ensuite, il fallait des documents récents pour être proche des superficies actuelles. Ceci suppose que les documents soient d'obtention rapide. Enfin, les documents cartographiques retenus devaient permettre de suivre en même temps l'évolution spatiale de Bamako et celle des villages étudiés.

Les conditions pour un bon contrôle spatial connues, il fallait faire l'état des documents cartographiques disponibles pour apprécier l'opportunité de l'utilisation des images satellitaires. Sur le tableau 1, on donne pour Bamako les cartes et les couvertures photographiques existantes. Les cartes, dessinées généralement pour servir les différentes révisions du schéma, sont relativement nombreuses. Mais les intervalles de temps ne sont pas réguliers et montrent assez bien que le problème du suivi spatial de Bamako, à partir de cartes, est leur obtention en temps voulu. En effet, la révision du schéma étant prévue tous les cinq ans à partir de 1981, sa date d'application, on devait pouvoir tirer de la liste des cartes des intervalles de 5 ans : ce qui n'est pas le cas. En plus, la plupart des cartes sont publiées une ou plusieurs années après la couverture photographique de base. Elles sont donc dépassées au moment de leur publication. La carte de 1988 est à cet effet assez représentative. Elle a été produite à partir de la couverture photographique de 1983 et un complètement sur le terrain datant de 1985. Mais ce que le tableau ne dit pas, c'est que ce complètement a fait l'objet de réserves dans la version 1990 du schéma, les rédacteurs de celui-ci l'ayant jugé incomplet. Quant aux couvertures de photographies aériennes, elles semblent plus régulières. Une couverture récente existe même en 1995, soit une année seulement avant le début de nos travaux sur la dynamique spatiale de Bamako. Elles auraient donc pu être utilisées d'autant que leur résolution au sol est toujours plus grande que celle des images HRV. Mais, outre que les photographies ne sont jamais disponibles avant deux ans pour permettre aux chercheurs de faire de telles études au moment voulu, les traitements qu'elles exigent sont plus longs et cela même pour une interprétation sommaire comme celle des limites urbaines. Il faut en effet passer par les phases de numérisation, de rectification géométrique et surtout de mosaïquage. Cette dernière étape reste toujours fastidieuse malgré les progrès réalisés par les logiciels de traitement d'images ou de SIG. La lourdeur des traitements des photographies est la cause du retard dans la parution des cartes qui en sont issues. Si nous avons insisté sur la lenteur des traitements des photographies, c'est pour montrer l'importance de la régularité et de la rapidité d'obtention des données géographiques pour un bon suivi des espaces urbains à forte croissance. Il ne s'agit pas du seul problème rencontré dans l'utilisation des photographies à Bamako. En effet, la relative fréquence de celles-ci cachent mal le fait qu'il s'agit pour beaucoup d'entre elles de couvertures partielles (on peut remarquer que plusieurs cartes sont issues de différentes couvertures). Il y a donc également un problème de coût.

Tableau 1. Cartes de Bamako de 1918 à 1996

Années	Echelle	Titre de la carte	Photographies de base
1918	1 : 20 000	Bamako	Levés topographiques
1948	1 : 15 000	Bamako	Levés topographiques
1960	1 : 20 000	Bamako	1960
1974	1 : 50 000	Bamako et environs	1965, 1973
1980	1 : 20 000	Bamako et environs	1974, 1976, 1979
1988	1 : 50 000	Bamako et environs	1983, terrain en 1985
1991	1 : 50 000	Bamako et environs	1986, 1989
1996			1995

L'utilisation des seules cartes et/ou photographies aériennes ne permettant donc pas, dans la situation technique et financière actuelle du Mali, de respecter toutes les exigences d'un bon suivi spatial, les images HRV de SPOT, grâce à leurs avantages, pouvaient avantageusement être utilisées. Les documents retenus ont été en définitive :

- les cartes topographiques de 1918, 1948, 1960, 1974; si ces cartes ont permis un suivi lointain de l'espace bamakois, leur traitement n'a pas été très facile à cause de défauts dont nous parlerons plus bas;
- deux couples d'images HRV, pris en novembre 1986 et avril 1996; ces mois correspondent à deux saisons différentes à Bamako (fin de la saison des pluies et fin de la saison sèche). Cette différence de saisons a parfois rendu l'interprétation de l'emprise urbaine délicate. Les deux couples sont du même KJ : 40-325 (il existe pour les satellites à défilement une grille de référence qui indique pour toute région du globe couverte la position nominale des scènes en numéro de colonne K et de ligne J).

2.2. Traitements appliqués

L'information finale recherchée sur les documents était les limites des taches urbaines aux différentes dates. Leur superposition devait permettre d'apprécier l'ampleur de l'évolution spatiale des différentes zones, ses axes et son mode de progression. Avant d'atteindre ces dernières étapes, qui sont également les traitements communs aux deux types de documents (cartes et images), un certain nombre de traitements particuliers, notamment sur les images, ont été appliqués.

L'objectif des traitements sur les images était de parvenir à deux compositions colorées P+XS qui serviraient de documents d'interprétation des limites urbaines. Sur l'ensemble des images, des traitements d'amélioration de contraste ont été appliqués : étalement de la dynamique des images entre les bornes minimum et maximum et application du filtre de Wallis sur l'image panchromatique. Mais, ce filtrage a également été appliqué aux images XS de 1986 car l'image P+XS ne donnait pas satisfaction en se limitant au seul panchromatique. Les images de 1986 étaient en effet peu contrastées. À la fin de ces opérations, toutes les images ont été recalées les unes sur les autres en prenant le canal panchromatique de 1996 comme référence. Avant d'engager le processus de création des P+XS, la zone concernée par l'étude a d'abord été extraite sur chacune des images. Des néocanaux PXSi ont ensuite été fabriqués avec la formule :

$$(2*Xsi*Pw)/(XS1+XS2)$$

où PW = P ayant subi le filtre de Wallis.

La création des PXSi avait pour but de profiter pleinement de la grande résolution du panchromatique tout en conservant l'apport thématique spécifique des canaux XS. Les deux P+XS ont été créées en mettant le PXS3 dans le rouge, le PW dans le vert et le PXS1 dans le bleu. Avant de les imprimer, les compositions colorées ont été intégrées dans un logiciel de SIG (Savane 7.0, logiciel de l'Institut de Recherche pour le Développement) afin de leur donner une référence cartographique et une grande échelle (ici le 1 : 25 000). Les limites des taches urbaines ont été interprétées sur calque, numérisées puis récupérées dans le SIG. L'étape de l'interprétation n'est pas toujours facile, le tracé de limite étant un choix parfois difficile. Dans les zones d'extension spontanées par exemple, des maisonnettes généralement construites pour marquer l'appartenance des parcelles, existent ça et là et sont parfois très éloignées les unes des autres. La nature du problème n'est pas très différente dans les nouveaux lotissements. Le choix du tracé de la limite devient encore plus difficile quand deux fronts d'extension se font face. Dans ce cas, en effet, il faut s'assurer

que les taches urbaines font partie de la ville que l'on cherche à délimiter. Il faut donc se donner des clés d'interprétation que seul le terrain permet d'asseoir sans ambiguïté. L'interprétation a été plus difficile sur l'image de 1986. En fin de saison des pluies, la végétation est abondante et cache parfois des bâtis. Seule la connaissance du terrain permet là aussi de prendre sa décision.

Les cartes n'auraient pas demandé d'autre traitement que l'interprétation de la limite urbaine si elles n'avaient pas révélé des défauts de géométrie importants. Les cartes d'avant 1960 (celle de 1948 surtout), dessinées par le Service géographique de l'Afrique Occidentale Française (A.O.F.), qui devait être peu rigoureux dans l'application des principes cartographiques, portaient des échelles fausses. Ce défaut majeur a été révélé après intégration au SIG des limites urbaines numérisées. En effet la superposition de plusieurs couches supposant leur mise à une même échelle par le logiciel, le calcul des différentes proportions entre les échelles d'entrée montre automatiquement à l'écran toute erreur de géométrie. Pour connaître leur véritable échelle, il fallut mesurer la distance entre deux objets sur une carte exacte et la même distance sur la carte inexacte, et rectifier ainsi par règle de trois avec l'échelle de la carte exacte.

Ces défauts corrigés, les manipulations dans le SIG pouvaient se faire en vue de connaître les superficies et de voir les évolutions. Rappelons que le référentiel cartographique de la base de données ainsi créée était la projection UTM, ellipsoïde de Clarke 1880-IGN, fuseau 29.

3. Résultats

Sur la figure 6-2 (voir cahier couleur), on résume bien les évolutions opérées depuis 1918 (pour Bamako principalement) et depuis 1974 pour les villages environnants. Elle montre différentes inflexions (ayant pu consister en une augmentation ou à une diminution de la consommation d'espace) dans l'évolution spatiale des zones étudiées. La carte montre également les principaux axes d'extension.

En 1918 Bamako ne couvre que 210 ha (toutes les superficies ont été calculées avec le SIG Savane 7.0). Cette petite superficie est pourtant le résultat d'une longue évolution que nous avons longuement développée ailleurs (DIARRA, 1999). Il faut simplement retenir que la petite ville que constituait Bamako a eu dans l'histoire un rayonnement régional qui lui valut d'être une destination prioritaire de la colonisation française au Soudan. Cependant, à part quelques maisons construites pour les travailleurs de l'administration coloniale et quelques services qui se sont développés surtout à l'ouest, la ville n'évolue que très lentement. Il faut attendre son érection en capitale de la colonie du Soudan (actuel Mali) et plus encore la fin de la Première guerre mondiale, pour constater une réelle extension. Au milieu des années 1940, Bamako couvre une superficie de 1 800 ha soit près de 9 fois celle de 1918. L'explication réside dans la forte immigration des ruraux. Les emplois dans les services coloniaux et sur les grands chantiers d'urbanisation étaient pour ceux-ci un moyen d'obtenir de l'argent liquide pour payer par exemple l'impôt de capitation.

Cette évolution continue jusqu'en 1960, année de l'indépendance du pays sous le nom de Mali. On passe de 1 800 à 3 400 ha, soit près du double. L'après-guerre marque une nouvelle étape dans la vie des colonies. Les excès sont corrigés et les colonisés peuvent participer à la vie politique de leur pays. Les ruraux peuvent immigrer à la grande ville sans crainte du travail forcé. Si, en 1960, la ville commence à s'étendre sur la rive droite du fleuve, l'axe d'extension jusqu'à cette date apparaît nettement : la route de Koulikoro sur

la rive gauche. La ville, bloquée au nord par le plateau mandingue et au sud par le fleuve Niger, qui n'était pas encore traversé par un pont, ne pouvait que s'étendre le long de cette route.

Entre 1960 et 1974, Bamako s'étend relativement faiblement : de 3 400 à 5 000 ha. La lutte implacable que les autorités du moment ont mené contre l'exode rural de façon générale et, en particulier, celui en direction de Bamako (institution de laissez-passer obligatoire, retour forcé vers les villages d'origine, etc. d'après BLENAU et LA COGNATTA (1972), en est l'explication majeure. À Bamako même, une politique urbaine plus rigoureuse est menée qui supprime par exemple la gratuité de la parcelle de terrain. Ces mesures ont empêché des installations massives à Bamako jusqu'à la fin de la première République en 1968. Il faut même dire que la relative importance de l'augmentation spatiale de cette période (1960 – 1974) débute après 1968. Nous n'avons pas de document cartographique pour confirmer cette affirmation. Mais l'analyse des statistiques démographiques permet de la corroborer. Il n'y a pas de recensement en 1968, mais il y en a en 1960 et 1966, soit 130 800 et 161 300 habitants respectivement. En considérant l'accroissement annuel de la population entre les deux dates, soit 4,08 %, on a pu atteindre 170 000 habitants en 1968. En considérant ce dernier chiffre de population et celui du recensement de 1976 (deux ans seulement après 1974), soit 419 239 habitants, on peut calculer un taux d'accroissement record de 12 % l'an. Le Sahel est en effet frappé en ces premières années de la décennie 1970 par une crise alimentaire majeure. Les populations affluent au sud et d'abord sur la capitale où arrive en premier l'aide alimentaire mais aussi où l'État concentre ses efforts pour éviter l'éclatement de mouvements sociaux. Dans tous les cas, l'impact d'un taux d'accroissement aussi élevé pouvait être remarqué sur la consommation d'espace en un court temps (1968 à 1974). La carte de 1974 est d'ailleurs révélatrice d'un fait : l'extension a principalement concerné les quartiers spontanés périphériques. En effet, cette population immigrée, généralement pauvre, ne pouvait s'installer que dans des zones où la parcelle est acquise à un coût modique. D'autres études confirment l'arrivée massive de populations entre 1968 et 1976 (OUEDRAGO et PICHÉ, 1995). L'accroissement spatial a cependant été soutenu, bien que faiblement, par des lotissements réguliers. Mais déjà, sous la pression démographique, ces lotissements commencent à être le lieu d'une spéculation foncière dont les premières études urbaines sur Bamako se font l'écho (COULIBALY, 1974). La carte de 1974 montre également l'axe principal de cette extension : la route qui prolonge le premier pont vers l'aéroport international et vers Sikasso, capitale régionale du pays à la frontière ivoirienne.

Si l'extension est désormais véritablement amorcée sur la rive droite, elle se présente encore en des groupes de constructions éloignés par d'importants espaces nus. Ces « taches d'huile » se rejoindront plus tard à cause de lotissements officiels, formant ainsi un espace subitement très étendu. Ce qui est le cas dès 1986.

En 1986, à part quelques espaces difficilement constructibles ou litigieux entre les propriétaires coutumiers et l'État (comme à Niamakoro au sud de la ville), Bamako sur la rive droite est une ville en continu tout comme celle sur la rive gauche. Mais fait nouveau, elle devient désormais la plus spatialement étendue. Pourtant les cinq premières années de la décennie 1980 constituaient une période test pour le schéma directeur d'aménagement dont l'application commence en 1981. L'objectif principal du schéma durant cette période était de pouvoir maîtriser les occupations spontanées. Pour cela, démolitions et lotissements dits de blocage (bloquer l'extension de ces zones spontanées en les entourant par des lotissements réguliers) étaient les stratégies adoptées. Mais, en 1986, début de la première révision du schéma, on remarque une très nette progression de ces installations. Les gros quartiers spontanés de la rive droite en furent les principaux théâtres. On remarque dans le même temps un renchérissement du prix de la parcelle de terrain dans ces quartiers

spontanés également. Mais les villages environnants étudiés n'ont pas encore pris, à l'exception de Sébénikoro à l'ouest, beaucoup d'importance comme on l'atteste sur la figure 6-2 (voir cahier couleur).

Avec la version II du schéma (1990), on veut chercher les causes aux dérapages constatés dans son exécution afin de pouvoir leur trouver une solution. Les autorités pensent alors que la tentative de gérer toute la ville suivant un seul schéma n'est pas applicable. Il faut tenir compte de la spécificité des communes suggérèrent-elles. C'est alors que naissent les P.U.S (Programmes d'urbanisme sectoriel). On fait remarquer déjà la progression spatiale des villages environnants sous l'influence de celle de Bamako. Pour maîtriser leur évolution, il faut les prendre en compte dans le P.U.S. le plus proche, notamment les villages ne faisant pas partie du district. Mais les autorités ne peuvent mettre en application ces bonnes idées. Elles sont confrontées à de multiples problèmes qui empêchent de faire, comme prévu par son décret d'application, un bilan d'exécution du schéma tous les cinq ans. Il y a par exemple de sérieux problèmes d'obtention de données cartographiques à jour pour apprécier, au moment voulu, les évolutions sur le terrain (tableau 1). En effet, si les autorités savent presque toujours les endroits faisant l'objet d'occupations illégales, elles sont généralement tout autant surprises par leur ampleur. C'est ainsi que, de 1986 à 1996, on constate sur la figure 6-2 (voir cahier couleur) deux évolutions opposées : tandis que la croissance spatiale de Bamako semble s'être ralentie, celle des villages a pris plutôt de l'envol (tableau 2).

Tableau 2. Extension spatiale de Bamako et des villages environnants à partir des images HRV de SPOT de 1986 et de 1996

Localités	Superficies/ha 1986	Superficies/ha 1996	Différence 1996-1986	Taux d'accroissement annuel (%)
Bamako	9 800,0	12 800,0	3 000,0	2,8
Kalabancoro	241,5	1 297,7	1 056,2	18,3
Missabougou	24,9	110,8	85,9	16,1
Sébénikoro	176,0	212,8	36,8	1,9
Sénou	65,8	381,2	315,4	19,2
Sirakoro	95,0	200,5	105,5	7,7
Yirimadjo	10,9	149,9	139,0	29,9

La faiblesse relative de l'accroissement spatial de Bamako par rapport à la période 1974-1986 s'explique essentiellement par la diminution des installations spontanées à cause des mesures de dissuasion prises. Des déguerpissements violents ont par exemple eu lieu dans la période 1986-1996. En même temps, sous l'effet de la spéculation foncière, les coûts des parcelles légalement attribuées sont mis hors de portée des couches moyennes et pauvres de la population. Elles se rabattent alors sur les villages des environs immédiats qui sont désormais reliés à la ville par quelques véhicules de transport en commun. Ces villages connurent une extension si importante qu'incontrôlée qu'ils sont concernés, à l'exception de Kalabancoro, par les démolitions violentes d'avril et mai 1995.

Kalabancoro connut l'accroissement le plus spectaculaire, du moins en valeur absolue. Ce vieux village, s'il n'appartient pas au district de Bamako, est le plus proche. C'est pour cette raison que de nombreux Bamakois ont cherché à s'y installer. Ils ne le faisaient pas de façon spontanée mais en achetant des parcelles avec les bénéficiaires des lotissements réguliers que les autorités de la circonscription administrative de Kati y effectuaient. Le village est aujourd'hui en continu avec la capitale (figure 6-2) (voir cahier couleur).

La première révision du schéma avait prévu des extensions à Missabougou et Yirimadjo. Dans ce dernier village pourtant, aucun lotissement officiel n'a eu lieu; à Missabougou ce sont seulement 36 ha qui l'ont été (schéma, 1995). L'importante extension entre 1986 et 1996 s'explique donc essentiellement par les attributions coutumières même s'il est vrai que l'écho de leur prise en compte par le schéma est une cause importante de la ruée des citadins vers eux.

En valeur relative, Sénou a connu l'accroissement spatial le plus important. Abritant l'aéroport international du pays, le village s'est d'abord agrandi par l'installation des familles des militaires chargés du contrôle de l'aéroport mais aussi celles d'autres militaires qui en avaient manifesté le désir. Il se développait ensuite très rapidement le long de la route de Sikasso à cause essentiellement d'attributions coutumières irrégulières dont certaines furent déguerpies en 1995.

Sirakoro double sa superficie dans l'intervalle de temps. Cependant, il n'atteint pas le rythme d'accroissement de Sénou plus éloigné que lui de la ville. Sirakoro n'a pas beaucoup d'espace pour s'étendre. Au nord et à l'ouest, il est bloqué par une zone militaire et à l'est par des plantations. Les extensions qui avaient eu lieu au sud furent rasées en 1995 pour cause d'influence aéroportuaire.

Sébénikoro évolue peu entre 1986 et 1996, soit de 37 ha seulement. L'explication est à chercher dans le fait que ce village, bien que faisant partie du district, est trop éloigné de la ville de Bamako. La route qui les relie n'était pas goudronnée jusqu'en 1997.

L'installation des villages auprès d'axes routiers bien fréquentés, est un atout majeur pour leur développement. C'est justement le cas de Sénou sur la route de Sikasso et de Yirimadjo sur la route de Ségou, quatrième région administrative du pays. En plus de la facilité d'accès qu'elles offrent, la forte fréquentation de ces routes est une garantie de sécurité que ne donne pas la route de Sébénikoro.

4. Conclusion

L'examen des résultats montre une extension rapide de Bamako jusqu'en 1986 et une extension très rapide des villages environnants depuis cette date. Les différents taux d'accroissement sont si importants qu'il est aisé de comprendre qu'il s'agit plus d'une spéculation foncière que d'un réel besoin de loger. La moitié de ces parcelles reste en effet inhabitée. Cette rapidité de l'extension spatiale de la capitale et de ses environs, et les facteurs, comme la spéculation foncière ou les installations spontanées, qui l'entretiennent ne sont pas exclusifs du Mali. Par contre l'ampleur du phénomène d'extension et de ses facteurs aggravants varie d'une ville à l'autre. Ainsi, Bamako est plus étendue que Ouagadougou (Burkina Faso) et Yaoundé (Cameroun) alors que sa population est égale à celle de la première ville et inférieure à celle de la seconde. L'explication réside dans l'antériorité des politiques d'aménagement dans les deux villes et d'un suivi plus rigoureux des options proposées (ASSAKO ASSAKO, 1995; CHEREL, 1993). Mais il est à noter que le problème spécifique de l'extension des villages environnants dont on se préoccupe dans cette étude n'a pas été abordé dans les cas de Ouagadougou et Yaoundé. Peut-être que ce problème n'existe pas. Il y a donc nécessité d'un contrôle permanent de l'évolution de Bamako et de ses environs. L'image satellitaire, grâce à ses avantages de coût et de rapidité d'acquisition, est à cet effet une source cartographique excellente. Il faut veiller cependant que les images soient prises à la même saison pour minimiser les erreurs d'appréciation dues aux variations dans l'état des objets au sol (CHEREL, 1993). En plus, quelle que soit la qualité des images, le contrôle de terrain doit rester le dernier critère de validation des

résultats de l'interprétation.

5. Références

ASSAKO ASSAKO, R-J. 1995. Contribiution à la création d'un observatoire urbain utilisant la télédétection et les données géoréférencées à Yaoundé (Cameroun). Thèse de doctorat. Université de Paris X - Nanterre, 321 p.

BLENAU, D. et La COGNATTA, G. 1972. Évolution de la population de Bamako. Études maliennes n° 3, p. 26-41.

CHEREL, J.-P. 1993. Maîtriser l'aménagement urbain en Afrique sub-saharienne : l'intérêt des images-satellites SPOT. Exemples de Nairobi (Kenya) et Ouagadougou (Burkina Faso). Thèse de doctorat, Université Paul Valéry, Montpellier, 354 p.

COULIBALY, L. (1974). La spéculation foncière à Bamako. Mémoire de l'Ecole Nationale d'Administration, Bamako, 65 p.

DIARRA, B. 1999. Dynamique spatiale et politiques urbaines à Bamako : le rôle des images-satellite SPOT dans la gestion des villes. Thèse de doctorat, Université de Provence, Aix-en-Provence, 280 p.

OUEDRAGO, D. et PICHÉ, V. 1995. L'insertion urbaine à Bamako. Karthala, Paris, 206 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUPELF-UREF. 2000. p. 61-70

7

Analyse préliminaire en vue d'une modélisation des pertes d'énergie de la ville de Montréal : utilisation de la bande thermique TM de Landsat

RAMATA MAGAGI[1], MONIQUE BERNIER[1], GAËTAN LAFRANCE[2] et YVES GAUTHIER[1]

[1] *INRS-Eau, 2800, rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4C7; téléphone : (418) 654-3784; télécopie : (418) 654-2600; courriel : magagira@inrs-eau.uquebec.ca; monique_bernier@inrs-eau.uquebec.ca*

[2] *INRS-Énergie et Matériaux, 1650, boul. Lionel-Boulet, C. P. 1020, Varennes, Québec, Canada J3X 1S2; téléphone : (450) 929-8151; télécopie : (450) 929-8102; courriel : lafrgat@inrs-ener.uquebec.ca*

Résumé

Le contenu de cet article correspond à la première étape d'un projet de recherche axé sur l'évaluation quantitative des pertes d'énergie d'un centre urbain par l'utilisation des données de la bande thermique TM (10,4-12,5 µm) de Landsat. D'un point de vue théorique, la faisabilité de l'étude est démontrée. L'analyse de plusieurs transects tracés le long des images Landsat indique que le signal infrarouge thermique est conforme à l'occupation du sol. Toutefois, il est influencé par les conditions météorologiques. Le produit final de ce projet d'étude est un modèle statistique de pertes d'énergie reliant les observations satellitaires aux variables de terrain correspondant, d'une part, aux activités humaines et, d'autre part, aux apports naturels de chaleur. En résumé, dans cet article, on montre que l'approche statistique mérite d'être testée. Les bases du modèle sont présentées en tenant compte des informations sur le milieu environnant, l'utilisation des cibles urbaines et aussi leur caractéristique thermique.

1. Introduction

L'infrarouge thermique mesure l'émission provenant des surfaces terrestres et de l'atmosphère. Cette émission caractérise la quantité d'énergie thermique restituée par les corps et est mesurée sous forme de température radiative. En effet, sous l'action de l'énergie solaire ou de l'énergie domestique, des pertes de chaleur sont observées au niveau des bâtiments et de la surface du sol. L'objectif général de notre programme de recherche est de modéliser les pertes thermiques d'un milieu urbain, en tentant d'expliquer la contribution des activités humaines par rapport aux apports énergétiques naturels d'énergie. À première vue, la distinction entre ces deux contributions va s'observer par une nuit froide et claire. Mais, comme les images satellitaires disponibles sont généralement acquises le jour, vers 15 h GMT, à quel point peut-on séparer les activités humaines des apports solaires, par exemple ? L'activité humaine proprement dite se traduit au niveau des édifices par un échauffement général occasionné par le fonctionnement d'appareils électriques ou d'équipements de chauffage. Le phénomène de réchauffement s'observe également au niveau industriel et dans les transports. Par ailleurs, l'émission infrarouge liée aux activités humaines est dépendante de l'occupation du sol et des matériaux (nature physique, âge) qui composent la ville. Seul un modèle d'analyse énergétique des diverses consommations peut alors nous permettre de séparer l'apport solaire de l'apport humain, ce qui fait partie de la programmation scientifique future de notre projet. D'abord, faut-il s'assurer de l'impact de l'activité humaine sur la bande thermique TM6 (10,4-12,5 μm) du satellite Landsat, inventorier les données disponibles pour la mise au point des méthodes statistiques d'analyse des pertes thermiques des édifices d'une ville comme Montréal et discuter de la méthodologie à adopter. C'est le contenu de cet article.

2. Faisabilité de l'approche

2. 1. Point de vue énergétique

Le rayonnement net (R_N) issu de l'équilibre entre les rayonnements solaire (R_S) et thermique (R_L) s'écrit :

$$R_N = R_S + R_L \tag{1}$$

En décomposant R_S et R_L en flux montants et descendants, (1) devient :

$$R_N = (1-\alpha)R_S\downarrow + \varepsilon_a\sigma T_a^4 - \varepsilon_s\sigma T_s^4 \tag{2}$$

où, α est l'albédo de surface; σ est la constante de Boltzman, ε_a, ε_s, les émissivités de l'air et du sol; T_a, T_s, les températures de l'air et du sol.

L'équation 2 montre que le bilan radiatif est affecté par l'atmosphère et par une partie du rayonnement solaire incident. Cette dernière dépend des propriétés spectrales de la cible (influence de α). À la surface, le rayonnement net reçu est absorbé, puis restitué sous forme d'une énergie thermique. Une fois corrigée de l'atmosphère et de l'apport du rayonnement solaire, cette énergie mesurée dans l'infrarouge thermique sous forme de température s'apparente à des pertes thermiques. La contribution de l'atmosphère sur les données TM6 est corrigée, par contre l'apport solaire (1er terme) sera considéré comme variable explicative dans le modèle envisagé.

2.2. Point de vue des données TM6

Sur une image infrarouge thermique, les surfaces à fort et à faible dégagement de chaleur se distinguent nettement par leur niveau de gris. C'est ce contraste qui est l'élément majeur de l'utilisation de l'imagerie infrarouge thermique comme outil d'évaluation qualitative des pertes d'énergie des édifices urbains (Anonyme, 1983; PRÉVOST and BONN, 1979; LAFOREST and THÉRIAULT 1979). Nous sommes conscients que la résolution spatiale des images TM6, 120 m x120 m, élimine les analyses détaillées des bâtiments, ce qui n'est pas gênant car notre approche, bâtie par secteur de recensement, vise plutôt des applications dans le domaine de l'aménagement du territoire. Par exemple, est-ce qu'un quartier a une charge trop grande de perte thermique, créant du coup un inconfort pour la population environnante?

3. Données disponibles

Actuellement, nous disposons de quatre images TM de LANDSAT-5, dont deux images d'été, une image d'automne et une image de printemps. Elles ont été acquises sur l'île de Montréal (extrémités sud-ouest 44°30'N-72°36'O et nord-est 46°30'N-74°36'O) les 20-08-1984, 26-08-1986, 11-10-1997 et 12-04-1998. La grande originalité de l'approche est d'établir une relation statistique entre les données observées par satellite et celles observées au sol. Nos sources de données sont : a) le rôle d'évaluation de la Communauté urbaine de Montréal (CUM) qui contient un fichier géoréférencé donnant la surface, le nombre d'étage, l'âge, la valeur et le type de bâtiments (logements, service, industrie); b) Statistique Canada pour les limites des secteurs de recensement de la CUM et les données de recensement de 1996, soit la population par groupes d'âge; c) l'INRS-Urbanisation pour un indice de qualité; d) Environnement Canada pour les données météorologiques; et e) l'INRS-Énergie qui dispose d'une base de données sur les consommations énergétiques de l'île de Montréal.

4. Méthodologie

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche piloté par plusieurs centres de recherches, notamment l'INRS-Eau, l'INRS-Énergie et l'INRS-Urbanisation. Sur la figure 1, on montre la contribution de chacun des partenaires.

4.1. Traitement d'images du capteur TM

Toutes les images ont subi des corrections géométrique et radiométrique avec le logiciel PCI/EASI/PACE (PCI Geomatics Inc. 1997). Cette étape préliminaire est nécessaire afin de superposer les images au fichier numérique des limites des secteurs de recensement et aux données de terrain, et aussi de se ramener au signal du sol. La température de surface T_s (°C) est extraite avec le même logiciel sous l'hypothèse d'une émissivité du sol de 0,98 pour TM6, ce qui sous estime de 1,5 °C la température des cibles urbaines (PCI Geomatics Inc., 1997).

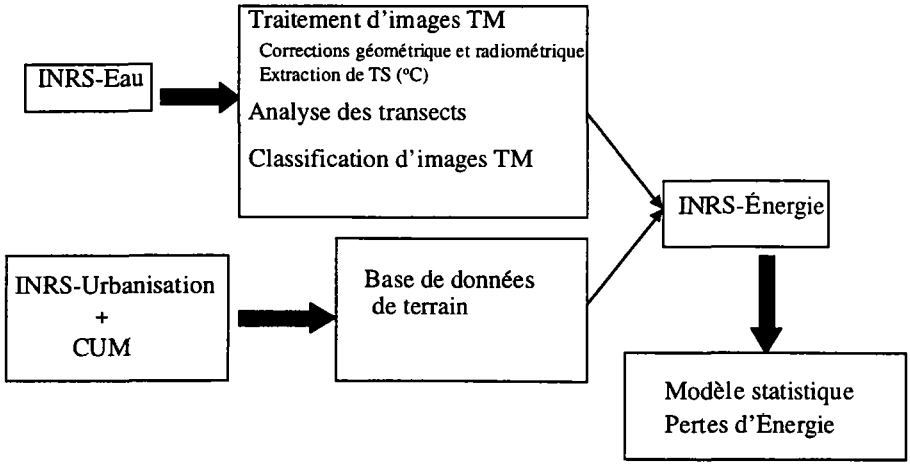


Figure 1. Contribution des trois centres de recherche de l'INRS et les principales étapes de la méthodologie.

4.2. Analyse de l'émission infrarouge thermique suivant des transects

Dans les centres urbains, l'énergie consommée occasionne des pertes thermiques entraînant de fortes concentrations de chaleur. Un gradient de température s'établit avec les surfaces environnantes et aussi entre les cibles urbaines en fonction de leur caractéristique physique et de leur occupation. Cette analyse consiste à vérifier, au sein du centre urbain, l'évolution de cette variété de réponse thermique à partir de plusieurs transects verticaux (nord-sud) tracés sur des images multidates de T_s (°C). Sur la figure 2, l'évolution de T_s le long des transects nord-sud passant par LaSalle et Longueuil montre : a) une bonne représentation de l'occupation du sol, faible valeur de T_s pour l'eau et augmentation au fur et à mesure qu'on se déplace des espaces couverts de végétation vers l'intérieur de l'île; b) un effet saisonnier reflétant non seulement la contribution solaire, $(T_s)_{avril}$ légèrement inférieur à $(T_s)_{août}$ malgré le fonctionnement du chauffage en avril, mais aussi le degré de consommation d'énergie, faible valeur de T_s en automne (octobre) comparée à $(T_s)_{avril}$. Ainsi, tout comme l'équation 2, les courbes d'avril et d'août montrent l'effet significatif du réchauffement solaire sur des images journalières de T_s. L'INRS-Énergie traitera cet aspect comme une variable explicative des résultats statistiques.

4.3. Classification

Plusieurs méthodes de classification des milieux urbains existent dans la littérature. Elles montrent la difficulté d'identifier les fonctions urbaines par les seules mesures spectrales et, pour améliorer les résultats, font appel à des données externes (BAUDOIN *et al.*, 1995; CHARBONNEAU *et al.*, 1985, 1989) telles que la géométrie des éléments urbains, les données cartographiques, les données statistiques, etc. Le but de ces travaux, est de trouver la meilleure combinaison de bandes spectrales qui regroupe les cibles urbaines selon leur fonction. Les résultats intéressent surtout les urbanistes pour l'inventaire de l'utilisation du sol.

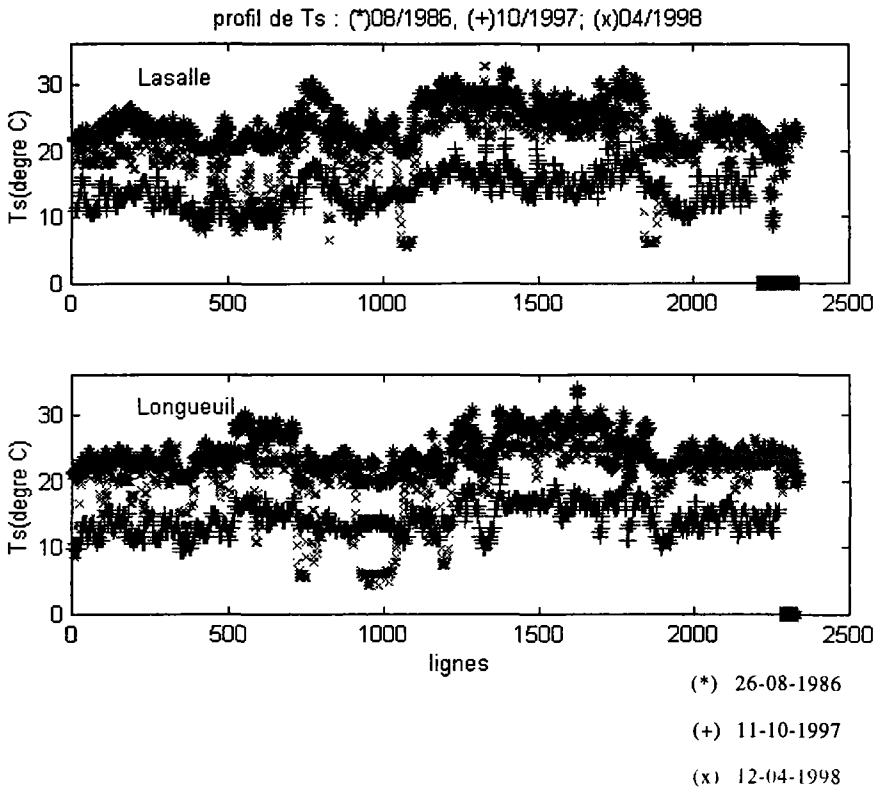


Figure 2. Profil nord -sud de la température de surface en °C évaluée à partir de la bande TM6 (image 1986, 1997 et 1998) le long des transects passant par LaSalle et Longueuil.

Dans le contexte de cet article, on peut se demander pourquoi procéder à une classification si les transects reflètent l'occupation du sol. L'objectif de la classification est double : d'abord inventorier les éléments et leur fonction au sein de chaque classe urbaine, et par la suite bâtir la méthode statistique sur des cibles classées au sein des secteurs de recensements. L'échelle de base est une classe donnée dans un secteur de recensement précis pour lequel nous disposons des données de terrain.

Pour chaque image, une classification est donc effectuée avec le logiciel PCI/EASI/SPACE (PCI Geomatics Inc., 1997) suivant une méthode non dirigée du maximum de vraisemblance. Les sites d'entraînement ont été choisis sur la base de l'observation d'une carte UTM au 1 : 50 000 de l'île de Montréal. Dans de nombreux travaux de classification, la bande 7 (moyen infrarouge) est utilisée conjointement aux trois, ou aux deux de ces trois autres bandes précitées (JENSEN, 1996). Dans cet article, le canal thermique (bande 6) rééchantilloné à 30 m x30 m a été rajouté aux canaux moyen infrarouge, proche infrarouge et rouge (bandes 5, 4 et 3 respectivement) pour la création des signatures. Il en résulte des classes liées à la température, regroupant des cibles urbaines dont l'émission thermique sera reliée aux conditions météorologiques, à la nature du matériau et à leur fonction.

5. Résultats

Pour chaque image, une classification est obtenue suivant onze catégories : eau, nuages + ombre des nuages, végétation naturelle, culture, sol couvert de végétation, sol nu, carrière, espace urbain (route, stationnement, etc.), grands bâtiments (usines + bâtiments), réservoirs de raffineries et les zones résidentielles. Cette classification, qu'on peut qualifier de niveau 1, ne permet pas de distinguer les centres commerciaux des bâtiments administratifs ou des logements multifamiliaux. Dans le contexte de l'étude, seuls les résultats des cinq dernières classes, directement liées à l'activité humaine en milieu urbain, seront discutés. Sur le tableau 1, l'indice de séparabilité, *Bhattacharrya Distance* (BD), rend compte de la séparabilité ou non de deux classes. En effet, deux classes sont séparables si leur distance de séparabilité, comprise entre 0 et 2, est élevée. Pour les images de 1986, 1997 et 1998, le tableau 1 indique une faible séparabilité entre les couples de signatures suivants : (sol nu, carrière), (grands bâtiments, espace urbain), (grands bâtiments, carrière), (espace urbain, résidentielle), (raffineries, carrière), (résidentielle, sol nu + végétation) et (espace urbain, carrière). À première vue, tout démontre l'importance du matériau : les carrières se distinguent difficilement des grands édifices et de l'espace urbain. Cette conclusion est inhérente à la méthodologie bâtie sur les propriétés spectrales de la cible. D'autre part, la végétation affecte l'indice de séparabilité : les zones résidentielles se distinguent des grands édifices.

5.1. Efficience des bandes 6, 5, 4 et 3 du capteur TM pour l'algorithme de classification

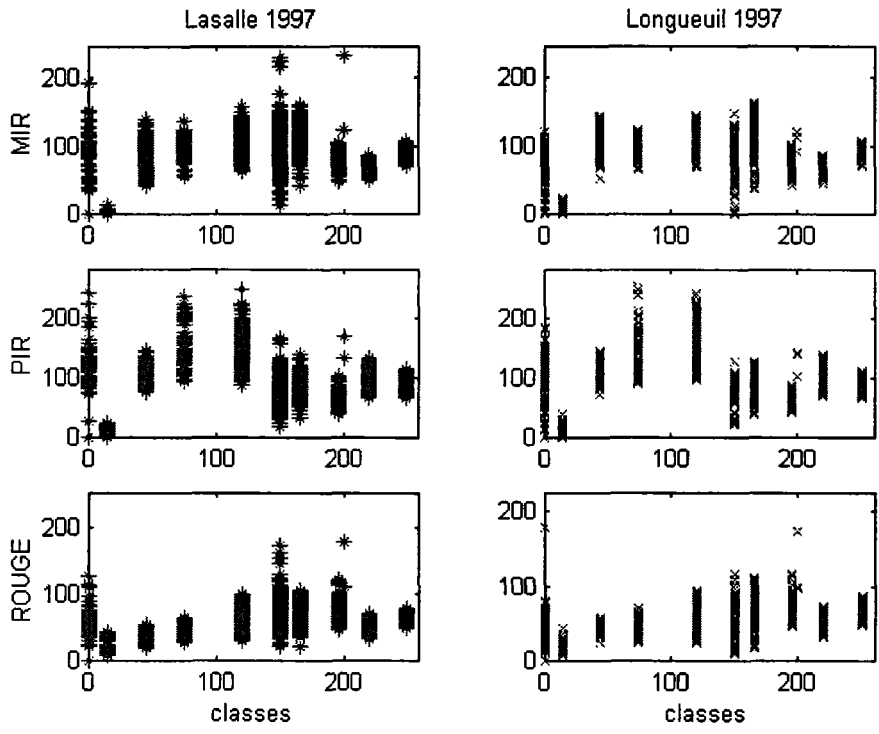
Le but ici n'est pas de décrire l'information contenue dans les bandes 3 à 6 du capteur TM, mais de montrer leur comportement spectral différent au sein des classes rencontrées sur le transects nord-sud passant par LaSalle et Longueuil. Pour l'image de 1997, sur la figure 3, on présente les signaux moyen infrarouge, proche infrarouge et rouge en fonction des différentes classes. Les courbes sont polynomiales, avec un maximum décalé, alors que le canal thermique (figure 4) montre un profil quasi linéaire. Le même profil est observé pour les années 1984, 1986 et 1998. De l'analyse des figures 3 et 4, il apparaît que :
- chacun des quatre signaux (canaux 3 à 6) se comporte différemment par rapport aux différentes classes, ce qui met en évidence leur différence de sensibilité aux différentes classes et donc leur aptitude à fournir une classification convenable, mais non forcément fine;
- pour la température T_s, la matière minérale (indice de classe>120) se détache du végétale, les maxima sont obtenus au niveau des grands bâtiments et des réservoirs de raffineries. La résolution spatiale de TM6 étant de 120 m x120 m, la mesure de T_s représente une valeur intégrée et non la température d'une cible spécifique, ce qui, à notre avis, masque l'effet de l'utilisation des cibles urbaines. Ce point important sera analysé avec les données de recensement.

5.2. Analyse par secteur de recensement

Le fichier des secteurs de recensement de la Communauté urbaine de Montréal (CUM) nous permet de connaître l'utilisation des cibles urbaines. Ce fichier numérique se superposant à nos images, l'analyse du signal infrarouge émis en milieu urbain tiendra alors

Tableau 1. Matrice de séparabilité des classes urbaines - images 1986, 1997 et 1998.

Indice BD	Résidentielle			Grand bâti			Espace urbain			Réservoirs			Carrières		
	1986	1997	1998	1986	1997	1998	1986	1997	1998	1986	1997	1998	1986	1997	1998
Grand bâti	1,847	1,946	1,897												
Espace urbain	1,431	1,643	1,503	1,425	1,266	0,988									
Réservoirs	1,980	1,982	1,896	1,950	1,873	1,542	1,975	1,870	1,712						
Carrières	1,935	1,893	1,863	1,658	1,064	1,287	1,943	0,968	1,262	1,754	1,550	1,425			
Sol	1,933	1,984	1,903	1,840	1,674	1,424	1,973	1,195	1,393	1,868	1,855	1,757	0,818	0,777	0,828



Les codes des classes d'occupation du sol sur l'axe des x :

4 : nuages + ombres	165 : sol nu
14 : eau	195 : grands bâtiments
24 : végétation naturelle	200 : réservoirs de raffineries
50 : culture	220 : résidentielle
120 : sol couvert de végétation	250 : espace urbain
150 : carrière	

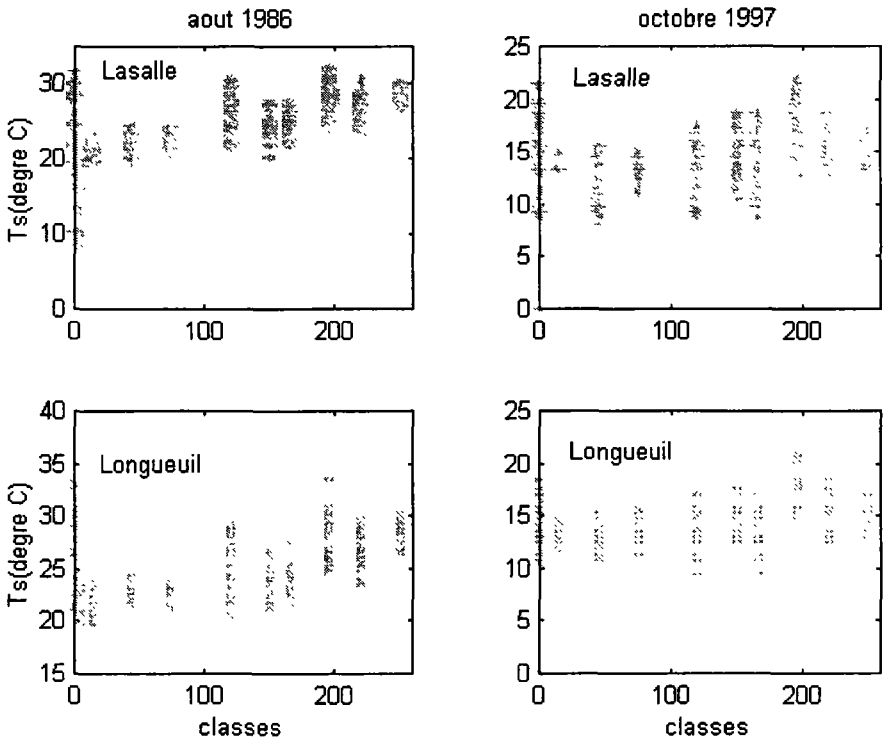
Figure 3. Signatures des bandes moyen infrarouge, proche infrarouge et rouge du capteur TM (image de 1997) en fonction des différentes classes obtenues le long des transects passant par LaSalle et Longueuil.

compte des données de terrain sur l'utilisation des cibles urbaines, disponibles par secteur de recensement, mais aussi de leurs caractéristiques thermiques. La finalité de ce projet c'est d'aboutir à un modèle statistique simple de perte thermique $P_{t,j}$ à un instant t et pour une zone j suivant :

$$P_{t,j} = f\left(\text{Dens}_{t,j}, \text{Car}_{t,j}, \text{Météo}_{t,j}, \text{Var}_{t-1}, \text{Éner}_{t,j}\right) \quad (3)$$

où Dens, Car, Météo, Éner font référence respectivement à la densité de population, à une série de caractéristiques (physiques et sociales), aux conditions météorologiques, à l'énergie consommée à l'instant t et dans la zone j; Var, est une ou plusieurs variable(s) explicative(s) pour ce qui s'est passé plus tôt.

L'équation (3) est indépendante des classes urbaines, mais sera développée par quartier, ce qui montre que l'introduction de TM6 dans la classification n'introduit en aucun cas une situation de « pre-dépendance » entre $P_{t,j}$ et le signal infrarouge thermique. Au stade



Les codes des classes d'occupation du sol sur l'axe des x :

4 : nuages + ombres	165 : sol nu
14 : eau	195 : grands bâtiments
24 : végétation naturelle	200 : réservoirs de raffineries
50 : culture	220 : résidentielle
120 : sol couvert de végétation	250 : espace urbain
150 : carrière	

Figure 4. Température de surface en °C évaluée à partir de la bande TM6 (images 1986 et 1997) en fonction des différentes classes obtenues le long des transects passant par LaSalle et Longueuil.

actuel des travaux, l'une des questions posées est suivant quel(s) critère(s) faut-il intégrer les « sous-fonctions » produites par secteur de recensement pour aboutir à un modèle de pertes d'énergie de l'île de Montréal dans sa globalité ? Un point non moins important à souligner est la complémentarité d'un modèle de pertes d'énergie avec les travaux réalisés sur les demandes et la consommation d'énergie des centres urbains (LAFRANCE and SURPRENANT, 1992; LARIVIÈRE and LAFRANCE, 1998).

6. Conclusion

Cet article doit être vu comme l'exposé d'une démarche pluridisciplinaire permettant d'accéder à un modèle statistique de pertes thermique d'un centre urbain. Les transects de température, T_s, obtenus à partir de trois images prises à des saisons différentes, montrent un signal conforme à l'occupation du sol. L'utilisation des cibles urbaines n'est pas perceptible au sein des classes, ce qui oriente la suite de nos travaux vers une compréhension de l'émission thermique en fonction des caractéristiques thermique de la source et des activités qu'on y exerce.

7. Références

Anonyme 1983. Urban/Suburban land use analysis. Manual of Remote Sensing, 2e édition, *American Society of Photogrammetry*, Virginia, vol. 2, p. 1571-1666.

BAUDOUIN, Y., CAVAYAS, F. et MAROIS, C. 1995. Vers une nouvelle méthode d'inventaire et de mise à jour de l'occupation/utilisation du sol en milieu urbain. Journal canadien de télédétection , vol. 21, n° 1, p. 28-41.

CHARBONNEAU, L., MORIN, D. et BROCHU, R. 1985. Détection des unités d'utilisation et de couverture d'un sol urbain au moyen d'une simulation SPOT. Cahier de Géographie du Québec, Université Laval, vol. 29, n° 76, p. 29-47.

CHARBONNEAU, L., COULOMBE, A., MORIN, D. et BROCHU, R. 1989. Développement d'une spatio-carte orientée vers la planification urbaine : résultats préliminaires. Cahier de Géographie du Québec, vol. 33, n° 88, p. 23-36.

JENSEN, J. R 1996. Introductory digital image processing : a remote sensing perspective. 2e édition, Prentice Hall, Upper Saddle River (N. J).

LAFRANCE, G. and SURPRENANT, J. P. 1992. Modelling the Global Energy efficiency of Urban Community: a sustainable city strategy. 15th International Conference of the International Association for Energy Economics, Tours, France, mai 1992.

LARIVIÈRE, I. and LAFRANCE, G. 1998. Modelling the electricity consumption of cities : effect of urban density. Energy Economics, vol. 21, p. 53-56.

LAFOREST, K. et THÉRIAULT, M. 1979. Thermographie au sol et économie d'énergie dans les bâtiments. Télédétection et gestion des ressources, F. J. Bonn, éditeur, vol. 1-2, p. 223-230.

PCI Geomatics Inc. 1997. PCI/EASI/PACE software.

PRÉVOST, C. et BONN, F. 1979. Problèmes d'interprétation des thermographies pour la détection des pertes d'énergie des bâtiments. Télédétection et gestion des ressources, F. J. Bonn, éditeur, vol. 1-2, p. 211-215.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 71-84

8

Télédétection radar et délimitation des formes urbaines : application à la ville de Douala au Cameroun

DIEUDONNÉ MOUAFO

Ressources naturelles Canada, Géomatique Canada, CIT-O, 615, rue Booth, Ottawa, Ontario K1A 0E9; Téléphone : +1 (613) 996-7114; télécopieur : +1 (613) 995-4438; courriel : dmouafo@nrcan.gc.ca

Résumé

Cet article porte sur la délimitation de l'enveloppe urbaine et l'extraction des structures urbaines de la ville de Douala à partir d'une image RSO de ERS-1 du 23-08-1994 (tableau 1). Encore limitée, l'exploitation des images radar pour l'analyse urbaine utilise généralement les filtrages, l'inférométrie et l'analyse de texture. Pour la reconnaissance des formes urbaines, on utilise des méthodes visuelles s'inspirant de la photo-interprétation et celles semi-automatiques basées sur le seuillage et les indices de végétation. Les limites physiques des agglomérations urbaines, ainsi que les structures urbaines, peuvent en effet être dérivées de la classification par généralisation du masque urbain à l'aide des techniques de la morphologie mathématique, qui suggère une extraction automatique de l'enveloppe urbaine. La méthode proposée ici est une analyse de texture impliquant une série d'opérations de seuillages, de dilatations et d'érosions, de classifications par segmentation, puis de filtrages de l'image. Le but est d'extraire des structures claires et des structures sombres, les deux composantes principales de l'espace bâti, du reste de l'utilisation du sol urbain. La morphologie mathématique a déjà été utilisée pour délimiter les villes du nord-ouest de l'Europe. La méthode appliquée à la ville de Douala s'inspire de celle de TERRETTAZ sur Genève, rebaptisée TMM (texture par morphologie mathématique). L'image des structures urbaines obtenue sur Douala met en exergue

malgré quelques confusions : le tissu urbain dense, les grands équipements, ainsi que les principaux axes d'urbanisation actuels de la ville. Sa validation à l'aide d'un fichier vecteur servant de réalité de terrain permet de constater une restitution, de l'ordre de 60 %, de l'enveloppe urbaine. Ce résultat est particulièrement intéressant au vu de la complexité de l'espace urbain des régions tropicales humides dominées par la végétation et de la pauvreté spectrale des images radar. L'emploi de filtres directionnels pourrait même permettre à ces images de servir de néo-canaux pour une éventuelle classification, ou d'être combinées avec des images optiques.

1. Introduction

Face à la croissance urbaine très rapide, les décideurs et les planificateurs des pays en développement se retrouvent généralement démunis faute de moyens de mise à jour rapide de la cartographie urbaine et d'outils de mesure appropriés pour appréhender l'expansion spatiale des agglomérations (OGAO, 1999). Malgré ses limites, la télédétection radar leur offre une alternative intéressante pour la saisie instantanée des grandes tendances d'urbanisation, particulièrement dans un environnement tropical humide à végétation dense et à forte couverture nuageuse rendant difficile le recours à l'imagerie optique. C'est précisément le cas de Douala, ville située en pleine forêt de mangrove équatoriale humide au fond du golfe de Guinée, en Afrique Centrale. En moins de 30 ans, la ville a vu sa population, ainsi que sa superficie décupler, passant de 150 000 à 1 500 000 habitants, et de 1 450 à 18 000 ha respectivement, entre 1960 et 1995. Faute d'outils cartographiques adéquats, aucun décideur n'est en mesure de déterminer les limites réelles de l'agglomération (MOUAFO, 1999).

Tableau 1. Caractéristiques de l'image RSO de ERS -1 de Douala

Mission : ERS-1 (ESA-1991)
Date d'enregistrement : 23.08.1994
Coordonnées KJ : 3173 x 3176
Coordonnées de la fenêtre : 1461 x 1051
Coordonnées planes (grille) : (901400, 930620 ; 1434010, 1455000)
Coordonnées géographiques : 9°30 O, 9°60 E ; 3°90 N, 4°15 N
Surface couverte : 100 km x 100 km
Longueur d'onde : 5,66 cm
Bande : C
Fréquence : 5,3 GHz
Polarisation : VV
Angle d'incidence : 23°
Résolution spatiale : 20 m (original : 12,5 m)
Niveau de traitement : B1

Face à un tel problème, l'imagerie radar offre des possibilités malgré ses limitations. En effet, les limites physiques de la ville, ainsi que la morphologie urbaine peuvent être dérivées de la classification par généralisation du masque urbain à l'aide des techniques de

la morphologie mathématique. Le masque est adapté aux limites statistiques existantes en fonction de son emprise dans chaque entité statistique ou commune pour définir les agglomérations politiques. Une telle approche a déjà été appliquée aux villes du nord-ouest de l'Europe (WEBER *et al.*, 1997).

L'imagerie radar utilise en effet les micro-ondes pour détecter la présence d'objets et déterminer leur position. Les méthodes d'exploitation des images radar sont encore limitées pour le moment et la plupart des fonctions de traitement d'images proposées actuellement concernent surtout l'imagerie optique. Elles incluent, entre autres, les filtrages, l'interférométrie et l'analyse de texture. Le filtrage a pour but l'élimination du bruit et des autres effets indésirables contenus dans les images de télédétection, qu'ils proviennent du système de mesure lui-même (capteur) ou bien des sources externes tels l'atmosphère ou le relief (BONN et ROCHON, 1992, p. 323). L'analyse de texture exploite l'aptitude de divers objets à répondre au signal radar pour analyser les caractéristiques des surfaces et des objets. Au contraire de l'analyse spectrale basée sur les niveaux de luminance dans une image, l'analyse de texture prend en compte la forme et la configuration d'un groupe de pixels de niveaux de gris différents.

Les méthodes de délimitation urbaine proposées reposent généralement soit sur la distinction urbain/rural, soit sur les classifications de l'occupation du sol (DONNAY et LAMBINON, 1997; DUBOIS *et al.*, 1998; TERRETTAZ, 1998). Selon la démarche choisie, on peut déduire ainsi de l'existence de méthodes de délimitation visuelles s'inspirant des techniques de la photo-interprétation (GUERRA *et al.*, 1997), des méthodes semi-automatiques recourant aux techniques du seuillage et de l'utilisation de divers indices de végétation (ASSAKO ASSAKO, 1998; THIAM, 1998), tandis que la morphologie mathématique par exemple suggère une extraction semi-automatique de l'enveloppe urbaine.

Cependant, cette approche pose un double défi : la texture complexe et la pauvreté spectrale des images radar (monobandes) les prédisposent peu à l'étude des milieux complexes tel que l'espace urbain (en attendant les images à très haute résolution). Par ailleurs, l'applicabilité au contexte urbain africain si particulier, d'une méthode initialement expérimentée sur les villes européennes, pose déjà en soi un problème méthodologique de transférabilité des modèles.

La méthode proposée repose sur l'analyse texturale basée sur la morphologie mathématique. La démarche implique une série d'opérations de seuillages (tableau 2), de filtrages, de dilatations et d'érosions successives puis de classifications de l'image dans le but d'extraire une image des structures claires et des structures sombres, les deux principales composantes de l'espace bâti, du reste de l'utilisation du sol urbain. La segmentation est une opération de classification permettant de diviser l'image en régions homogènes ou entités selon divers critères d'homogénéité telle la réflectance dans le cas présent (BONN et ROCHON, 1992, p. 370).

2. Méthodologie

La morphologie mathématique s'inscrit dans la théorie des treillis. Cela veut dire que non seulement les objets de la perception visuelle seront modélisés dans ce cadre, mais aussi les opérations que l'on effectue sur eux (ALBIOL and SERRA, 1997). On parlera, par exemple, du treillis des filtres morphologiques (BEUCHER, 1990). Selon les situations en présence, la modélisation s'exprime dans le formalisme déterministe ou aléatoire (ensembles et fonctions aléatoires booléennes par exemple). Selon le domaine, il peut s'agir par

exemple d'un ensemble de moyens logiquement cohérents capables de décrire le cadre géométrique dans lequel se déroulent les phénomènes étudiés, ou encore d'incorporer le plus intimement possible la géométrie des corps dans un modèle construit pour prédire leurs propriétés physico-chimiques (JEULIN, 1989, 1994 ; MEYER, 1997). La télédétection trouve dans la morphologie mathématique des moyens pour filtrer les images, les sous-échantillonner, les coder, en décrire les textures, etc. (BILODEAU and BEUCHER, 1994).

La morphologie mathématique propose en fait une approche non linéaire de traitement numérique d'image basée par exemple sur leur forme. Elle vise avant tout à quantifier les structures géométriques et elle s'intéresse à la forme des objets présents dans une image binaire, elle-même considérée comme un ensemble de points de l'espace ayant pour valeur 1 (HARALICK *et al.*, 1973; SERRA and CHERMANT, 1997). Le principe consiste à comparer les objets à analyser à un ensemble de formes connues constituant alors des éléments structurants. La démarche utilise une logique issue de la théorie des ensembles, basée sur des relations booléennes que sont l'union, l'intersection, l'inclusion et la complémentarité.

Les quatre opérations de base résultantes sont l'érosion, la dilatation, l'ouverture et la fermeture, avec pour effet au niveau des pixels des transformations de voisinage de l'image inclus dans l'objet structurant : amincissement, épaississement et squelettisation (BONN et ROCHON, 1992, p. 384). En effet, l'érosion rétrécit les objets en les séparant au niveau de leurs étranglements, alors que la dilatation connecte par coalescence les objets proches. L'ouverture filtre les contours en éliminant les petites convexités, alors que la fermeture comble les petites concavités et les trous tout en connectant les objets proches (TERRETTAZ, 1998, p. 142). On peut ainsi combiner diverses opérations sur les images pour extraire de manière automatique des structures qu'on souhaite isoler.

La délimitation de l'enveloppe urbaine ou encore l'extraction des structures urbaines en constituent des exemples. De nombreux auteurs ont ainsi produit des images de texture sur plusieurs villes européennes ou africaines en appliquant la morphologie mathématique sur des images HRV (P) de SPOT. WEBER *et al.* (1997) ont pu créer un masque du bâti de Strasbourg et de Genève en combinant un opérateur de texture nommé « Context » avec des filtrages par morphologie mathématique. « Context » utilise une fenêtre mobile pour isoler dans une image HRV des pixels de valeur radiométrique supérieure à un seuil préétabli. Le masque du bâti est ensuite obtenu suite à une série d'opérations de dilatations et d'érosions mettant en évidence les structures claires et les structures sombres correspondant aux surfaces artificialisées.

TERRETTAZ (1998) emprunte une démarche semblable rebaptisée TMM (texture par morphologie mathématique) sur la ville de Genève. L'image finale des structures est obtenue à la suite d'opérations de filtrages et de seuillage, puis de classification et de généralisation destinées à nettoyer l'image de texture initiale. La méthode TMM a également pu être appliquée sur une composition colorée HRV de Dakar (THIAM, 1998).

Notre démarche est une variante de la méthode dite TMM appliquée par TERRETTAZ (1998) sur les villes de Genève, de Liège et de Strasbourg (figure 1).

D'abord, une simple dilatation a été appliquée pour les structures sombres au lieu d'un « fond-de-vallée » (fermeture – image radar). Cela tient du fait que, contrairement aux images HRV, l'image radar présente des plages de très petite taille et de nombreux pixels isolés qui ont tendance à disparaître à l'application d'une érosion.

Par ailleurs, la classification de l'ensemble de l'image s'est avérée peu concluante et il a fallu s'en tenir à l'image des structures représentant le tissu urbain dense ainsi que certaines structures sombres. Ces dernières correspondent en fait aux grands équipements (aéroport, port, zones industrielles, gare), aux réserves foncières et à quelques secteurs d'habitat de faible densité. Sur l'image radar en effet, les plages de sol nu, de même que

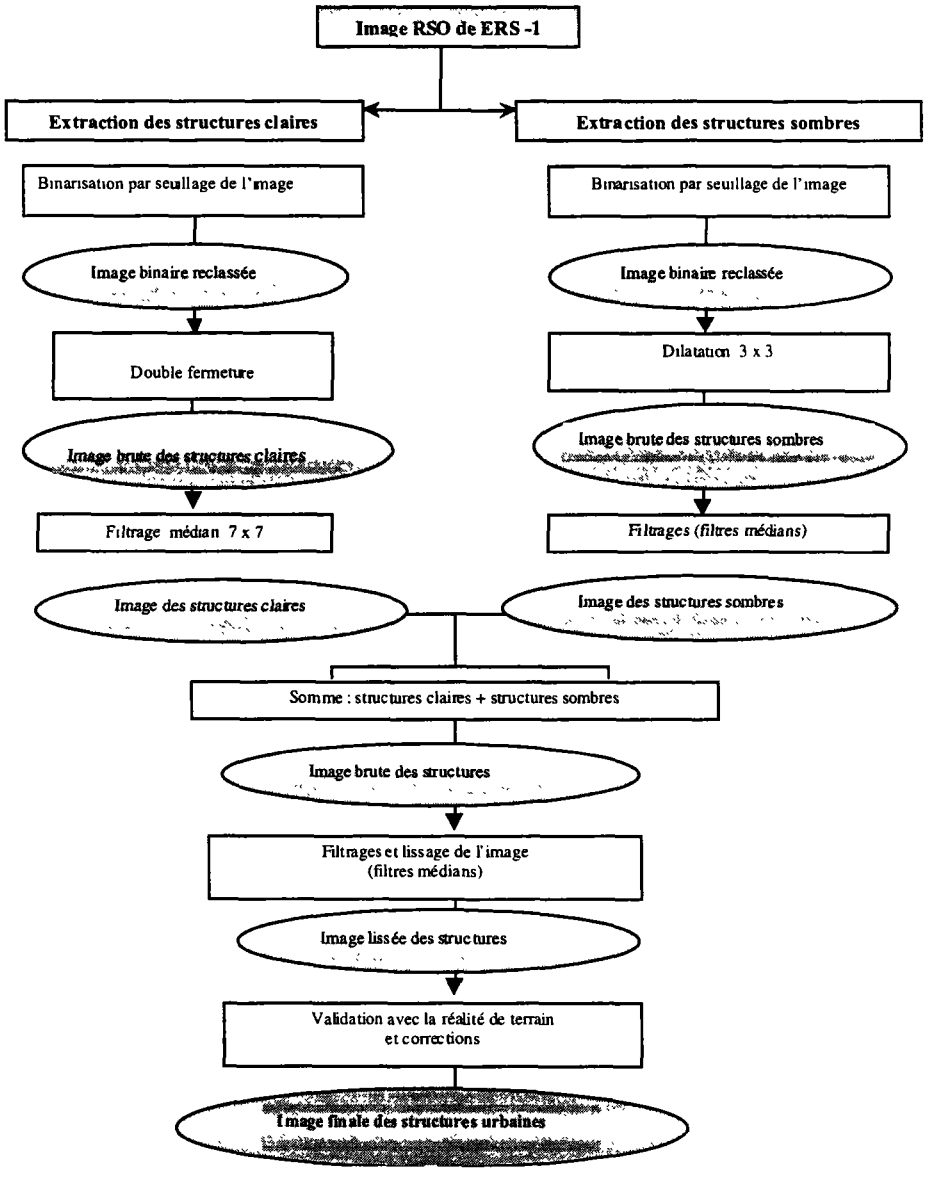


Figure 1. Schéma des séquences de la morphologie mathématique appliquée à l'image RSO de ERS-1 de Douala

les grandes surfaces planes (port) comme l'aéroport et les terrains industriels inoccupés (Bassa) ont une réponse spectrale assez semblable, d'où des risques de confusion.

3. Résultats

Plusieurs travaux antérieurs ont établi que certains objets dits « cibles dures », habituellement des structures construites par l'Homme, tels les bâtiments, les ponts ou les tours, produisent une diffusion d'une valeur de luminance disproportionnée par rapport à leur surface. Dans de tels cas, le signal reçu domine presque toujours son voisinage immédiat, étant donné que leur composition, très souvent métallique, favorise la réflexion spéculaire (rétropropagation) des ondes radar (BUSQUE *et al.*, 1998). Par contre, les surfaces planes et verticales au sol (cas de certains grands bâtiments comme les usines et les blocs d'immeubles) favorisent une réflexion multiple et directionnelle dépendamment de leur disposition angulaire, de leur orientation, de leur taille et de leur nature. Aussi, dans leur étude des mangroves de la région de Douala à l'aide de la même image RSO, TONYÉ et AKONO (1998, p. 246) constatent-ils que le signal rétrodiffusé des mangroves de grande taille est de plus forte intensité comparé à celle des zones à mangroves décadentes. Ce constat montre les difficultés d'interprétation des images radar en milieu urbain (BONN et ROCHON, 1992, p. 114; HENDERSON and ZONG-GUO, 1998).

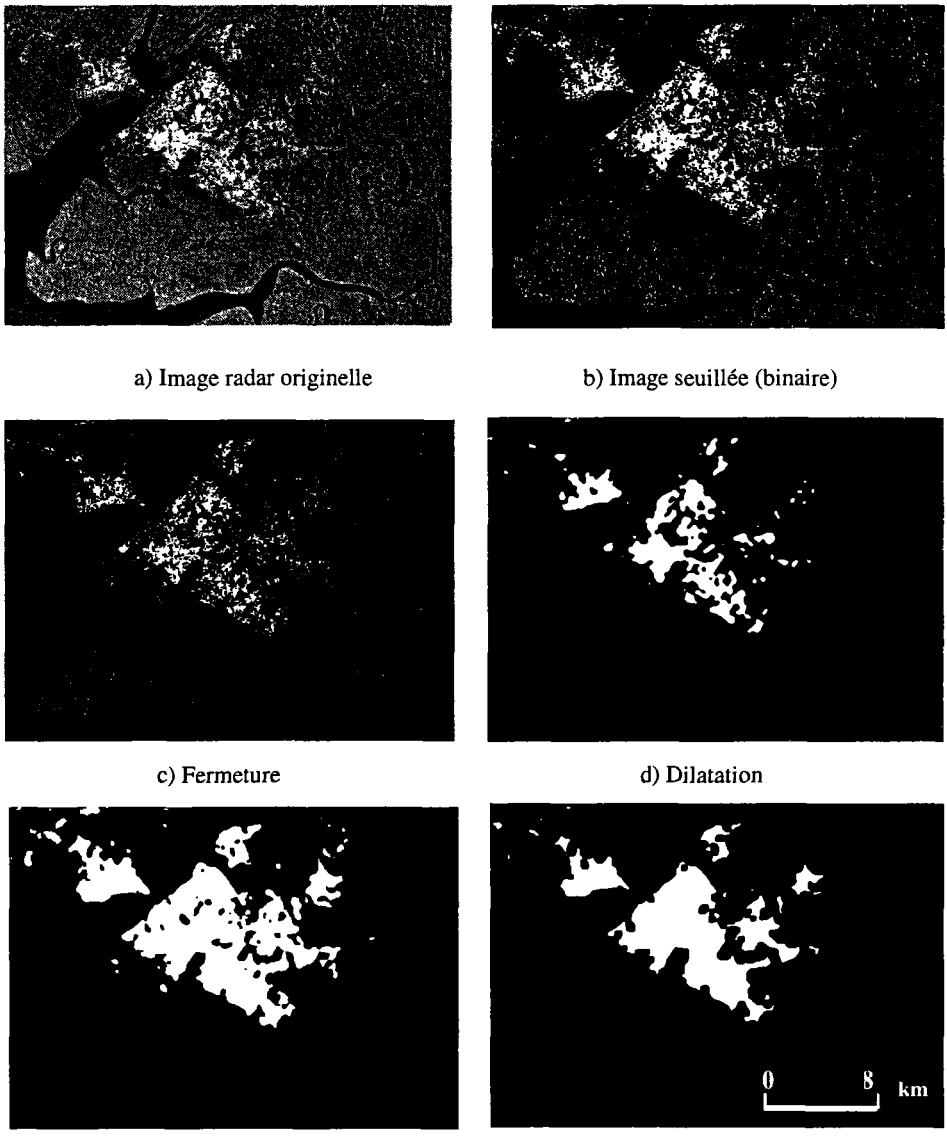
Les structures claires représentant le tissu urbain dense ont été comparativement plus faciles à isoler que les structures sombres. Ce sont en général des surfaces minéralisées plus ou moins compactes et dont la luminance est proche de la saturation (tableau 2 et figure 2).

Le seuillage de l'histogramme en vue d'isoler les structures sombres a été plus délicat en raison d'une confusion plus grande entre les espaces non bâtis, le bâti dense, la végétation et l'eau (tableau 2 et figure 3).

L'image des structures obtenue fait ressortir les grands axes d'urbanisation dans la région de Douala (figure 4). On observe en effet la structure tentaculaire de la ville dont les excroissances forment des chapelets le long des grands axes de communication que sont les routes et les voies ferrées. On peut même en faire une estimation de l'étendue des deux différents types de structures à Douala à l'aide de la fonction AREA de Idrisi.

Tableau 2. Zonage par seuillages des classes d'utilisation du sol effectué sur l'image RSO de Douala

Utilisation du sol	Classe de luminance
Eau	0-50
Tissu urbain lâche (structures sombres)	51-136
Hauts-fonds et autres, non spécifiés	102-137
Végétation	138-201
Tissu urbain dense (structures claires)	202-255



a) Image radar originelle

b) Image seuillée (binaire)

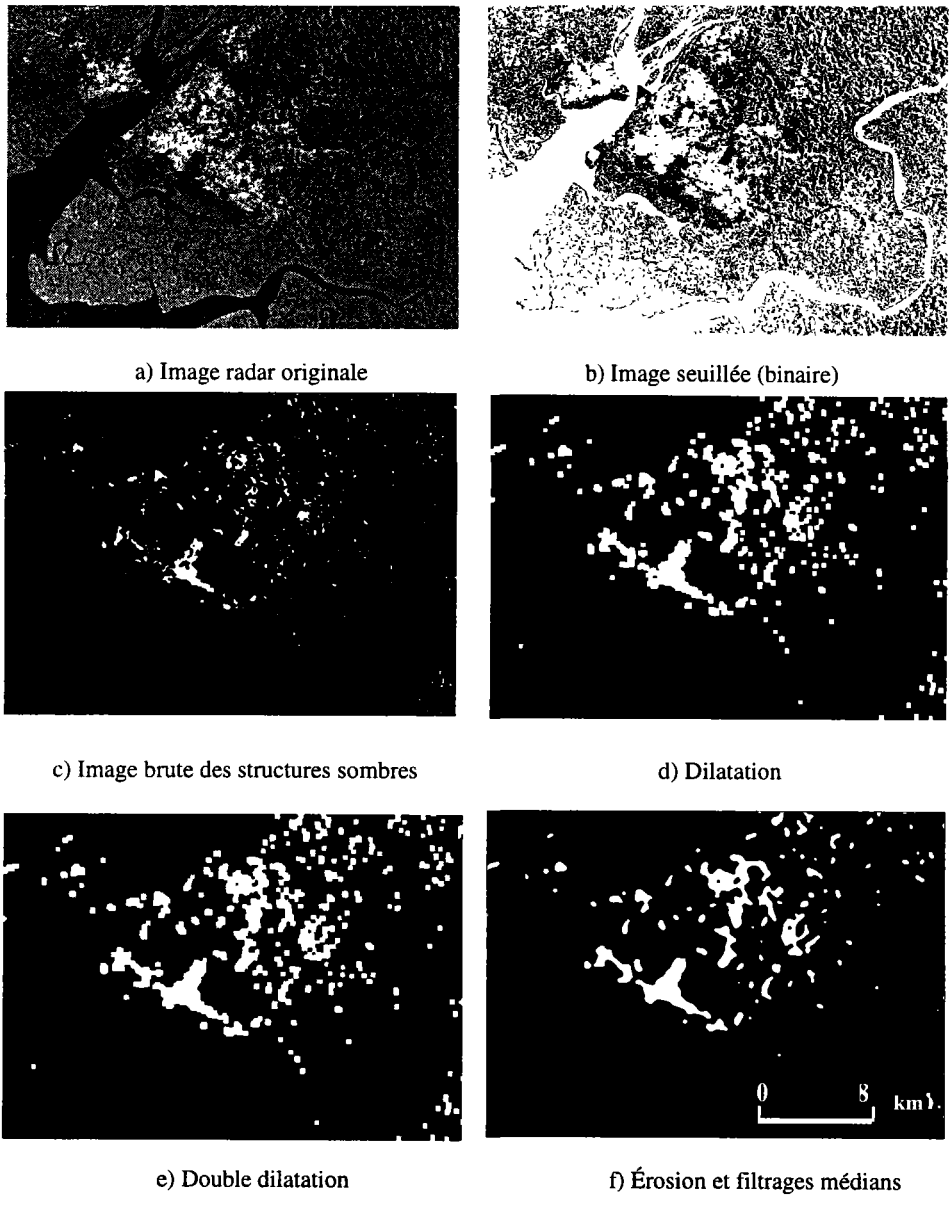
c) Fermeture

d) Dilatation

e) Double dilatation

f) Érosion et filtrages

Figure 2. Principaux résultats de l'extraction des structures claires de l'image RSO de Douala



a) Image radar originale

b) Image seuillée (binaire)

c) Image brute des structures sombres

d) Dilatation

e) Double dilatation

f) Érosion et filtrages médians

Figure 3. Principaux résultats de l'extraction des structures sombres de l'image RSO de Douala

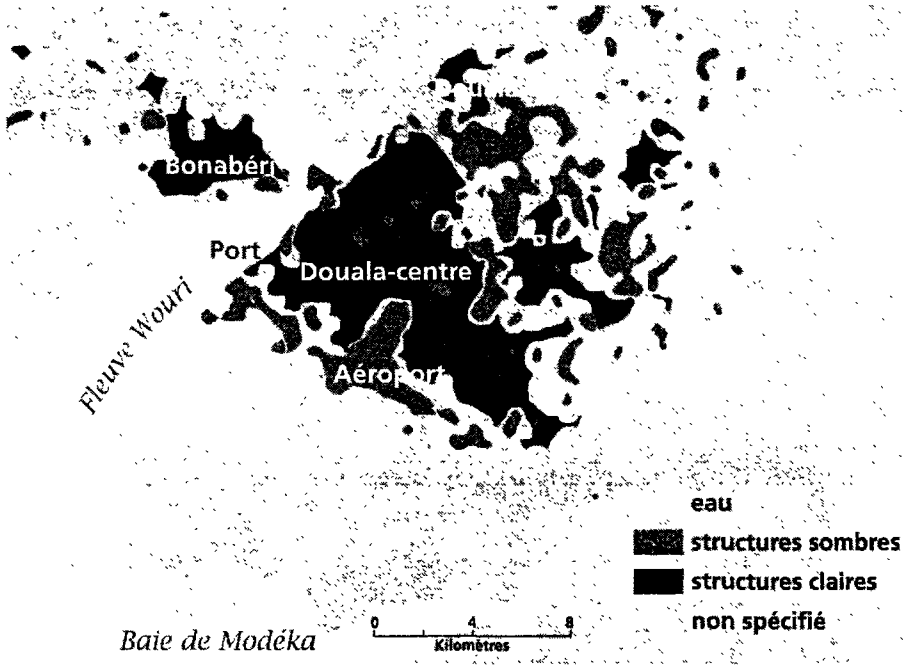


Figure 4. Image résultant de la somme des structures urbaines superposée au masque urbain géoreférencé de Douala

Le premier type de structures est composé du tissu urbain dense, pour l'essentiel des espaces bâtis. Il couvre sur l'image 5 421 ha environ de la superficie urbaine de Douala en 1994. Ce chiffre semble réaliste si on estime que, dans le schéma directeur (SDAU), on évaluait en 1982 les zones de fortes densités (plus de 100 hab./ha contre une moyenne de 77 hab./ha pour l'ensemble de la ville) à 3 106 ha, essentiellement concentrées dans les vieux quartiers centraux : New Bell (325 hab./ha), Bali (161 hab./ha), Bepanda (168,5 hab./ha), Deido (109 hab./ha) et une partie de la zone Nylon (154,8 hab./ha). Au milieu des années 1990, la densification de l'habitat touche désormais également de nouveaux secteurs jadis périphériques comme Bonabéri (rive gauche), Madagascar, Maképé, etc. Ce scénario est du reste conforme aux prévisions du SDAU et d'autres études (MAINET, 1985) d'après lesquelles plus de 60 % de la croissance démographique à venir (6 % par an) bénéficierait surtout à la couronne extérieure de l'agglomération, située au-delà de 5 km du centre-ville.

Le deuxième type de structures urbaines est formé de surfaces artificialisées au tissu urbain peu dense et couvre 3 106 ha au total. Il correspond en grande partie aux grands équipements (port, aéroport, gare ferroviaire, stade omnisports, camp militaire de Ndoghem) et à certains secteurs des quartiers modernes anciens (Akwa, Bonanjo, Bonapriso). Les lotissements périurbains, à l'instar de Bonambape sur la rive droite, apparaissent sous-représentés sur l'image, du fait que les habitations noyées dans la verdure atténuent la luminance habituelle du rayonnement radar sur les formes angulaires. En outre, certaines surfaces planes comme l'aéroport, les quais et les zones industrielles faiblement occupées ont un comportement spectral semblable à celui des plans d'eau et se retrouvent ainsi dans la même classe de luminance. Ceci peut être une source importante de confusion.

4. Validation des résultats

Plusieurs documents pouvant servir de réalité de terrain ont pu être exploités pour valider l'image des structures urbaines obtenue sur Douala en utilisant des techniques de photointerprétation. Il s'agit des cartes à diverses échelles issues du schéma directeur (SDAU) de 1983, du Plan d'adressage de la ville de Douala de 1992 au 1 : 10 000, de photographies aériennes de 1993 au 1 : 8 000 et du fichier vectoriel numérique de la voirie urbaine datant de 1996.

En particulier, la superposition du fichier-vecteur des routes à l'image des structures permet d'apprécier visuellement, par simple analogie, l'exactitude du résultat obtenu (figure 5). Dans l'ensemble, l'extraction de l'enveloppe urbaine semble globalement satisfaisante. Il en ressort que l'enveloppe urbaine couvrait, en 1994, 8 530 ha environ. En comparaison, le SDAU de 1983 fait état de 5 810 ha de superficie urbanisée dans un rayon de 8 km du centre-ville, ce qui représenterait une augmentation de 46,81 % en 12 ans ou encore 4 % par an. Ce chiffre est intéressant mais certainement en deçà de la vérité, puisque le taux de croissance réel de l'agglomération est de 6 % par an (MINUH, 1983).

Les plages correspondant au tissu urbain dense (5 412 ha) coïncident à peu près sur le terrain avec les zones d'habitat dense. Presque tous les secteurs à forte densité de bâti apparaissent bien, à l'exception de quelques quartiers spontanés récents de la périphérie. Les grands axes d'urbanisation récente ressortent assez nettement et concordent avec les tendances d'expansion spatiale de la ville prévues par le SDAU et diverses études. Douala s'accroît de manière tentaculaire suivant quatre axes préférentiels en fonction de la disponibilité des sites constructibles (lotissements de Douala-Est), des voies de sortie (axe est-ouest), voire de la proximité de grandes opérations d'urbanisme (projet Douala-Nord).

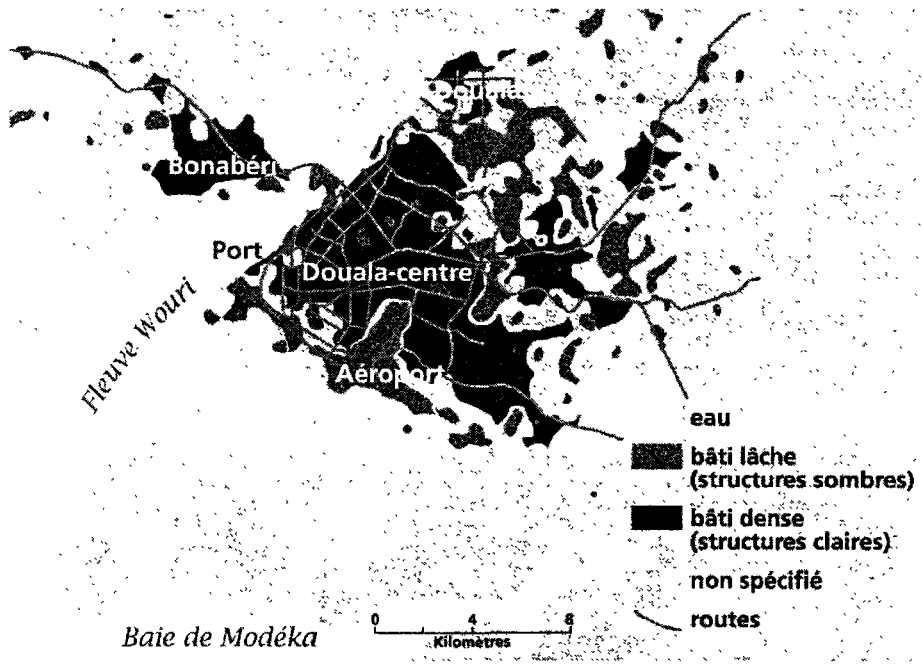


Figure 5. Image finale obtenue des structures urbaines superposée avec le réseau routier de Douala

Les plages représentant le tissu urbain lâche (3 106 ha) sont par contre peu étendues et surtout discontinues. En effet, d'importantes franges bâties, dont des quartiers résidentiels, n'ont pas été prises en compte. On y retrouve aussi bien des quartiers anciens de la ville moderne (Bonanjo, Bonapriso), des lotissements périphériques modernes récents (Bonamoussadi, Bonambape, Bonamikano), que des extensions spontanées périurbaines (Maképé-Yoyong, Nyala, KM 8, Ndoghem). Tous ces secteurs ont en commun une forte présence de végétation qui noie pratiquement les habitations et influe sur le signal radar. Par contre, les grands équipements et certaines réserves foncières, surfaces artificialisées nettement plus dégagées, ressortent relativement bien dans cette catégorie. Ils se retrouvent dans la même classe de luminance à l'issue du seuillage.

5. Discussion et conclusions

L'image initiale des structures urbaines a montré quelques erreurs de commission qu'il a fallu corriger. L'application du masque de l'eau a ensuite permis d'améliorer l'image finale et de réaliser une première validation du résultat obtenu.

La morphologie mathématique a jusqu'ici été appliquée essentiellement sur des images de type HRV ou TM dont la richesse spectrale et la haute résolution donnent généralement de bons résultats pour l'étude de l'occupation du sol en milieu urbain (ANYS *et al.*, 1994; WEBER *et al.*, 1997). L'imagerie radar est au contraire handicapée par sa pauvreté spectrale (images monobande), sa faible variabilité spatiale et la présence de bruit. Ainsi, diverses surfaces à structures très angulaires (bâtiments, hangars, dépôt de conteneurs) donnent une réponse spectrale fort semblable sur les images radar en raison de leur géométrie, d'où l'assimilation du parc à conteneurs du port de Douala à la catégorie structures claires par exemple.

D'autre part, l'applicabilité de la méthode texturale à divers types de milieux urbains est tributaire de la nature même des formes urbaines en présence. La morphologie urbaine des pays industrialisés par exemple, très marquée par une trame régulière, une succession de grands ensembles d'habitations, d'équipements ou d'industries, offre une réponse texturale relativement différente de celle des villes des pays en développement dominées par l'habitat horizontal noyé dans la végétation comme à Douala. Mais l'une des clés de l'utilisation de la méthode texturale pour l'analyse des structures urbaines repose sur un bon seuillage des images en vue d'isoler les zones homogènes.

Voici du reste les séquences de la morphologie mathématique (méthode texturale) telles que proposées par divers auteurs (ASSAKO ASSAKO, 1998 ; TERRETTAZ, 1998 ; THIAM, 1998) :

1. fermeture, obtenue par une dilatation suivie d'une érosion (structures sombres);
2. ouverture, obtenue par une érosion suivie d'une dilatation (structures claires);
3. chapeau haut-de-forme : soustraction de l'ouverture par l'image monospectrale originale en vue d'obtenir l'image des structures claires;
4. fond de vallée : soustraction de l'image originale de celle par la fermeture en vue de l'obtention de l'image des structures sombres;
5. construction de l'image des textures par addition des deux images des structures (opération booléenne);
6. diverses opérations éventuelles de filtrage pour améliorer la qualité de l'image finale.

Ce cheminement n'a été qu'en partie suivi dans le cas de l'image de Douala. En effet, les particularités de l'image radar ont imposé la modification de certaines séquences afin

d'obtenir un résultat satisfaisant (figure 1) :

- le seuillage préalable de l'image a permis de définir les plages homogènes à isoler;
- l'image en fond de vallée (soustraction de l'image originale de celle de la fermeture), peu concluante, a été remplacée par une dilatation suivie de l'application de plusieurs filtres médians ou modaux pour l'obtention de l'image améliorée des structures sombres; en effet, les filtres médian et modal produisent un résultat identique sur une image binaire; les structures sombres obtenues de l'image RSO de Douala correspondent au bâti de faible densité et aux grands équipements tels que le port, l'aéroport, les zones industrielles, le camp militaire de Bassa et l'Hôpital général;
- quant aux structures claires, il a fallu appliquer directement à l'image de fermeture des opérations de dilatation, puis d'érosion, et ensuite un filtre médian 7 x 7 pour avoir une image améliorée.

Toutefois, des améliorations sont possibles avec l'application de certains filtres (directionnels, ou de variance) dont les images résultantes pourraient servir de néo-canaux pour une éventuelle classification. Reste cependant à déplorer le faible développement des outils d'analyse de texture dans les logiciels actuels de traitement d'images : malgré leur nombre, la plupart ne disposent pas toujours de filtres appropriés, surtout pour la morphologie mathématique, un domaine encore insuffisamment exploré. Idrisi et PCI (*Easi Pace*) par exemple ne possèdent que peu ou pas d'outils de morphologie mathématique. ENVI™ dispose des fonctions de morphologie mathématique mais pas de filtre modal.

6. Remerciements

L'auteur exprime sa gratitude envers l'AUF, le Pr. Claude Collet et l'Institut de géographie de l'Université de Fribourg, partenaires du Programme des Bourses d'Excellence, Jean-Paul Rudant de l'Université de Paris-Marne-La-Vallée pour avoir aimablement prêté l'image RSO de Douala, ainsi qulà Géomatique Canada – CTI-Ottawa pour avoir financé partiellement sa participation aux journées scientifiques de Lausanne.

7. Références

ALBIOL A. and SERRA, J. 1997. Morphological image enlargements. Journal of Visual Communication and Image Representation, vol. 8, n° 4, p. 367-383.

ANYS, H., BANNARI, A., HE, D.-C. and MORIN, D. 1994. Texture analysis for the mapping of urban areas using airborne MEIS-II images, *in* Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, vol. 3, p. 231-245.

ASSAKO ASSAKO, R.-J. 1998. Yaoundé : essai de délimitation de l'enveloppe urbaine à partir d'une image HRV de SPOT. Université de Fribourg, Institut de géographie, Fribourg, Rapport de stage de l'ARP de l'AUPELF-UREF, 27 p.

BEUCHER, S. 1990. Segmentation d'images et morphologie mathématique. Thèse de doctorat, Paris, Centre de Morphologie mathématique, École des Mines de Paris.

BILODEAU, M. and BEUCHER, S. 1994. Road Segmentation Using a Fast Watershed Algorithm. *in* Proceedings *ISMM'94* : Mathematical Morphology and its Applications to Image Processing, Fontainebleau, September 1994, p. 29-30.

BONN, F. et ROCHON, G. 1992. Précis de Télédétection. Vol. 1 : principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.

BUSQUE, P., CAVAYAS, F., GRAY, J. et POIRIER, S. 1998. Acquisition des données de terrain de support aux analyses des images RSO de Radarsat. *In* J.-M. DUBOIS *et al.* (dir), Actes des Journées scientifiques de Sainte-Foy. La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. AUPELF-UREF, Montréal, p. 101- 118.

DONNAY, J.-P. et LAMBINON, M. 1997. Détermination des limites d'agglomération par télédétection : discussion méthodologique et application au cas de Huy. *in* J.-M. Dubois, J.-P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd.) Télédétection des milieux urbains et périurbains. AUPELF-UREF, Montréal, p. 239-246.

DUBOIS, J.-M., BERNIER, M., FORTIN, J.-P. et BOIVIN, F. (réd.) 1998. La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. AUPELF-UREF, Montréal, 356 p.

DUBOIS, J.-M., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.) 1995. Télédétection des milieux urbains et périurbains. AUPELF-UREF, Montréal, 361 p.

GUERRA, F., TORRES, W., PÉREZ, J., et MARTINEZ, M. 1997. Apport de deux images MSS et TM de Landsat au suivi cartographique des dynamiques spatiales récentes des milieux périurbains dans le bassin du lac de Valencia (Venezuela). *in* J.-M. Dubois, J.-P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd.) Télédétection des milieux urbains et périurbains. AUPELF-UREF, Montréal, p. 307-314.

HARALICK, R.M., SHANMUGAN, K. and DINSTEIN, I. 1973. Textural Features for Image Classification : IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 6, p. 610-621.

HENDERSON, F.M. and ZONG-GUO, X. 1998. Radar Applications in Urban Analysis, Settlement Detection and Population Estimation, *in* F.M. HENDERSON and A.-J. LEWIS, (ed.), Principles and Applications of Imaging Radar. John Wiley & Sons, New York, p. 733-763.

JEULIN, D. 1989. Morphological Modeling of Images by Sequential Random Functions. Signal Processing, n° 16, p. 403-431.

JEULIN, D. 1994. Random Structure Models for Composite Media and Fracture Statistics. *in* K. Markov (ed.) Advances in Mathematical Modelling of Composite Materials, World scientific company, vol. 15, p. 239-259.

MAINET, G. 1985. Douala, croissance et servitudes. L'Harmattan, Paris, coll. « Villes et Entreprises », 605 p.

MEYER, F. 1997. Morphological segmentation on a neighborhood graph. Acta stereologica, vol. 16, n° 3, 1997, p. 1-8.

MINUH (Ministère de l'Urbanisme et de l'Habitat du Cameroun) 1983. Schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme (SDAU) de Douala. MINUH, Yaoundé, Projet Urbain-FAC/ Cameroun, 8 volumes + annexes.

MOUAFO, D. 1999. Intégration d'images de Télédétection et de données multisources dans un SIG en vue de la cartographie urbaine et du suivi de l'urbanisation à Douala au Cameroun. Université de Fribourg, Institut de géographie, Fribourg, Rapport de stage des Bourses postdoctorales d'excellence de l'AUF, 47 p.

OGAO, P.-J. 1999. Visualization of Urban Growth Using Temporal Cartographic Animation: A proposed case study of Nairobi, Kenya. Communication à la Conférence de l'Association cartographique internationale (*ICA'99*), Ottawa, 14-21 Août 1999.

SERRA, J. and CHERMANT, J.-L. 1997. Mathematical morphology : A historical overview. Acta stereologica, vol. 16, n° 3, p. 1-9.

TERRETTAZ, P. 1998. Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitales SPOT HRV. Institut de géographie, Fribourg, thèse de doctorat, 372 p.

THIAM, S. 1998. Délimitation et segmentation urbaine à partir de la télédétection satellitaire : Application à la ville de Dakar (Sénégal). Laboratoires SURFACES, Liège, Université de Liège. Rapport de stage des bourses d'excellence AUPELF-UREF, 27 p.

TONYÉ, E. et AKONO, A. 1998. Application de la réalité-terrain et de l'imagerie radar à la cartogarphie des mangroves de la région de Douala (Cameroun). *in* J.-M. DUBOIS *et al.* (dir), La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Actes des Journées scientifiques de Sainte-Foy, AUPELF-UREF, Montréal, p. 241-247.

WEBER, C., DONNAY, J.-P. et COLLET, C. 1997. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. *in* J.-M. Dubois *et al.* (dir), Actes des Journées scientifiques de Liège : télédétection des milieux urbains et périurbains. AUPELF-UREF, Montréal, p. 133-144.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUPELF-UREF. 2000. p. 85-94

9

Fusion d'images de télédétection à l'aide de l'analyse multirésolutions par ondelettes

SOLOFOARISOA RAKOTONIAINA[1], CLAUDE COLLET[2] et JEAN BRUNO RATSIMBAZAFY[1]

[1] *Institut et observatoire géophysique d'Antananarivo (IOGA), Université d'Antananarivo, B.P. 3843 Antananarivo-101 Madagascar; téléphone/télécopieur : +261 (20) 22 25353; courriel : ioga@syfed.refer.mg*

[2] *Institut de géographie, Université de Fribourg (IGUF), Pérolles, CH-1700, Fribourg, Suisse; téléphone : +41 (26) 3009023; télécopieur : +41 (26) 3009746; courriel : claude.collet@unifr.ch*

Résumé

Dans le domaine du traitement d'images de télédétection, la fusion d'images est un thème de recherche d'actualité. Le but est de combiner une image à haute résolution spatiale avec des images multibandes afin d'obtenir des images à la fois plus riches en informations spectrales et de plus grande précision géométrique. Nous avons considéré le cas de fusion des images HRV de SPOT : l'image panchromatique de résolution spatiale de 10 m et les images XS qui sont disponibles avec trois bandes spectrales et ayant une résolution spatiale de 20 m. La méthode présentée est la transformée en ondelettes utilisée dans une analyse multirésolutions. Les images issues de cette méthode ont été comparées avec celles obtenues par les méthodes de fusion classiques : la méthode de l'IHS (*Intensity Hue Saturation*), la méthode de l'ACP (analyse en composantes principales) et la méthode HPF (*High Pass Filter*). Les comparaisons ont été effectuées aussi bien au niveau de l'information spectrale qu'au niveau de l'information spatiale contenues dans les images. Les comparaisons ont montré la supériorité de la méthode des ondelettes. Nous avons utilisé les filtres issus des ondelettes orthogonales à support compact de Daubechies de taille 4. Les résultats obtenus en utilisant les mêmes filtres, à l'aide de deux approches, celle de Garguet et celle de Ranchin, que nous avons expérimentées sont fort semblables. Nous avons aussi

expérimenté d'autre approche dont celle de Zhou, qui a donné de bons résultats. En conclusion de cette étude, on constate que le potentiel majeur de la fusion d'images s'inscrit avant tout dans la démarche d'interprétation d'image assistée par ordinateur (IIAO).

1. Introduction

Les méthodes de fusion sont souvent rangées en deux catégories. La première contient les méthodes qui prennent en compte simultanément l'ensemble des bandes dans le processus de fusion (méthodes IHS et ACP par exemple), alors que la deuxième regroupe celles qui traitent individuellement l'information haute résolution pour chacune des bandes spectrales (méthode HPF et méthode des ondelettes entre autres) (TERRETTAZ, 1998).

2. Outils et méthodologie

2.1. Outils classiques

La transformation RGB-IHS que nous avons utilisée est celle proposée par le logiciel Idrisi. La méthode HPF utilisée est celle décrite par ses auteurs (CHAVEZ *et al.*, 1991).

2.2. Transformée en ondelettes et l'analyse multirésolutions

Il existe une fonction unique $\phi(x) \in L^2(R)$, appelée fonction d'échelle, telle que l'approximation d'une fonction f(x) à la résolution 2^j s'écrit à l'aide de la relation suivante :

$$a_{j,k} = < f, \phi_{j,k} > = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\, \overline{\phi_{j,k}(x)}\, dx$$

où les coefficients $a_{j,k}$ désignent l'approximation de la fonction f(x) à la résolution 2^j ; $<,>$ désigne le produit scalaire dans $L^2(R)$ qui est l'espace des fonctions de carré intégrable; $\overline{\varphi_{j,k}(x)}$ est le complexe conjugué de $\varphi_{j,k}(x)$.

En termes d'image, la différence d'informations comprise entre les résolutions 2^{j+1} et 2^j, appelée détails, peut être extraite en décomposant l'image en fonction d'une base orthonormale d'ondelettes $\psi_{j,k}(x)$ de $L^2(R)$, soit :

$$C_{j,k}(f) = < f, \psi_{j,k} > = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\, \overline{\psi_{j,k}(x)}\, dx$$

où les coefficients $C_{j,k}$ désignent les coefficients d'ondelettes de la fonction f(x).

Autrement dit, les coefficients $C_{j,k}$ contiennent l'information perdue lorsque l'on passe de l'approximation de résolution 2^{j-1} à l'approximation de résolution inférieure 2^j (MALLAT, 1989) tandis que les coefficients $a_{j,k}$ représentent l'approximation de l'image à la résolution 2^j.

En pratique, le calcul des coefficients $C_{j,k}$ et $a_{j,k}$ se réalise par des opérations de filtrage (MALLAT, 1989). Ainsi, à la fonction d'échelle, on associe un filtre passe-bas h qui permet de conserver les éléments caractéristiques du signal tout en éliminant le bruit. Un filtre passe-haut g est associé à l'ondelette et permet aux coefficients d'ondelettes d'être

considérés comme des détails extraits d'une résolution à une autre (MALLAT, 1989). Les étapes de décomposition en ondelettes et de reconstruction sont illustrées respectivement sur les figures 1 et 2.

Dans le cas d'une image, pour un niveau de résolution J>0, la représentation en ondelettes orthogonales de l'image de départ est donnée par l'ensemble de 3J+1 images (MALLAT, 1989) :

$$\left(A_{2^{-J}}f,\left(D^h_{2^j}f\right)_{-J\le j\le -1},\left(D^v_{2^j}f\right)_{-J\le j\le -1},\left(D^d_{2^j}f\right)_{-J\le j\le -1}\right)$$

$A_{2^{-J}}f$ est l'approximation de l'image à la résolution 2^{-J} et les $D^i_{2^j}f$ images donnent les images de détails pour différentes orientations (horizontale, verticale, diagonale) et différentes résolutions (figure 3).

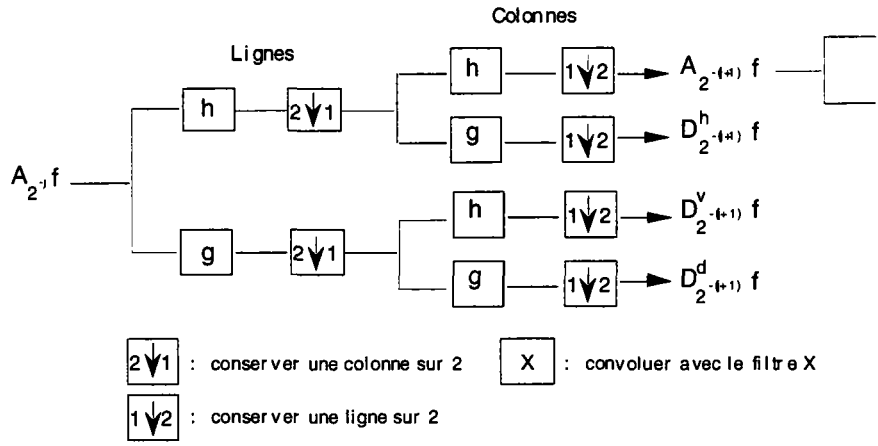


Figure 1. Décomposition en ondelettes d'une image par analyse multirésolutions (AMR) avec l'algorithme de Mallat

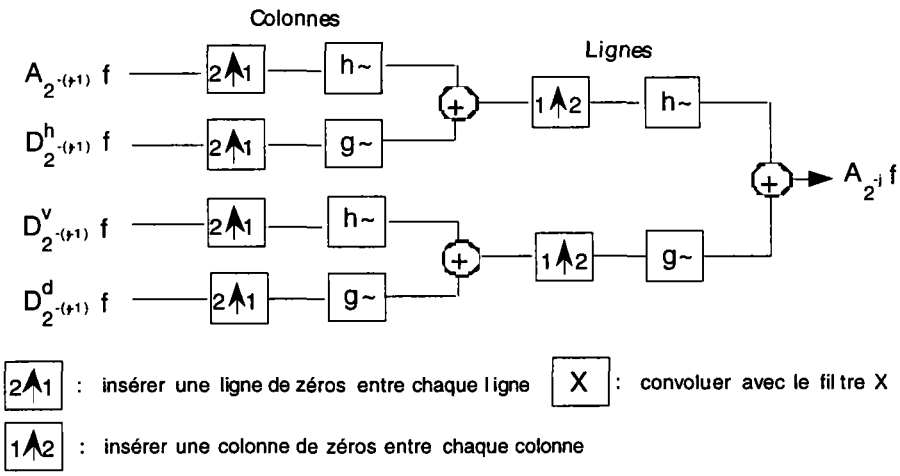


Figure 2. Reconstruction d'une image à partir des coefficients d'ondelettes avec l'algorithme de Mallat

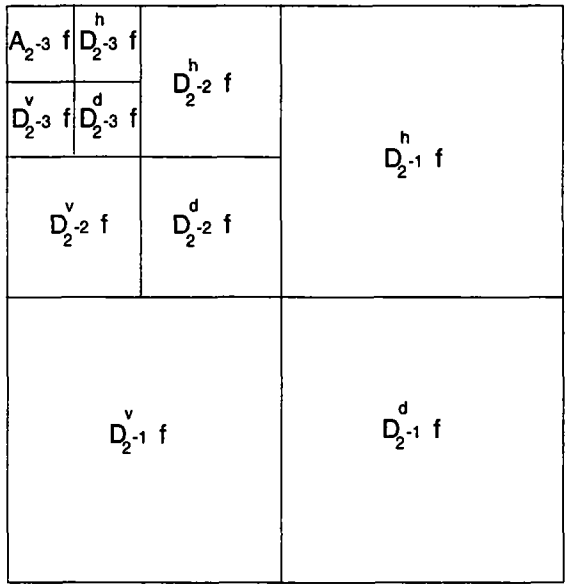


Figure 3. Disposition des images dans une décomposition en ondelettes par analyse multirésolutions, pour une décomposition jusqu'au 3e niveau

2.3. Fusion d'images à l'aide de l'analyse multirésolutions par ondelettes

Nous avons pu inventorier trois approches de fusion d'images par la méthode des ondelettes : ce sont les approches de RANCHIN (1993), de GARGUET-DUPORT (1994) et de YOCKY (1996), laquelle est reprise par ZHOU *et al.* (1998).

Le principe commun pour ces différentes approches consiste à utiliser l'information spatiale comprise entre les résolutions de 10 et 20 m de la bande panchromatique, contenue dans des coefficients d'ondelettes, pour simuler des images XS à 10 m de résolution spatiale. Cette simulation se fait grâce à l'utilisation de l'analyse multirésolutions par ondelettes. La décomposition en ondelettes peut être poussée vers des niveaux plus loin (2 et 3, dans le cas de ZHOU *et al.*, 1998). Nous avons opté pour les ondelettes orthogonales à support compact de Daubechies de régularité 2 (DAUBECHIES, 1992; PRESS *et al.*, 1992) pour effectuer la fusion en fonction des approches présentées ci-dessus. Les différentes étapes de la méthode, dans le cas de l'approche de ZHOU *et al.* (1998) sont décrites à la figure 4.

2.4. Évaluation des résultats

Les images synthétiques obtenues par la méthode des ondelettes ont été comparées avec celles obtenues par les méthodes classiques : IHS (*Intensity Hue Saturation*), ACP (analyse en composantes principales) et HPF (*High Pass Filter*). La meilleure méthode est définie comme celle qui minimise la détérioration des informations spectrales (luminance) contenues dans l'image multibandes d'origine et qui introduit au maximum les informations spatiales issues de l'image de haute résolution spatiale.

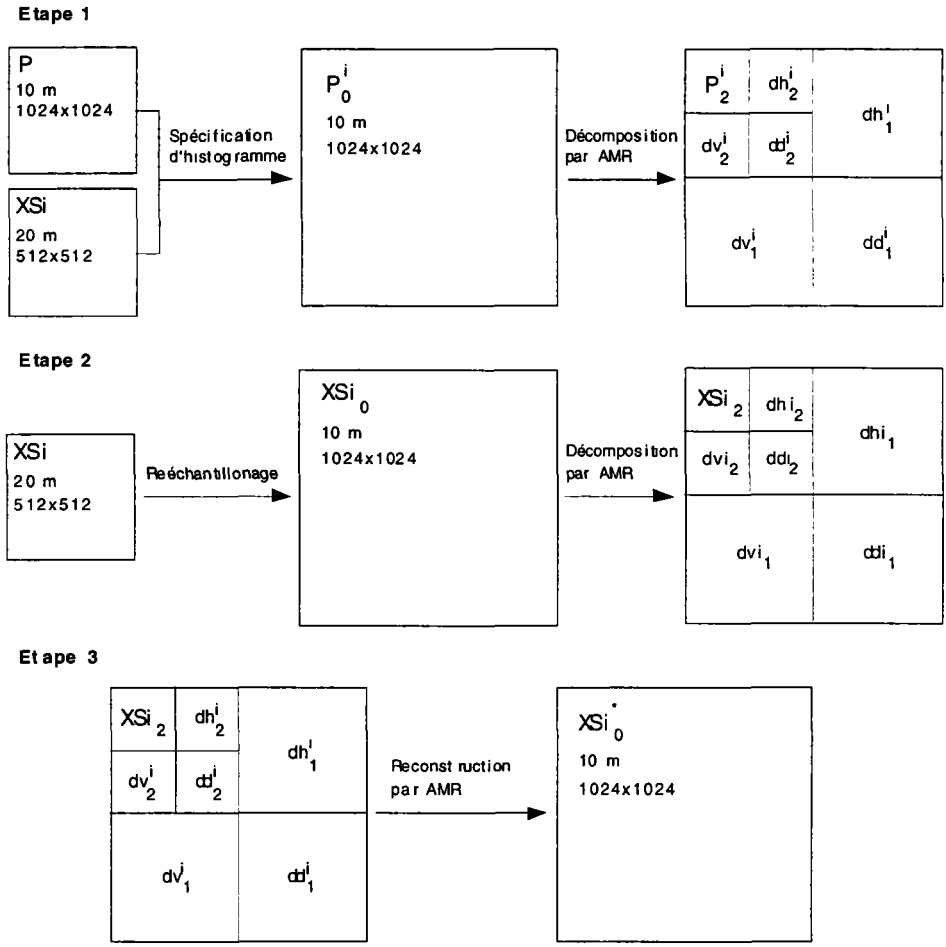


Figure 4. Fusion d'images par la méthode des ondelettes suivant l'approche de ZHOU *et al.* (1998)

Parmi les indicateurs considérés pour faire cette évaluation, on peut citer (MANGOLINI *et al.*, 1995; YOCKY, 1996; ZHOU *et al.*, 1998) :

1) la corrélation aussi bien entre les images synthétiques et l'image multibandes initiales qu'entre les images synthétiques et l'image de haute résolution spatiale; les premiers coefficients donnent une indication sur la conservation ou non des informations spectrales contenues dans les bandes originales de l'image multibandes; la valeur idéale est égale à 1 qui signifie qu'il y a conservation totale des radiométries des pixels; les seconds coefficients donnent un aperçu sur la similarité des petites structures; dans ce cas, plus la corrélation est élevée, plus les structures spatiales issues de l'image panchromatique sont incorporées dans les images synthétiques;

2) la visualisation de la composition colorée des images qui complète l'évaluation des aspects spatial et spectral des images;

3) la classification des images qui permet de quantifier l'aspect thématique ou l'apport informationnel de la méthode de fusion;

4) la matrice de confusion relative aux résultats de la classification.

3. Données utilisées

La région d'étude est la ville de Genève en Suisse (figure 5a). Les images satellitaires utilisées sont les images HRV (XS et P) de SPOT (identification K-J : 50-256) de Genève acquises le 21 juillet 1990 à 10 h 46 (T.U). La taille des images XS traitées est de 512 x 512 et celle de l'image panchromatique est de 1 024 x 1 024. L'image est localisée aux coordonnées géographiques 46°17' latitude nord et 06°22' longitude est. L'image HRV suivant le canal XS1 de l'image étudiée est donnée sur la figure 5b.

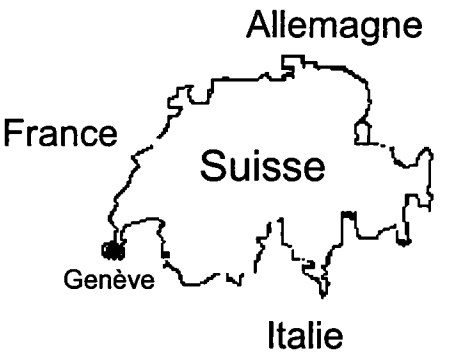


Figure 5a. Localisation de la région d'étude : Genève

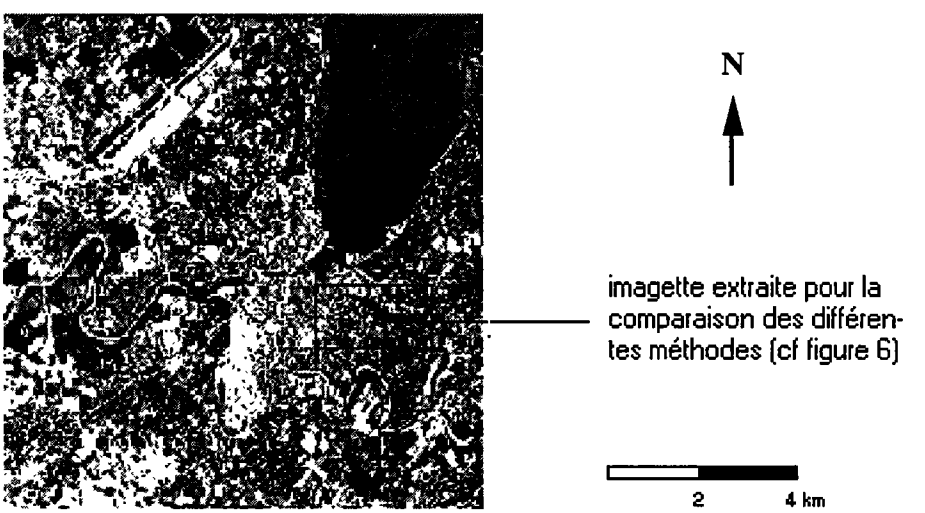


Figure 5b. Localisation de la région d'étude : image HRV (XS1) de SPOT de la ville de Genève

4. Résultats

Les résultats de la corrélation entre les images synthétiques issues de la fusion et l'image multispectrale d'origine, d'une part, et l'image panchromatique, d'autre part, sont présentés respectivement sur les tableaux 1 et 2 (RAKOTONIAINA, 1999).

À la figure 9-6 (voir cahier couleur), nous présentons les compositions colorées d'imagettes de fusion, extraites du site d'étude (figure 5b), et qui sont issues des différentes méthodes (RAKOTONIAINA *et al.*, 1997; RAKOTONIAINA, 1999).

Pour exécuter la classification d'images, nous avons utilisé la méthode du maximum de vraisemblance à l'aide du logiciel Idrisi en considérant neuf classes d'entraînement. Nous avons effectué la classification aussi bien sur les bandes originales que sur les images de fusion obtenues à partir des méthodes de l'IHS et de ZHOU.

La qualité globale des résultats de la classification, calculée à partir des matrices de confusion, est résumée sur le tableau 3.

Tableau 1. Corrélation entre les images de fusion et les images multibandes d'origine de HRV de SPOT

Méthodes	Canal 1	Canal 2	Canal 3
IHS	0,821	0,936	0,855
ACP	0,953	0,930	0,485
HPF	0,947	0,959	0,976
GAR(=ZH2)	0,992	0,995	0,994
RAN	0,992	0,995	0,994
ZH4	0,983	0,985	0,951
ZH8	0,978	0,980	0,867

Tableau 2. Corrélation entre les images de fusion et l'image panchromatique HRV de SPOT

Méthodes	Canal 1	Canal 2	Canal 3
IHS	0,774	0,918	0,510
ACP	0,880	0,896	0,726
HPF	0,934	0,963	0,332
GAR(=ZH2)	0,937	0,947	0,235
ZH4	0,953	0,967	0,297
ZH8	0,957	0,973	0,390

Tableau 3. Qualité globale des résultats de classification appliquée aux trois types d'images (image multibandes originale, images de fusion obtenues par la méthode de l'IHS et la méthode des ondelettes suivant l'approche de ZHOU)

Bandes originales	IHS	ZH4
80,5 %	78,8 %	76,9 %

5. Interprétation et discussion

5.1. Classement des méthodes au niveau de la qualité spectrale

En se référant au tableau 1, les trois méthodes de fusion par ondelettes obtiennent systématiquement les coefficients de corrélation les plus élevés. Elles conservent donc mieux les valeurs radiométriques originales que les autres méthodes de fusion (figure 9-6) (voir cahier couleur). Toutefois, on remarque que, plus le niveau de décomposition en ondelettes effectué augmente (de ZH2 vers ZH8), plus les informations spectrales originales se dégradent. Les autres méthodes modifient plus ou moins fortement les informations spectrales des bandes initiales. Cette modification est plus accentuée pour la méthode de l'ACP que pour celle de l'IHS (RAKOTONIAINA, 1999).

5.2. Classement des méthodes au niveau de la qualité spatiale

Pour les deux premiers canaux, ceux du domaine panchromatique (tableau 2), la méthode des ondelettes induit les coefficients les plus élevés. On remarque aussi que, si l'on procède à des niveaux de décomposition plus poussés dans le processus de fusion par ondelettes (ZH4, ZH8), les variations spatiales issues de l'image P sont injectées de manière plus importante dans les images synthétiques (RAKOTONIAINA, 1999).

5.3. Interprétation des résultats de la classification

La comparaison visuelle des images classées montre, dans les images fusionnées, une plus grande hétérogénéité dans la distribution spatiale des classes (mitage). De plus, le tableau 3 nous révèle une détérioration des résultats dans le cas des images fusionnées. On observe aussi que les images synthétiques produites par la méthode des ondelettes fournissent un résultat plus médiocre que celui obtenu par les images de fusion issues de la méthode de l'IHS.

Ainsi, dans le cas qui nous concerne, soit la fusion d'image multibandes avec une image monobande de haute résolution spatiale et la classification effectuée à l'aide d'une procédure paramétrique telle que la méthode de maximum de vraisemblance, la fusion semble conduire à une dégradation de la qualité de la classification. L'apport de la fusion est considéré, dans ce cas, de nature géométrique, donc contextuel. Elle ne fait même qu'augmenter la variabilité intra-classe avec l'insertion des informations provenant de l'image haute résolution spatiale, ce qui tend à réduire la discrimination inter-classe. À notre avis, ce n'est pas nécessairement la méthode de fusion qui est mise en cause mais plutôt la nature des informations fusionnées ainsi que l'algorithme de classification considéré, qui est dans notre cas basé sur un contenu strictement spectral (RAKOTONIAINA, 1999).

6. Conclusion

Nous avons étudié la fusion d'images en télédétection à l'aide de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolutions. Nous avons montré, notamment par des

illustrations, que la méthode des ondelettes donne un meilleur compromis entre le respect des valeurs originales et l'importance de l'injection de l'information à haute résolution spatiale. Dans le cas traité de fusion d'images HRV (XS et P) de SPOT, nous constatons que l'apport majeur de cette méthode se situe dans le cadre d'une démarche d'interprétation visuelle d'image assistée par ordinateur (COLLET, 1999), car il est avant tout de nature spatiale, donc contextuel. En effet, les expérimentations réalisées montrent que la fusion n'apporte rien de significatif en termes d'informations à des procédures de classification basées uniquement sur le comportement spectral : on ne fait qu'augmenter la variabilité intra-classe par l'insertion de l'image à haute résolution panchromatique. Nos recherches actuelles s'orientent sur une évaluation plus complète de l'intérêt des images fusionnées en classification, particulièrement par la production de variables texturales dérivées et l'utilisation de méthodes de réseaux de neurones.

7. Remerciements

Le support financier pour la réalisation de ce travail de recherche provient d'une part de l'Agence universitaire de la francophonie (AUF) qui a permis à Solofoarisoa RAKOTONIAINA d'effectuer un stage doctoral en télédétection de quatre mois en 1997 au sein de l'Institut de géographie de l'Université de Fribourg en Suisse, et, d'autre part, du Ministère de l'enseignement supérieur malgache dans le cadre d'un contrat-programme de recherche établi entre le ministère et l'IOGA.

8. Références

CHAVEZ, P.S., SIDES, S., ANDERSON, J. 1991. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data : Landsat TM and SPOT Panchromatic. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 57, n° 3, p. 295-303.

COLLET, C. 1999. Vers un système d'assistance à l'interprétation d'images numériques de télédétection (IIAO). Colloque International Télédétection et Géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux, 67e Congrès de l'ACFAS, Ottawa, 10-12 mai 1999.

DAUBECHIES, I. 1992. Ten Lectures on Wavelets. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. SIAM Press, Philadelphia, Pennsylvania.

GARGUET-DUPORT, B. 1994. Fusion d'images et télédétection en écologie du paysage. Application à l'étude structurale d'un corridor fluvial alpin. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 110 p.

MALLAT, S.G. 1989. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition : The Wavelet Representation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 11, n° 7, p. 674-693.

MANGOLINI, M., RANCHIN, T. et WALD, L. 1995. Évaluation de la qualité des images multispectrales à haute résolution spatiale dérivées de Spot. Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection n° 137, p. 24-29.

PRESS, W., FLANNERY, B., TEUKOLSKY, S. and VETTERLING W. 1992. Numerical Recipes in C : the art of scientific computing. Cambridge University Press, Cambridge, 702 p.

RAKOTONIAINA, S. et COLLET, C. 1997. Élaboration d'un outil mathématique : la transformée en ondelettes pour l'exploitation des données de télédétection. Applications dans les Sciences de la terre. Rapport de stage doctoral en télédétection AUPELF-UREF, Université de Fribourg, 53 p.

RAKOTONIAINA, S. 1999. Analyse multirésolution par ondelettes en traitement du signal. Exemples d'application en télédétection et en géophysique. Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, 132 p.

RANCHIN, T. 1993. Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection. thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 146 p.

TERRETTAZ, P. 1998. Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitales SPOT HRV. Thèse de doctorat, Université de Fribourg , 304 p.

YOCKY, D.A. 1996. Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and Spot Panchromatic data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 62, n° 9, p. 1067-1074.

ZHOU, J., CIVCO, D.L. and SILANDER, J.A. 1998. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT Panchromatic data. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 4, p. 743-757.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 95-103

10

Extraction du réseau routier sur une image RSO de ERS-2 et sur une image HRV (XS) de SPOT par analyse de texture et morphologie mathématique : application à la ville de Yaoundé (Cameroun)

EMMANUEL TONYÉ[1], ALAIN AKONO[1], ANDRÉ NDI NYOUNGUI[2] et RENÉ-JOLY ASSAKO ASSAKO[3]

[1] *Laboratoire d'électronique et de traitement du signal (LETS), École nationale supérieure polytechnique, B.P. 8390, Yaoundé, Cameroun; téléphone : (237) 228620; télécopieur : (237) 231841; courriel : tonyee@hotmail.com*

[2] *Institut universitaire de Ngaoundéré, Université de Ngaoundéré, B.P. 455, Ngaoundéré, Cameroun; téléphone : (237) 252751; télécopieur : (237) 252751;*

[3] *Département de géographie, Université de Douala, B.P. 8562, Douala-Deido, Cameroun; téléphone : (237) 473917; télécopieur : (237) 473250; courriel : assako@hotmail.com*

Résumé

Grâce à leur caractéristique tout-temps, les images radar sont d'une utilité de plus en plus grande dans les zones équatoriales où plane une couverture nuageuse quasi permanente. En cette période où les grandes métropoles africaines connaissent une extension rapide, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes de cartographie automatique d'images radar, permettant ainsi aux communautés urbaines de réaliser, dans des délais convenables, des études relatives à l'évolution des villes faisant partie de leur ressort territorial. Nous proposons dans cette étude une méthode d'extraction du périmètre urbain sur une image radar RSO de ERS-2 de la ville de Yaoundé au Cameroun, en mettant l'accent sur le réseau

routier. Une application est parallèlement effectuée sur une image HRV (XS) de SPOT pour fins de comparaison. La méthode proposée consiste en une combinaison de la morphologie mathématique et de l'analyse de texture pour extraire le réseau routier ciblé sur l'image radar. La squelettisation est utilisée pour réduire l'épaisseur des contours représentant le réseau routier à la dimension d'un pixel, ce qui permet ensuite d'évaluer la longueur de ce réseau. La longueur minimale du réseau routier dans le sens sud-nord a été évaluée à 10 km et la longueur maximale à 15 km. Dans le sens est-ouest, la longueur minimale du réseau a été évaluée à 7 km et la longueur maximale à 10 km. Les méthodes utilisées font apparaître la distinction entre l'urbain et le non urbain, de manière à permettre le tracé du périmètre de l'agglomération.

1. Introduction

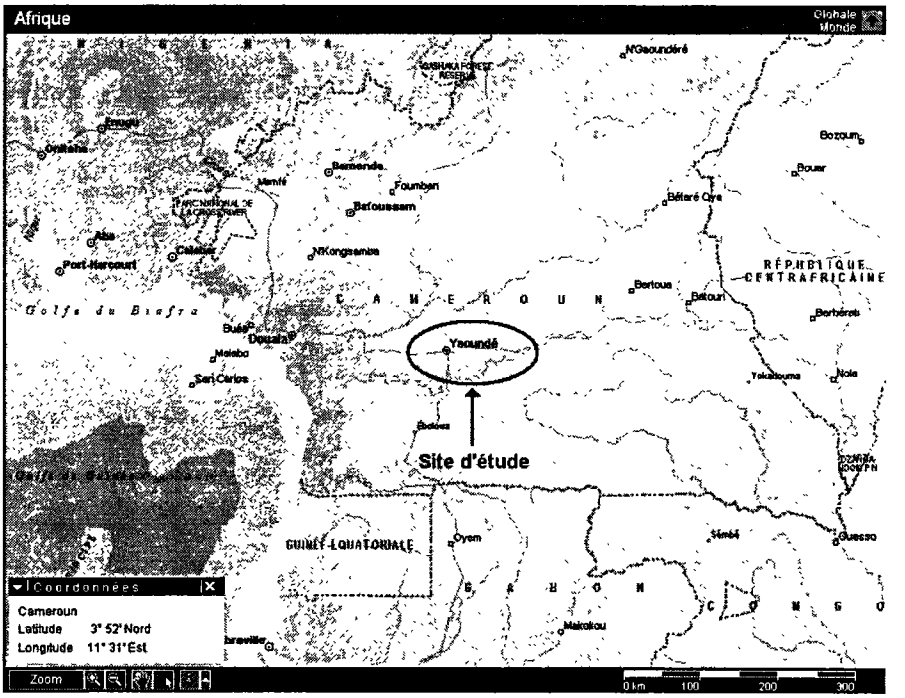
Le périmètre urbain est une donnée essentielle en analyse urbaine pour la détermination de la croissance périphérique des grandes cités. Il constitue un préalable incontournable dans le processus d'aménagement et de gestion urbains (ASSAKO ASSAKO et TONYÉ, 2000). Au-delà de ces considérations, il pose, sur le plan méthodologique, le problème plus général de la définition même de l'urbain par opposition au non urbain, et donc de la détermination de la limite entre ces deux types d'espaces intrinsèquement différents mais interpénétrants. Pour réaliser cette discrimination et extraire le réseau routier de la ville de Yaoundé, nous avons utilisé, comme source d'information, une image radar à synthèse d'ouverture (RSO) du satellite ERS-2 et le canal XS3 d'une image à haute résolution visible (HRV) du satellite SPOT. Le but de ce travail consiste à prouver la possibilité d'extraction d'une telle information sur une image RSO, dans une région à fort couvert nuageux où il est souvent impossible d'acquérir des images optiques de bonne qualité dans la majeure partie de l'année. Les histogrammes des images de texture formées sont utilisés pour faire apparaître les éléments recherchés. La squelettisation est utilisée pour réduire l'épaisseur des contours représentant le réseau routier à la dimension d'un pixel, ce qui permet ensuite d'évaluer la longueur de ce réseau.

2. Matériel et méthode

2.1. Données utilisées et site d'étude

L'image RSO du satellite ERS-2 (*European Remote Sensing Satellite*) utilisée sur la ville de Yaoundé (figure 1) est une image acquise en 1999, en bande C avec une polarisation VV. La résolution spatiale initiale de cette image est de 12,5 m x 12,5 m, mais elle a subi un moyennage, simultanément à la correction géométrique, de 8 x 8 pixels en un pixel, ce qui a amené la taille d'un pixel à 100 m. L'image HRV du satellite SPOT fut acquise en 1987. Elle a une résolution spatiale de 20 m.

Les divers traitements d'images ont été effectués avec le logiciel VOIR (Vision par ordinateur des images radar) développé au Laboratoire d'électronique et de traitement du signal de l'École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé.



(source : LEMARCHAND, 1994)

Figure 1. Localisation géographique du site d'étude

2.2. Méthodologie

2.2.1. Analyse de texture par la méthode des longueurs de plages

L'analyse de texture est une méthode qui tient compte de la distribution spatiale des niveaux de gris autour d'un pixel considéré de l'image. Plusieurs méthodes d'analyse de texture ont été développées au fil des années, la plus classique étant celle de la matrice de cooccurrence (HARALICK *et al.*, 1973). La méthode utilisée dans cette étude est la méthode des longueurs de plage. Dans cette méthode, on considère un voisinage monodimensionnel de type auto-adaptatif : un point appartient au voisinage du point courant si son niveau de gris est peu différent. La taille du voisinage est donc très variable et elle constitue un paramètre caractéristique majeur dans cette approche. La méthode des longueurs de plage de niveau de gris consiste à compter le nombre de plages de niveau de gris d'une certaine longueur, dans une certaine direction θ (DASARATHY and HOLDER, 1991). Une matrice $R(\theta)$ de longueurs de plage est associée à une direction d'angle θ (équation 1) :

$$R(\theta) = [r(i, j/\theta)] \quad (1)$$

où r(i,j) est le nombre de plages de pixels de niveau de gris i, de longueur j et θ la direction de la plage de niveau de gris.

Onze paramètres caractérisant la texture ont été extraits de ces matrices (DASARATHY and HOLDER, 1991). Après plusieurs essais expérimentaux, l'un des paramètres, faisant

apparaître les éléments recherchés sur l'image, a été retenu. Il s'agit du paramètre appelé poids des longues plages de faible niveau de gris (équation 2) :

$$LRLGE = \frac{1}{nr}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\frac{j^2 r(i,j)}{i^2} \qquad (2)$$

La constante $nr = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} r(i,j)$ est le nombre total de plages dans une fenêtre centrée autour d'un pixel courant où M est le nombre de niveaux de gris dans l'image et N est le nombre de longueurs de plages rencontrées dans la fenêtre. Pour obtenir l'image de texture, on remplace le niveau de gris du pixel courant par la valeur du paramètre de texture évaluée dans une fenêtre centrée autour de ce pixel.

2.2.2. Squelettisation

La squelettisation (SERRA, 1982) permet de réduire la dimension des contours d'une image, de manière à obtenir des contours d'épaisseur égale à 1 pixel. Cette opération a été utile pour la détermination de la longueur du réseau routier. La squelettisation s'effectue par une succession d'opérations appelées amincissement, jusqu'à l'obtention d'une structure stable ne pouvant plus être amincie.

2.3. Procédure

L'image originale est préalablement filtrée par un filtre de chatoiement. Le filtre de Lee (LEE, 1980) a été choisi ici pour ses bonnes performances dans nos travaux antérieurs. Le paramètre de texture du poids des longues plages de faible niveau de gris est ensuite appliqué sur l'image filtrée, ce qui produit une image de texture.

Le succès de toute procédure de classification texturale dépend largement de la taille de la fenêtre choisie pour le calcul des paramètres de texture. Si la taille de la fenêtre est très petite, une information spatiale ne peut pas en être extraite pour caractériser correctement une classe donnée. Si la fenêtre est trop grande, elle peut chevaucher entre différentes classes de couverture du sol, produisant par la suite une information spatiale erronée. Pour faciliter le choix d'une fenêtre optimale, une stratégie consiste à calculer le coefficient de variation moyen pour chaque classe en faisant varier la taille de la fenêtre. La taille de fenêtre retenue est celle pour laquelle le coefficient de variation commence à se stabiliser tout en restant faible. En suivant la stratégie précédente, nous avons trouvé que les fenêtres 3 x 3 sont raisonnables. Ceci signifie que des fenêtres plus grandes n'apportent pas d'amélioration en terme d'information texturale.

L'image de texture obtenue ne permet généralement pas de faire une partition de l'image en des classes distinctes, son histogramme ne présentant pas des modes (maximum) et des vallées (minimum) précis. Pour pallier cet inconvénient, une méthode originale de modification de l'histogramme est mise en oeuvre. Cette méthode consiste en une transformation de l'échelle des niveaux de gris par des opérateurs algébriques entre deux ou plusieurs images, ou entre une image et une constante selon l'une des expressions ci-dessous (équation 3) :

$$\begin{cases} I_T' = I_T * C \\ I_T' = a * I_T^2 + b * I_T + D \\ I_T' = a * I_T^3 * b * I_T^2 + c * I_T + E \\ I_T' = I_T + I_O \end{cases} \quad (3)$$

où, I_O représente l'image originale, I_T représente l'image de texture initiale et I_T' représente l'image de texture modifiée; C, D, E, a, b, c, sont des constantes de multiplication et d'addition qu'on obtient après plusieurs essais expérimentaux.

Dès que l'image de texture modifiée est obtenue, on procède au calcul de son histogramme, ce qui permet de choisir un seuil approprié pour la binarisation de cette image. Le seuil de binarisation est déterminé à partir des modes de l'histogramme. Il correspond au niveau minimum (vallée) de l'histogramme situé entre les modes (pics) consécutifs. Une détection de contours par la technique du gradient est ensuite appliquée à l'image binarisée et l'on obtient une image de contours à laquelle on applique la squelettisation. Une fois que l'image squelettisée est obtenue, on procède au calcul de la longueur du réseau routier. La longueur minimale et la longueur maximale du réseau sont évaluées en fonction de la taille du pixel de l'image. Une telle technique a déjà été utilisée avec succès dans le cadre d'une étude de cartographie des lignes de rivage (TONYÉ *et al.*, 2000). L'image HRV de SPOT a été binarisée, et elle a ensuite subi une opération de détection des contours par la technique du gradient.

3. Résultats

L'image originale RSO est présentée sur la figure 2a et l'image originale filtrée par le filtre de Lee sur la figure 2b. Sur la figure 2c, on présente l'image de texture obtenue avec le paramètre poids des longues plages de faible niveau de gris. L'image de texture modifiée est présentée sur la figure 2d. Cette image de texture modifiée est obtenue par sommation de l'image de texture et de l'image originale filtrée. Sur la figure 2e, on présente l'image binarisée obtenue à partir de l'image de texture modifiée et sur la figure 2f, on montre l'image binarisée et squelettisée. Sur la figure 3a, on présente l'image HRV (XS3) de SPOT et, sur la figure 3b, l'image des contours issue de l'image HRV (XS3) binarisée. Cette figure présente quelques axes routiers.

La longueur minimale du réseau routier dans le sens sud-nord a été évaluée à 10 km et la longueur maximale à 15 km. Dans le sens est-ouest, la longueur minimale du réseau a été évaluée à 7 km et la longueur maximale à 10 km. La ville de Yaoundé a une superficie approximative de 15 km x 10 km, ce que reflète la carte de la figure 4 (15,5 km x 11 km).

4. Discussion et conclusion

Les méthodes utilisées font bien ressortir la distinction entre l'urbain et le non urbain, de manière à permettre le tracé du périmètre de l'agglomération (GOUINAUD, 1996). Une comparaison visuelle des résultats obtenus avec une carte routière de la région d'étude (figure 4) montre que les résultats obtenus avec l'image HRV de SPOT sont plus proches de la réalité, comparativement aux résultats obtenus avec l'image RSO. Ceci est notamment

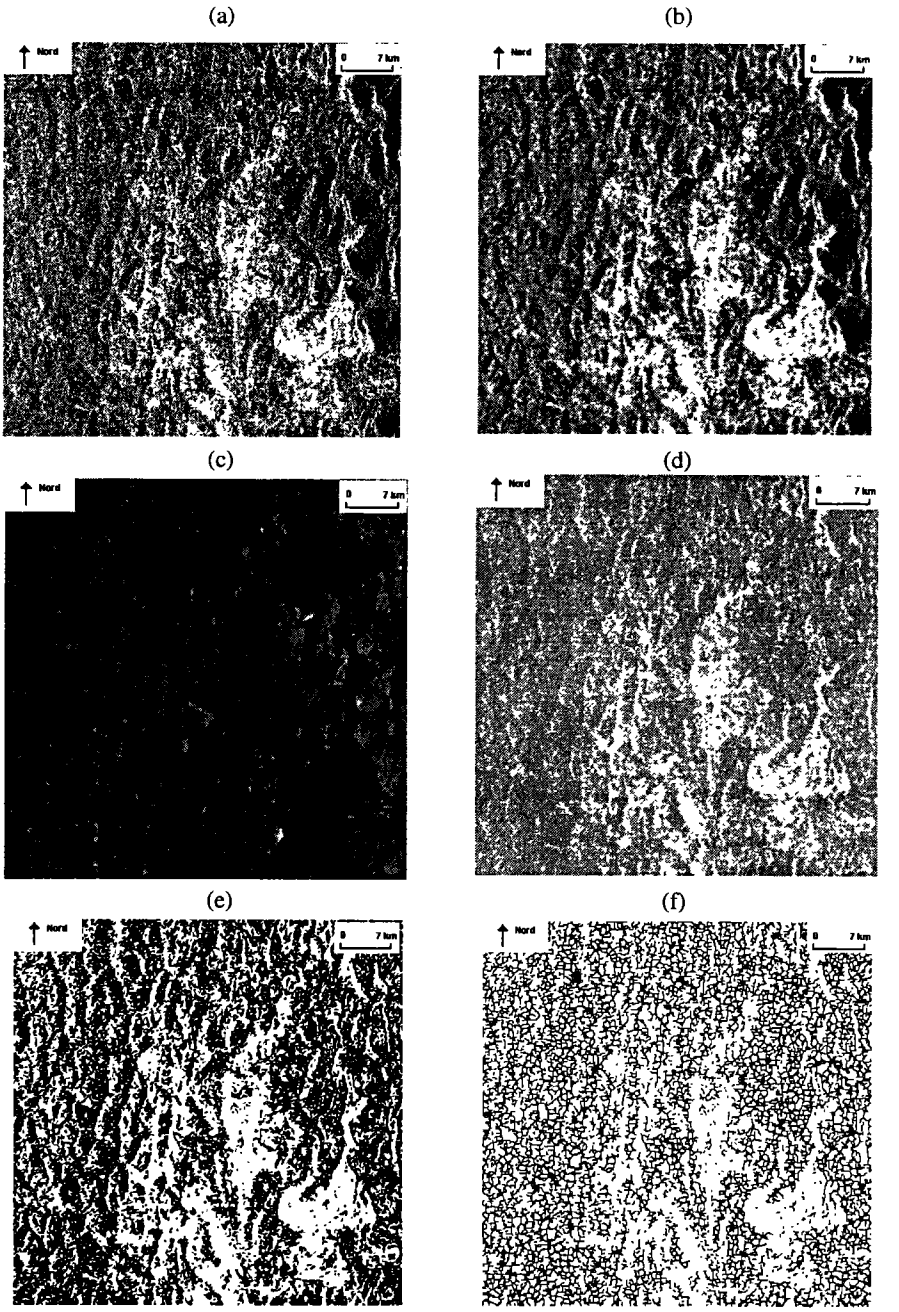
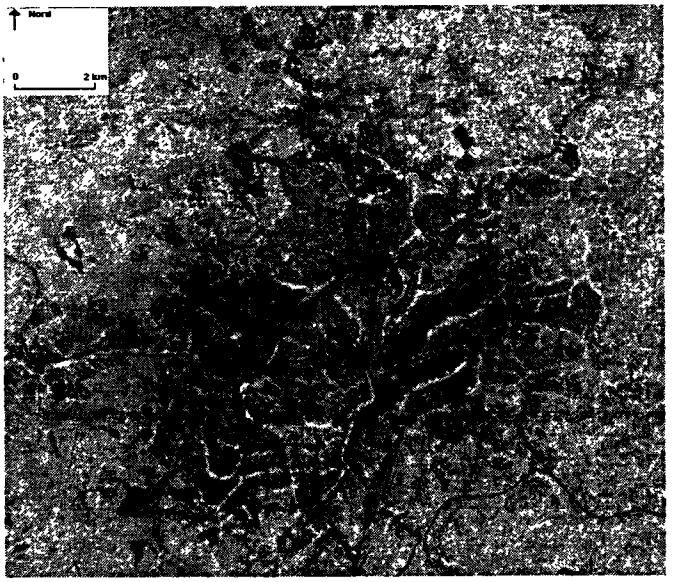


Figure 2. Image RSO de ERS-2 de la ville de Yaoundé : (a) image originale 512 x 512 pixels; (b) image originale filtrée par un filtre de Lee; (c) image de texture (poids des longues plages de faible niveau de gris); (d) somme de l'image originale filtrée (b) et de l'image de texture (c); (e) résultat de la binarisation de l'image (d); (f) image squelettisée issue de l'image binarisée (e)

(a)



(b)

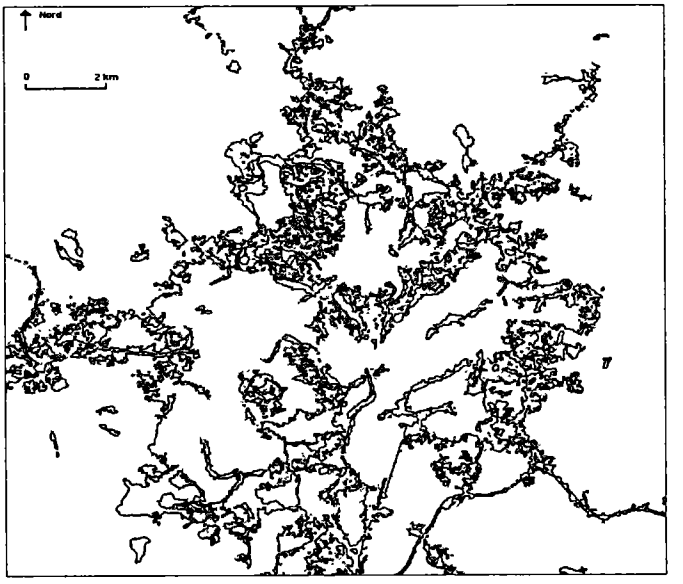
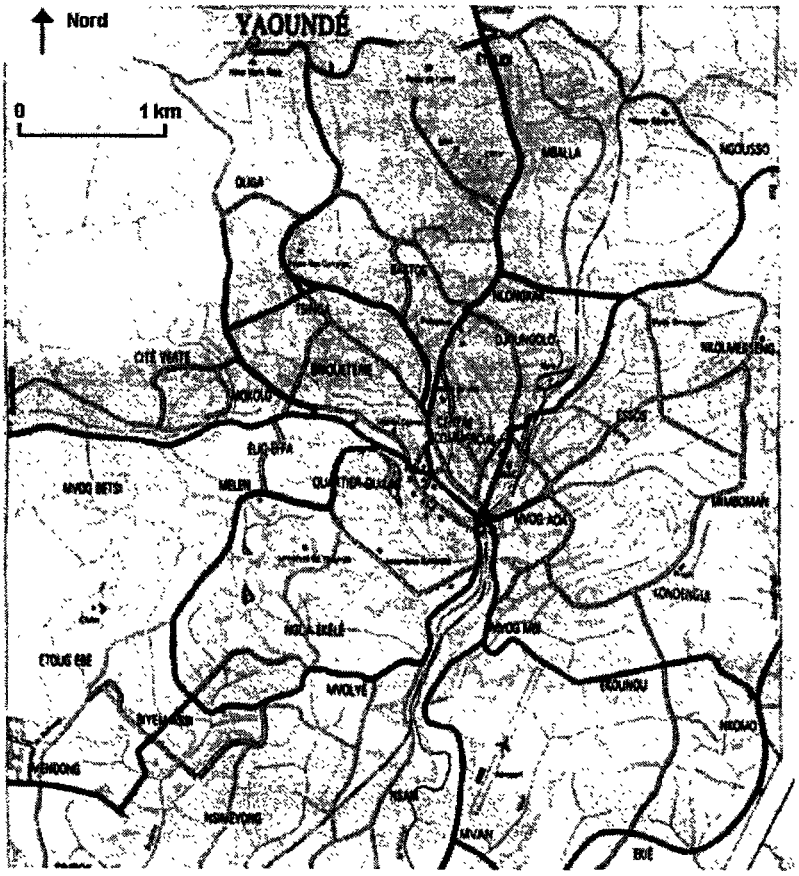


Figure 3. Image HRV (XS3) de SPOT de la ville de Yaoundé : (a) image originale 773 x 800 pixels; (b) image des contours obtenue par la technique du gradient



(source : Institut national de cartographie de Yaoundé, 1998)

Figure 4. Carte routière de la ville de Yaoundé

dû à la complexité des images RSO qui rend leur traitement difficile. La carte routière de la figure 4 confirme aussi les résultats issus des travaux d'ASSAKO ASSAKO ET TONYÉ (2000). Comme perspective de recherche, il est prévu une combinaison de la méthode présentée dans cette étude avec un détecteur de structures linéaires considérant non pas la différence des valeurs radiométriques (comme la technique du gradient), mais leur rapport (BOVIK, 1988). En effet, il a été montré que les opérateurs tels que le gradient induisent souvent une fausse détection de contours sur des images soumises au chatoiement (TOUZI *et al.*, 1988). D'autres expérimentations sont également effectuées à l'aide de cette méthodologie sur des images RSO d'autres villes camerounaises.

5. Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier des organismes suivants :
- l'Agence universitaire de la Francophonie (anciennement AUPELF-UREF) à travers le projet de Laboratoire associé francophone (LAF n° 601) et des bourses de stage doctorante et post-doctorale (Sherbrooke, 1996, 1997).
- l'Agence spatiale européenne à travers la fourniture d'images radar.
Nous les en remercions. Nous remercions également le professeur Jean-Paul RUDANT de l'Université de Marne-La-Vallée (France) pour sa coopération à nos projets.

6. Références

ASSAKO ASSAKO, R.J. et TONYÉ, E. 2000. Évaluation comparative des méthodes pour la délimitation d'un périmètre urbain par télédétection. Télédétection, vol. 1, n° 4, p. 20-41.

BOVIK, A.C. 1988. On detecting edges in speckle imagery. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 36, n°10, p. 1618-1627.

DASARATHY, B.V. and HOLDER, E.B. 1991. Image characterization based on joint gray level-run length distributions. Pattern Recognition Letters, vol. 12, p. 497-502.

GOUINAUD, C. 1996. traitement d'images satellitaires pour la détection d'agglomérations. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des télécommunications de Paris, 243 p.

HARALICK, R.M., SHANMUGAN, K. and DINSTEIN, I. 1973. Textural features for image classification. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, vol. 3, p. 610-621.

LEE, J.S. 1980. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 2, n° 2.

LEMARCHAND, P. 1994. L'Afrique et l'Europe. Atlas du xx^{e} siècle. Éditions Complexes, Bruxelles.

SERRA, J. 1982. Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London, 628 p.

TONYÉ, E., AKONO, A., NDI NYOUNGUI, A., NLEND, C. et RUDANT, J.-P. 2000. Cartographie de la ligne de rivage par analyse texturale d'images radar à synthèse d'ouverture de ERS-1 et de E-SAR. Télédétection, vol. 1, n° 3, p. 1-21.

TOUZI, R., LOPES, A. and BOUSQUET, P. 1988. A statistical and geometrical edge detector for SAR images. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, n°6, p. 764-773.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 105-110

11

Intégration des données fournies par la télédétection et la photogrammétrie dans un système d'information du territoire en vue d'étudier et d'évaluer les catastrophes naturelles en milieu urbain : exemple de Bucarest

FLOREA ZAVOIANU[1] et LIVIU DINULESCU[1]

[1] *Faculté de geodésie, Université technique de constructions de Bucarest, 124, boul. Lacul Tei, Sector 2, Bucarest, Roumanie; téléphone : + 40 01 242 12 08; télécopieur : + 40 01 242 07 81; courriel : fzavoian@pcnet.pcnet.ro*

Résumé

Nous présentons les principes de base et les résultats préliminaires obtenus par le traitement des données fournies par la télédétection satellitaire, des photographies aériennes, des enregistrements vidéographiques et des données de terrain. Leur analyse dans le cadre d'un système d'information du territoire (SIT), pour une zone urbaine, a été faite en vue de surveiller les catastrophes naturelles (tremblements de terre, inondations, glissements de terrain, incendies, etc.) et d'en évaluer les effets à partir de ces données. Par photo-interprétation des stéréogrammes recueillis avant la catastrophe, on a construit un modèle tridimensionnel (3D) de référence pour toute la zone concernée de la ville de Bucarest. Ce modèle a été construit sur la base de photographies à l'échelle du 1 : 6 000 et a été complété avec des données obtenues par la numérisation des plans cadastraux à l'échelle du 1 : 2 000 et les levés de terrain. Pour chaque bâtiment, on établit un système d'informations techniques servant à l'évaluation détaillée des effets de la catastrophe. Après la catastrophe, par analyse des images satellitaires à haute résolution, on établit les zones affectées par celle-ci et pour lesquelles on construit un modèle 3D d'après la catastrophe. Pour la création

de ce modèle, on a utilisé les images vidéographiques SVHS prises en hélicoptère à 80 m, à 350 m et à 500 m d'altitude. Par l'analyse comparative des deux modèles 3D établis avant et après la catastrophe, on évalue les effets de celle-ci sur la zone urbaine testée.

1. Introduction

La surveillance des désastres naturels et l'évaluation de leurs effets constituent un problème complexe du fait de l'analyse d'un grand volume de données de nature et de précision diverses. Pour cette opération, il est nécessaire de construire une base de données techniques, dont l'analyse constituera le fondement des décisions administratives. Cette analyse sera plus ou moins détaillée en fonction du niveau auquel sera prise la décision. L'analyse de détails d'un modèle 3D à la quatrième dimension exige, d'une part, l'utilisation de sources de données homogènes pour des superficies étendues et, d'autre part, des possibilités de collecte précise, rapide et efficace. Un SIT 3D, établi pour une zone urbaine, comprend en outre le modèle 3D qui constitue la base technique de données cartographiques et informationelles concernant : l'occupation et l'utilisation du sol, les ressources naturelles, la valeur du terrain. Ce modèle est complété avec d'autres bases de données portant sur : le système juridique, les sources de pollution, les agents atmosphériques et le climat local, les facteurs socio-économiques concernant la distribution, l'occupation et la structure de la population, les institutions administratives ainsi que les plans d'intervention rapide des divers services publics.

Pour la construction d'un tel système, il faut tenir compte de plusieurs facteurs, à savoir les conditions locales notamment : l'équipement informatique disponible, les systèmes de logiciels existants, le personnel technique qui le dessert, le mode d'intégration des diverses sources de données qui doivent être collectées, emmagasinées, organisées, traitées et analysées ensemble, les institutions et les organismes impliqués ainsi que la stratégie de développement socio-économique de la zone concernée. Les zones de changements significatifs sont mises en évidence sur la base de l'exploitation des données satellitaires à haute résolution, zones pour lesquelles le modèle 3D sera établi à grande échelle par voie photogrammétrique. Ce système d'organisation par niveaux d'information offre la possibilité d'intégrer les différentes sources de données tout en effectuant une analyse efficace et rapide des effets des catastrophes naturelles.

2. Méthodologie

Dans une première phase, l'établissement des zones endommagées par un désastre naturel n'exige pas une grande précision. Il peut s'effectuer dans le cadre d'un SIT en utilisant les images de télédétection à haute résolution (KNYIHAR and WINKLER, 1993). Pendant cette phase, on peut définir les périmètres affectés par le désastre, les implications sur les régions avoisinantes et sur le milieu ambiant. Les dégâts provoqués par une catastrophe sont établis en comparant le modèle 3D de référence construit avant la catastrophe par méthodes photogrammétriques (ZAVOIANU and NEDEELCU, 1997; ZAVOIANU *et al.*, 1997; GRÜN, 1996) et le modèle 3D construit après la catastrophe à partir des images vidéographiques prises en hélicoptère. Les changements constatés entre les deux modèles 3D sont analysés dans le cadre d'un système d'information 3D (SIT 3D). L'analyse détaillée des destructions (fissures intérieures, détérioration de l'ossature de bâtiments) ne

peut être effectuée que dans le cadre d'un système d'information technique 3D (SITh 3D) de référence (WEINDORF *et al.*, 1997) construit pour chaque bâtiment. Un tel système doit se trouver à la base de l'évaluation des dégâts provoqués par un désastre.

2.1. Création des modèles correspondant aux trois phases

Le contenu en informations ainsi que le volume de données à traiter diffèrent d'une phase à l'autre. Compte tenu de ce fait et du déroulement des interventions en cas de catastrophe, les bases de données et les systèmes de gestion ont été organisés en fonction de ces phases.

2.1.1. Détection des changements à partir des images satellitaires

Pour le premier niveau d'analyse des catastrophes naturelles en vue d'identifier les zones endommagées et d'étudier les effets de la catastrophe sur le milieu ambiant, on a utilisé des données satellitaires TM de Landsat et des données HRV de SPOT.

Il est indispensable, donc, de mettre en place un système mondial d'observation et de surveillance des désastres naturels qui a été proposé par KURODA and KOIZUMI (1996). La réalisation d'un tel système est réclamée par les nombreux dégâts provoqués par les désastres naturels dans toutes les zones géographiques de la Terre. Pour le traitement des images satellitaires, on a utilisé le logiciel Erdas Imagine et, pour l'établissement du SIT, le logiciel ARC/INFO. La technique de la détection des changements à l'aide des images satellitaires est bien connue. Les changements significatifs peuvent être mis en évidence par les méthodes suivantes : comparaison des images multidates d'un même capteur et régression de ces images multidates classifiées. C'est la première méthode qui a été utilisée après le traitement préliminaire des images multidates par rapport à une situation de référence constituée par la carte numérique. On y a mis en évidence les différences positives et négatives à l'aide d'un nouveau plan-image contenant les polygones à l'intérieur desquels des changements importants sont possibles. C'est dans ces polygones qu'il faut prendre les premières mesures d'intervention et de secours en vue de limiter les dégâts et d'éviter leur extension. Les résultats de l'analyse effectuée peuvent être facilement représentés sur une carte. Les tendances du phénomène ainsi que ses variations temporelles ne peuvent être mises en évidence car elles nécessitent plusieurs cycles de mesures en cas de glissements de terrain, d'inondations, d'incendies, etc. Il convient de signaler que l'efficacité de cette phase est limitée par la rapidité avec laquelle les images satellitaires parviennent à l'utilisateur.

2.1.2. Création des modèles 3D avant et après catastrophe

La phase ayant pour objet d'évaluer les dégâts se déroule sur la base du modèle 3D établi aussi bien avant qu'après la catastrophe. Le premier modèle, avant catastrophe, doit être établi pour toute la zone urbaine qui pourait être affectée par un désastre naturel. Pour construire le modèle 3D, qui représente la situation de référence et qui peut être inséré dans le SIT 3D, on a eu recours à la photogrammétrie analytique sur la base de photographies analogiques. L'utilisation des images numériques ou numérisées peut être faite dans le cadre d'un processus automatisé ou semi-automatisé d'exploitation du stéréogramme. Dans notre cas, le modèle 3D a été créé à partir des photographies aériennes de 1994 à l'échelle du 1 : 6 000.

Les données obtenues en utilisant ces photographies ont été incomplètes car, dans les zones urbaines, les ombres et les contrastes des objets ne permettent pas d'identifier avec

précision tous les détails. Par la suite, ces données ont dû être complétées avec les données obtenues par numérisation des plans topographiques de la zone concernée à l'échelle du 1 : 2 000. Cette zone comprend trois grands ensembles du centre de la ville de Bucarest. Les bâtiments de cette zone, environ 120, de forme, de structure et de hauteur très diverses sont les plus anciens de la ville et leur ossature pourrait céder en cas de tremblement de terre. Les détails topographiques recueillis sur le stéréomodèle sont représentés par leur position planimétrique à laquelle sont ajoutés les éléments précisant les connexions et les voisins de chaque détail. Les attributs accompagnant chaque détail précisent ses caractéristiques. Les détails sont groupés par classes d'objets. Il y a ainsi des détails ponctuels, linéaires et de surface. La base de données est structurée topologiquement, les détails étant reliés entre eux par des entités comme les arcs, les noeuds et les faces. La base contient uniquement des données vectorielles. La création du modèle 3D après catastrophe doit s'effectuer en temps réel pour les zones où des changements importants ont eu lieu et ont été définis lors de la première phase. À cette fin, on doit utiliser les enregistrements vidéographiques réalisés à l'aide des moyens d'intervention rapide, soit hélicoptères ou avions légers de basse altitude. Afin d'établir le modèle 3D de la zone urbaine, les images vidéographiques exigent un traitement préliminaire et leur exploitation s'effectue automatiquement. Pour les travaux expérimentaux que nous avons entrepris dans le cadre de ce projet, on a effectué des prélèvements vidéographiques sur la zone testée en utilisant une caméra à haute résolution SVHS à trois altitudes : 80 m, 350 m et 500 m. Le processus technologique défini ainsi que les traitements afférents sont en cours de réalisation et de bons résultats sont à prévoir.

3. Détection des changements par la comparaison des deux modèles 3D

En effectuant la comparaison entre le modèle 3D de référence et le modèle établi après catastrophe, les différences entre ces deux modèles ont conduit à l'établissement d'un nouveau modèle 3D avec des changements significatifs. Les changements positifs correspondent aux constructions ou aux reconstructions de la zone urbaine ou sont dus aux phénomènes naturels dans le cas des inondations. Les changements négatifs correspondent aux destructions provoquées par les tremblements ou autres phénomènes naturels. Ces changements doivent être analysés de façon détaillée en employant le modèle 3D à grande échelle. La précision avec laquelle on détermine les dégâts est liée à l'échelle des photographies utilisées. Le type de changements détectés se résume à des bâtiments ou à des parties de bâtiments écroulés; ils peuvent être directement déterminés par mesure sur stéréogrammes ou peuvent être déduits par photo-interprétation de l'image. Les phénomènes naturels (tremblements de terre et inondations) produisent des modifications profondes de la structure intérieure des bâtiments : fissures, déplacements, écroulement des parois, etc. Ces modifications seront mises en évidence en utilisant le SIT 3D construit pour chaque bâtiment. Pour l'établissement du système d'information SITh 3D, on doit utiliser les plans d'exécution, d'aménagement intérieur ainsi que les plans des divers réseaux (eau, chauffage, éclairage, téléphone, etc.) de chaque bâtiment. Ce SITh 3D sera complété avec les autres bases de données socio-économiques, démographiques, etc. L'analyse des modifications à ce niveau doit être effectuée par des travaux sur le terrain.

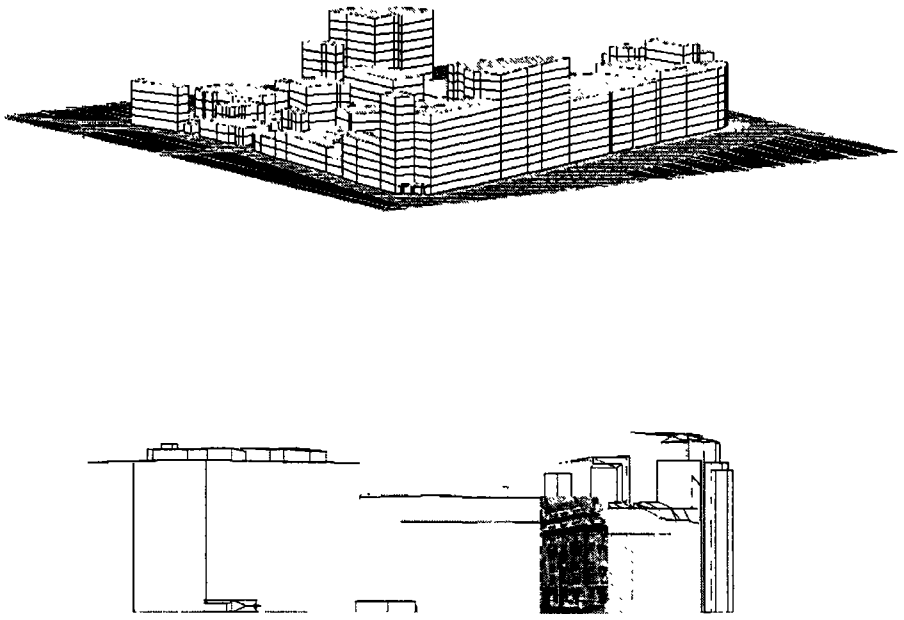


Figure 1. Le modèle 3D de la zone urbaine : a) représentation 3D d'un grand ensemble de la zone testée de la ville de Bucarest; b) exemple d'insertion de photographies terrestres des façades de bâtiments.

4. Conclusion

Dans cet article, on présente la méthodologie et les résultats préliminaires de l'évaluation des effets des catastrophes naturelles dans une zone urbaine. L'utilisation combinée des données fournies par la télédétection, des photographies aériennes et des levés sur le terrain permet une évaluation à la fois précise, rapide et efficace des effets des catastrophes naturelles. À l'avenir, nos préoccupations ont pour objet de mettre au point une méthodologie permettant d'établir le modèle 3D de façon automatique à partir des images vidéographiques et de celles fournies par les satellites commerciaux à très haute résolution spatiale (0,82 m), reçues en temps réel.

5. Remerciements

Cette étude a été menée à la Faculté de géodésie de l'UTCB à l'aide du logiciel ERDAS et ARC/INFO mis à notre disposition par Geosystem Romania que nous remercions.

6. Références

FRITZ, W.L. 1996. Commercial Earth Observation Satellites. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI, Part B4, p. 273-282.

GRÜN, A. 1996. Generierung und Visuelisirung von 3-D Stedtmodellen. OSIG/GISWISS Séminaire de Morges, 16-17 avril, 1996, p. 31/1-31/14.

KNYIHAR, A. and WINKLER, G. 1993. Envivonmental Information System and Remote Sensing. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 17, n° 3, p. 217-221.

KONECNY, G. 1996. International Mapping from Space. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI, Part B4, p. 465-468.

KURODA, T. and KOIZUMI, S. 1996. Fifth International Research and Training Seminar on Regional Development Planning for Disaster prevention. 9-11 November 1991, Nagoya, Japan, 10 p.

WEINDORF, M., VÖGTE, T. and BAHR, H.-P. 1997. An Approach for the Detection of Damages in Buildings from Digital Aerial Information. *in* F. Wenzel, D. Lungu and O. Novak (ed.). Vrancea Earthquakes : Tectonics, Hazard and Risk Mitigation. Kluwer Academic Publishers, Karlsruhe, p. 341-348.

ZAVOIANU, F., NEDELCU, C. et DINULESCU, L. 1997. Étude de la zone urbaine à l'aide du modèle 3D établi par des méthodes photogrammétriques. Bulletin scientifique de l'Université technique de constructions de Bucarest, n° 4, p. 31-43.

ZAVOIANU, F. and NEDELCU, C. 1997. Urban Area 3-D Model Realized by Photogrammetric methods for Disaster Evaluation, Preliminary Results. *in* F. Wenzel, D. Lungu and O. Novak (ed.). Vrancea Earthquakes : Tectonics, Hazard and Risk Mitigation. Kluwer Academic Publishers, Karlsruhe, p 333-339.

PARTIE II

Télédétection et désertification

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 113-118

12

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

MARIE-FRANÇOISE COUREL [1], PATRICE BICHERON [2], ÉRIC MOUGIN[2] et LIONEL JARLAN [2]

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

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

Résumé

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

1. Introduction

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

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

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

2. Diffusiomètre-vent de ERS1 et ERS2

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

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

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

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

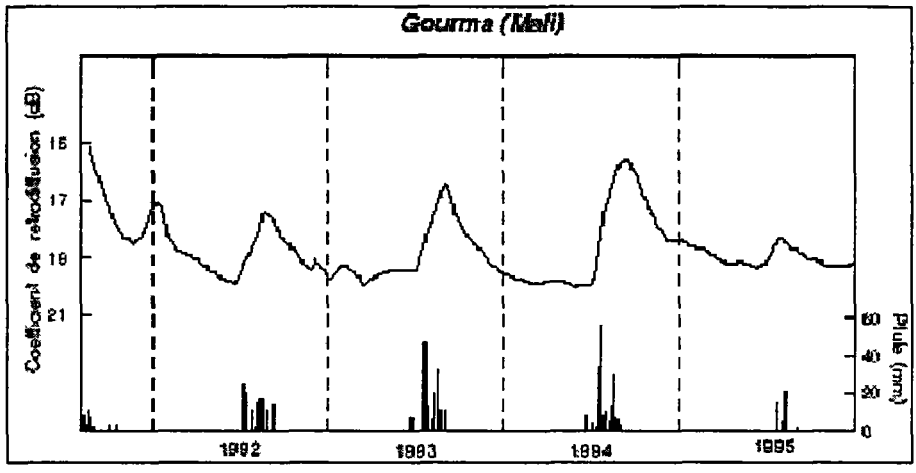


Figure 1. Évolution du coefficient de rétrodiffusion radar mesuré à 45° d'incidence par les diffusiomètres ERS.La région d'étude est située dans la transition saharo-sahélienne (17° N, 1,7° O).

3. POLDER

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

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

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

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

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

Figure 2. Carte de LAI 2ème décade de novembre

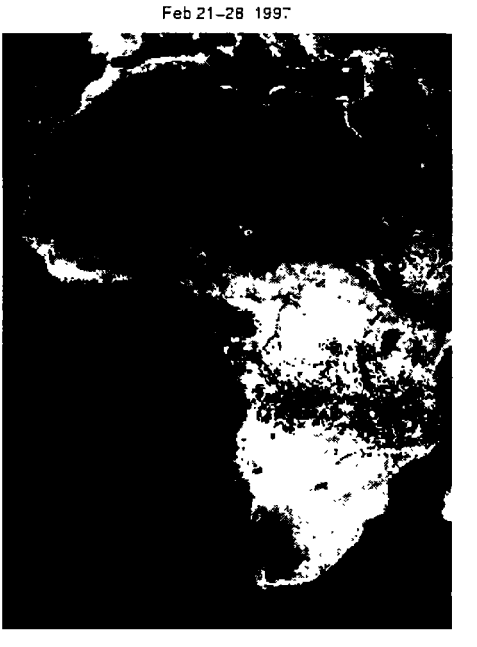


Figure 3. Carte de LAI 3ème décade de février

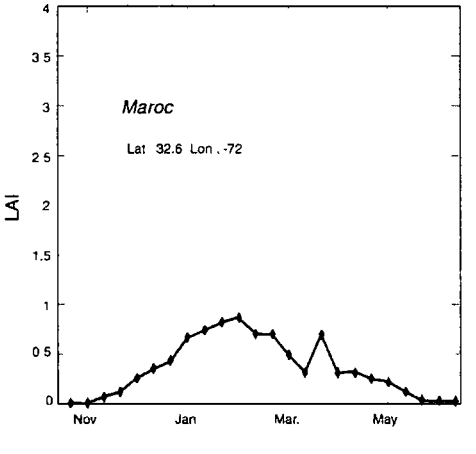


Figure 4. Évolution temporelle du LAI pour les prairies

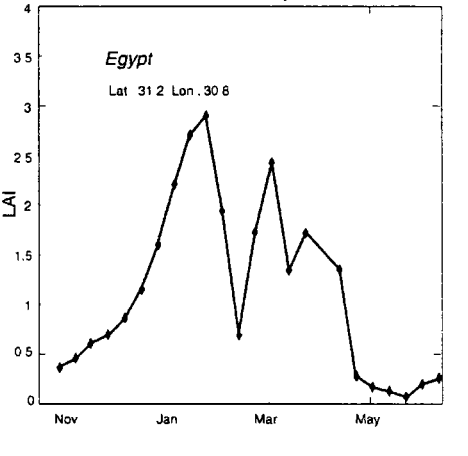


Figure 5. Évolution temporelle du LAI pour les cultures

4. Conclusion

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

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

5. Références

BICHERON, P. and LEROY, M. , 1999. A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model. Remote Sensing of Environment, vol. 67, p. 251-266.

COUREL, M.-F., KANDEL R. and RASOOL, I., 1984. Surface albedo and the Sahel drought. Nature, vol. 307, n° 5951, p. 528-531, 9 feb.1983.

COUREL, M.-F., 1985. La contraction de la surface arborée d'après les images Landsat et SPOT simulées, signe d'adaptation sahélienne à la sécheresse. Photo-interprétation, n° 81.

COUREL, M.-F. et CHAMARD, Ph.C., 1992. Reforestation au cap Vert (Sénégal). Afrique contemporaine, n° 161, p. 238-247.

DESCHAMPS, P.Y., BREON, F. M., LEROY, M. *et al.*, 1994. The POLDER mission : instruments characteristics and scientific objectives. IEEE Tran. Geos. Rem. Sen., vol. 32, p. 598-615.

FRISON, P.L., MOUGIN, E. et HIERNAUX, P., 1998. Observations and interpretation of seasonal ERS wind scatterometer data over northern Sahel (Mali). Remote Sensing of Environment, vol. 63, p. 233-242.

KUUSK, A., 1995. A fast invertible canopy reflectance model, Remote Sensing of Environment, vol. 51, p. 342-350.

MOUGIN, E., LOPES, A., PROISY, C., WARICH, A., FRISON, P.L., LO SEEN, D. and LECOMTE, P., 1993 : Analysis of ERS-I scatterometer data over land surfaces. Proceedings of the 2nd ERS-1 Symposium, Hamburg, 11-14 Oct., p. 393-397.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 119-126

13

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

MARIE-FRANCE BELLAN[1], JEAN-LUC CARAYON[1], THIERRY PHULPIN[2], FRANÇOIS LAVENU[3] et FRANÇOIS BLASCO[1]

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

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

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

Résumé

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

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

1. Introduction

Parmi les phénomènes menaçant l'équilibre naturel, les feux ont pris, depuis quelques dizaines d'années, une importance prépondérante. Récemment, on a pu voir le nord de l'Amazonie (en particulier l'État de Roraima, 225 000 km^2) en feu (www.nma.embrapa.br/projectos/queimadas). Les conséquences sur les écosystèmes de la région n'ont pas encore été évaluées.

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

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

2. Capteurs de SPOT-4

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

3. Zone d'étude

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

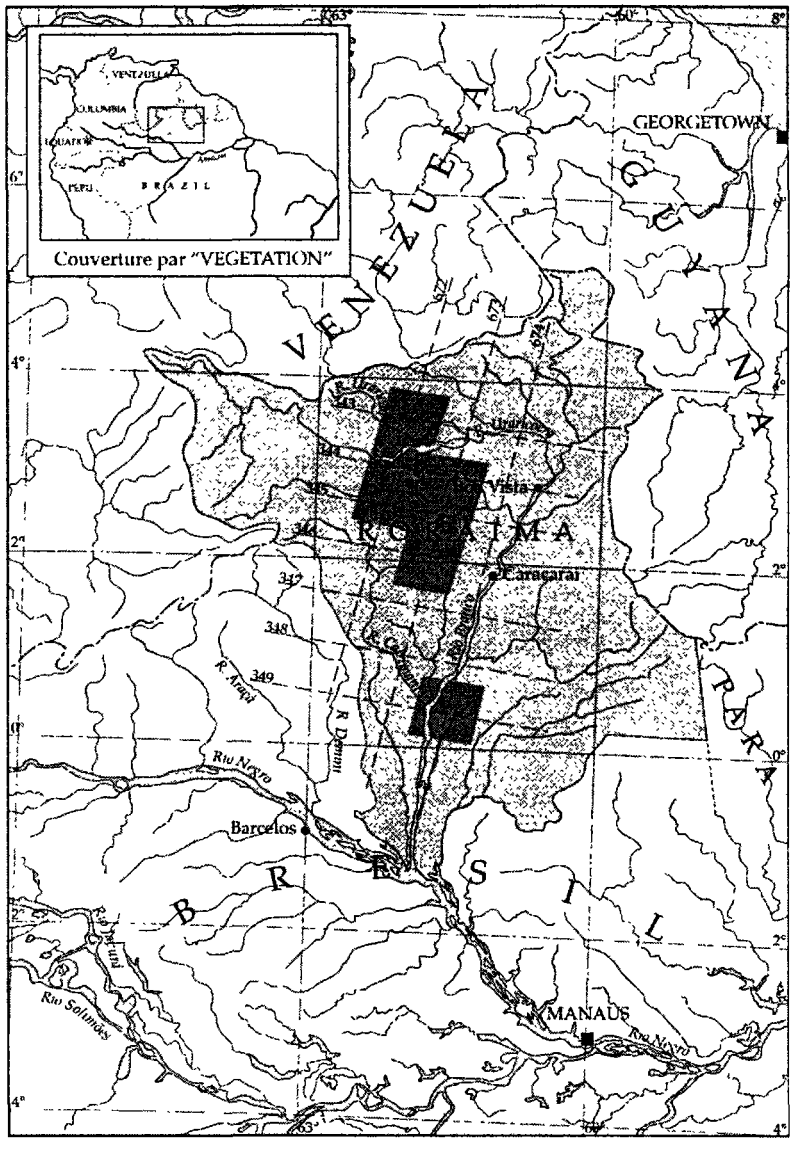


Figure 1. Zone d'étude et couverture par les données VGT et HRVIR de SPOT-4. En tireté : zone d'étude VEGETATION (ZEV).

4. Matériel utilisé

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

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

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

5.1. Image VEGETATION

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

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

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

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

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

Cette estimation s'appuie sur deux hypothèses : les pixels à faible réflectance dans le PIR et forte dans le MIR sont considérés comme brûlés et chaque pixel représente 1 km^2.

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

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

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

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

5.2. Images HRVIR

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

5.2.1. Classe 1

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

5.2.2. Classe 2

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

5.2.3. Classe 3

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

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

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

6. Discussion

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

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

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

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

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

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

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

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

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

7. Conclusion

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

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

8. Remerciements

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

9. Références

DWYER, E., GREGOIRE, J.M. and MALINGREAU, J.P. 1998. A global analysis of vegetation fires spatial and temporal dynamics. Ambio, vol. 27, n°3, p. 175-181.

EASTWOOD, J.A., PLUMMER, B.K., WYATT, B.K., and STOCKS, B.J. 1998. The potential of SPOT-VGT data for fire scar detection in boreal forest. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n°18, p. 3681-3687.

GRÉGOIRE, J.M., GLENAT, B., JANVIER, P., JANODET, E., TOURNIER, A. and SILVA, J.M.N. 1998. Fire Activity in the Guiana shield, the Orinoco and Amazon Basins during March 1998. Commission of the European Communities, Joint Research Center, Space Applications Institute, Ispra Establishment, Italie.

JEFFERY, D. 1989. Yellowstone : the great fires of 1988. National Geographic, n°175, p. 255-273.

KOFFI, B., GREGOIRE, J.M. and EVA, H.D. 1995. Satellite Monitoring of vegetation fires on a multi-annual basis at continental scale in Africa. In : J.S. Levine (édit.) Biomass burning and Global Change, Williamsburg, Virginie.

MALINGREAU, J.P., STEPHENS, G. and FELLOWS, L. 1985. Remote Sensing of forest fires : Kalimantan and North Borneo in 1982-83. Ambio, vol. 14, n° 6, p. 314-315.

MORAES NOVO, E. 1998. Communication personnelle.

PUIG, H., BLASCO, F. and BELLAN, M.F. 1981. Vegetation Map of South America. UNESCO, Natural Resources Research XVII, 1 : 5 000 000 , Paris, avec notice.

RADAMBRASIL (Projeto). 1975. Levantamento de Recursos Naturais. Vol. 8, Boa Vista/Roraima, Folhas NA/NB 20. Mapa fitoecologico. E 1 : 1 000 000. Ministerio das Minas a Energia, Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM), Rio de Janeiro, Brasil.

RANDRIAMBELO, T., BALDY, S., BESSAFI, M., PETIT, M. and DESPINOY, M. 1998. An improved detection and characterization of active fires and smoke plumes in south-eastern Africa and Madagascar. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 14, p. 2623-2638.

SARMIENTO, G. 1983. The savannas of tropical America. *in* Bourlière (éd.). Tropical Savannas. Collection Ecosystems of the World, 13, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, p. 245-288.

TREES, 1996. Vegetation Map of South America from NOAA-AVHRR, Commission of the European Communities, Joint Research Center, Ispra Establishment, 1 : 5 000 000.

VAN DONSELAAR, J. 1968. Phytogeographic notes on the savanna flora of Southern Surinam (South America). Acta Botanica Neerlandia, n° 17, p. 393-404.

VAN DONSELAAR, J. 1969. Observations on savanna vegetation types in the Guianas. Vegetatio, n° 16-17, p. 271-312.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 127-139

14

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

ROBERT DESJARDINS[1], EL MEHDI ALEM[2], PIERRE ROGNON[3], PATRICK MAUPIN[4], IBRAHIMA NDIAYE[5] et MANSOUR BENALLA[6]

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

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

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

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

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

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

Résumé

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

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

1. Introduction

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

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

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

provenant de cette combinaison.

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

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

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

2. Description du site et données disponibles

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

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

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

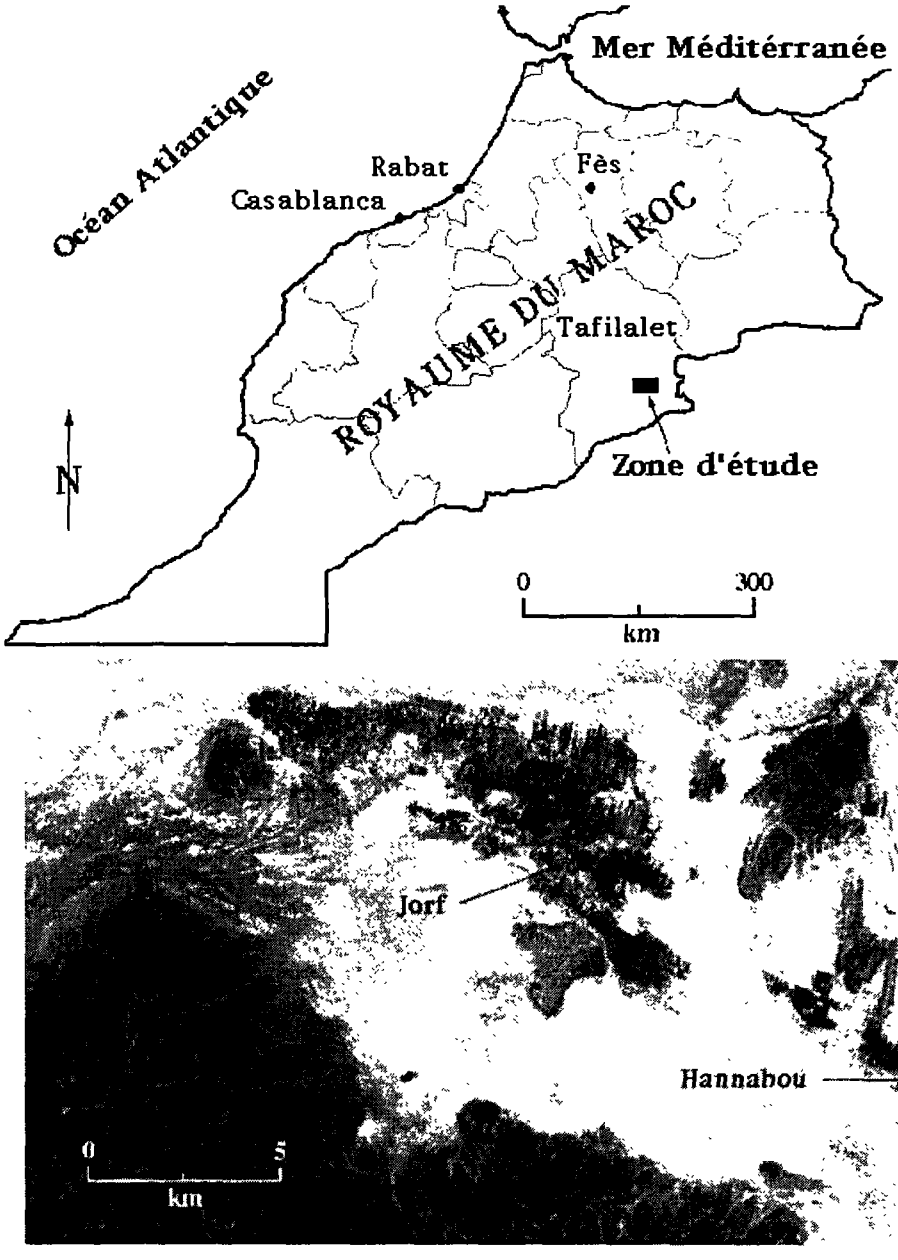


Figure 1. Localisation du secteur étudié aux échelles nationale et régionale.

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

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

3. Considérations significatives dans l'étude du changement

3.1. La résolution

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

3.2. L'information numérique, le traitement préalable

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

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

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

4. Méthodologie

4.1. Préambule

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

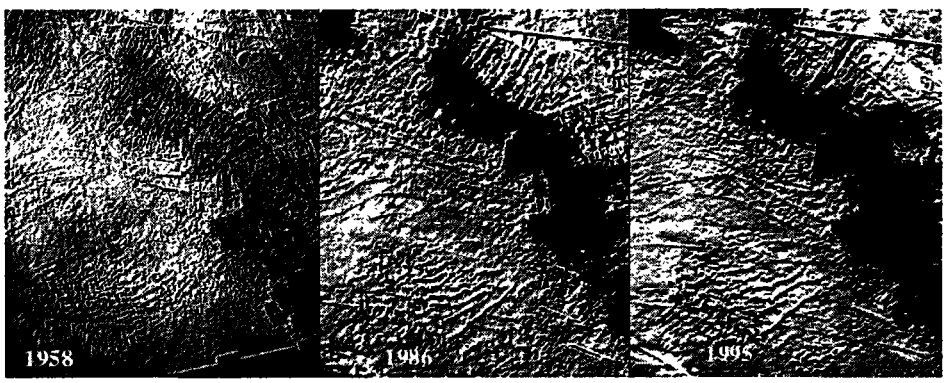


Figure 2. Visualisation des images corrigées géométriquement et rehaussées. Ce territoire couvre une superficie d'environ 12 km².

4.2. Approches retenues

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

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

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

$$\Delta_{(\text{bandes}1,2)} = \frac{Bande2 - Bande1}{Bande2 + Bande1}$$

Tableau 1. Étapes générales de la détection des changements.

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

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

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

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

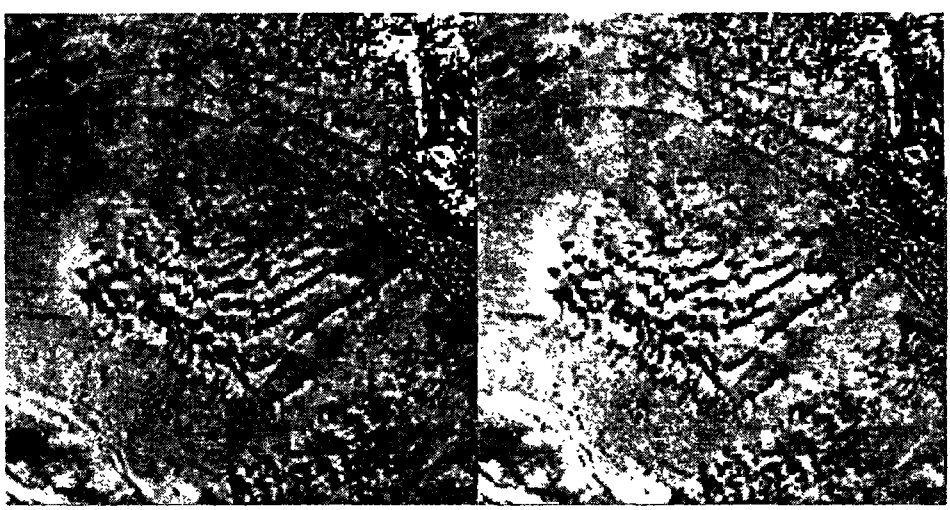


Figure 3. Résultats visuels des approches par différence normalisée (à gauche) et par analyse en composantes principales (à droite) pour les images de 1986 et de 1995.

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

5. Extraction et interprétation de l'information

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

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

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

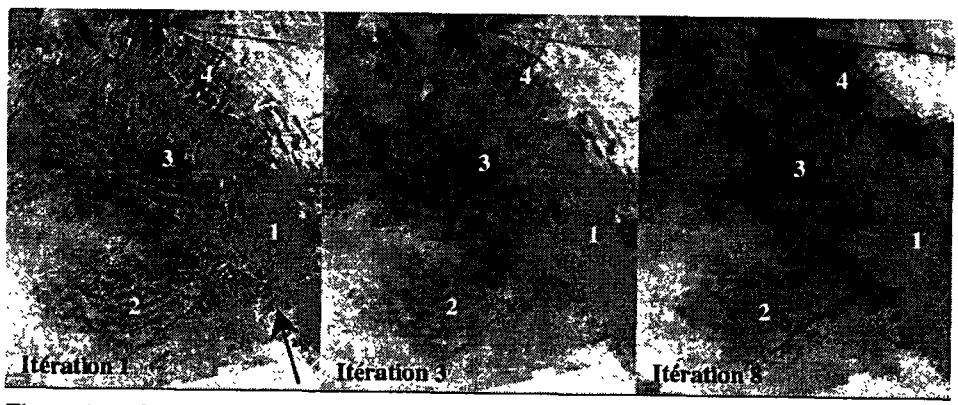


Figure 4. Conséquences visuelles de l'utilisation de filtres morphologiques sur le paysage changeant d'Hannabou en fonction du nombre d'itérations. La flèche indique le nord géographique.

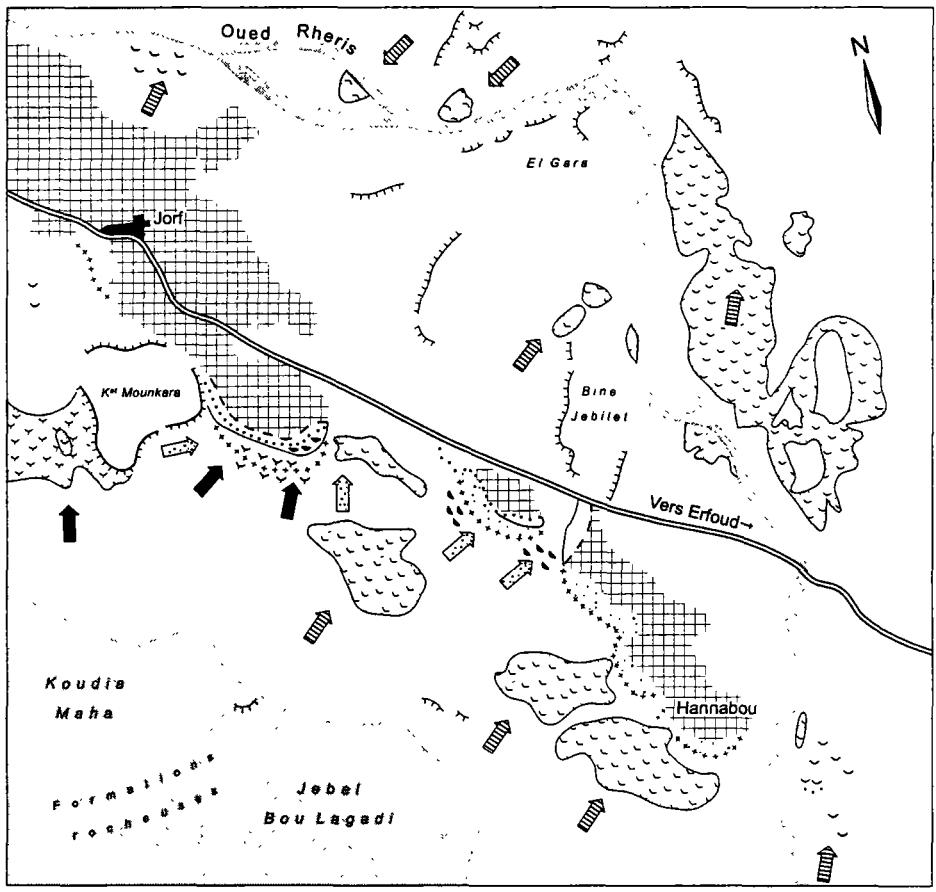


Figure 5. Présentation sommaire de quelques éléments de géographie physique pour le territoire étudié.

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

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

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

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

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

6. Conclusion

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

7. Remerciements

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

8. Références

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

CALLOT, Y., MERING, C . and SIMONIN, A. 1994 Image-analysis and Cartography of Sand Hill Massifs on High Resolution Images: Application to the Great Western Erg (NW of Algerian Sahara). International Journal of Remote Sensing, vol. 15, nº 8, p. 3799 –3822.

DERLIN ZINSOU, É. 1995. Sécheresse et désertification: l'engagement francophone. Sécheresse, vol. 6, nº 1, p. 5 - 6.

FRÉROT, A. M. 1995. Une autre vision de la sécheresse: celle des enfants de la Mauritanie. Sécheresse, vol. 6, nº 1, p. 77 - 85.

JAQUEMINET, C. 1990. Des indicateurs morphologiques pour mesurer le changement des milieux sahéliens à partir des images satellitaires à haute résolution. *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Collection Universités francophones - Actualités scientifiques, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 129 - 144.

KARIMOUNE, S., OZER, A., TRÉFOIS, P. et GOOSSENS, E. 1993. Contribution de la télédétection et des mesures spectrales à l'étude de la désertification dans le secteur sahélien du Niger. *in* DUBOIS, J.-M., BOUSSEMA, M. R., BOIVIN, F. et LAFRANCE, P. (réd.). Télédétection et ressources en eau. Collection Universités francophones - Actualités scientifiques, Actes des Journées scientifiques de Tunis, Éditions AUPELF-UREF et Presses de l'Université du Québec, p. 273 - 281.

JENSEN, J.R. 1996. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 2e édition, Prentice Hall, New York, 316 p.

LILLESAND, T.M. and KIEFER, R.W. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. 3e édition, John Wiley and Sons Éd., Toronto, 750 p.

MARIUS, C. 1995. Effets de la sécheresse sur l'évolution des mangroves du Sénégal et de la Gambie. Sécheresse, vol. 6, nº 1, p. 123 - 125.

MAUPIN, P., LE QUÉRÉ, P, DESJARDINS, R., MOUCHOT, M.C., SAINT-ONGE, B. and SOLAIMAN, B. 1997. Contribution of Mathematical Morphology and Fuzzy Logic tothe Detection of Spatial Change in Urbanized Area: Towards a Greater Integration of Image and Geographical Information Systems, IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS '97), p. 207- 209.

ROBIN, M. 1995. La télédétection. Nathan Éd., Collection Université/fac géographie, Paris, 318 p.

YACOUBI, M., EL MOURID, M., CHBOUKI, N. et STOCKLE, C.O. 1998. Typologie de la sécheresse et d'indicateurs d'alerte en climat semi-aride marocain. Sécheresse, vol. 9, nº 4, p. 269 - 276.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 141-151

15

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

MAMADOU GUEYE et ANDRÉ OZER

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

Résumé

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

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

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

1. Introduction

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

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

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

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

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

- comprendre les mutations des systèmes de production et contribuer à la connaissance des phénomènes et des mécanismes qui contrôlø.t la dégradation de l'environnement dans cette région qui abrite l'une des plus grandes paysanneries sénégalaises,
- mettre à la disposition des autorités de gestion des informations susceptibles d'améliorer la pertinence des politiques agricoles et la gestion des ressources naturelles.

2. Contexte géographique de l'étude

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

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

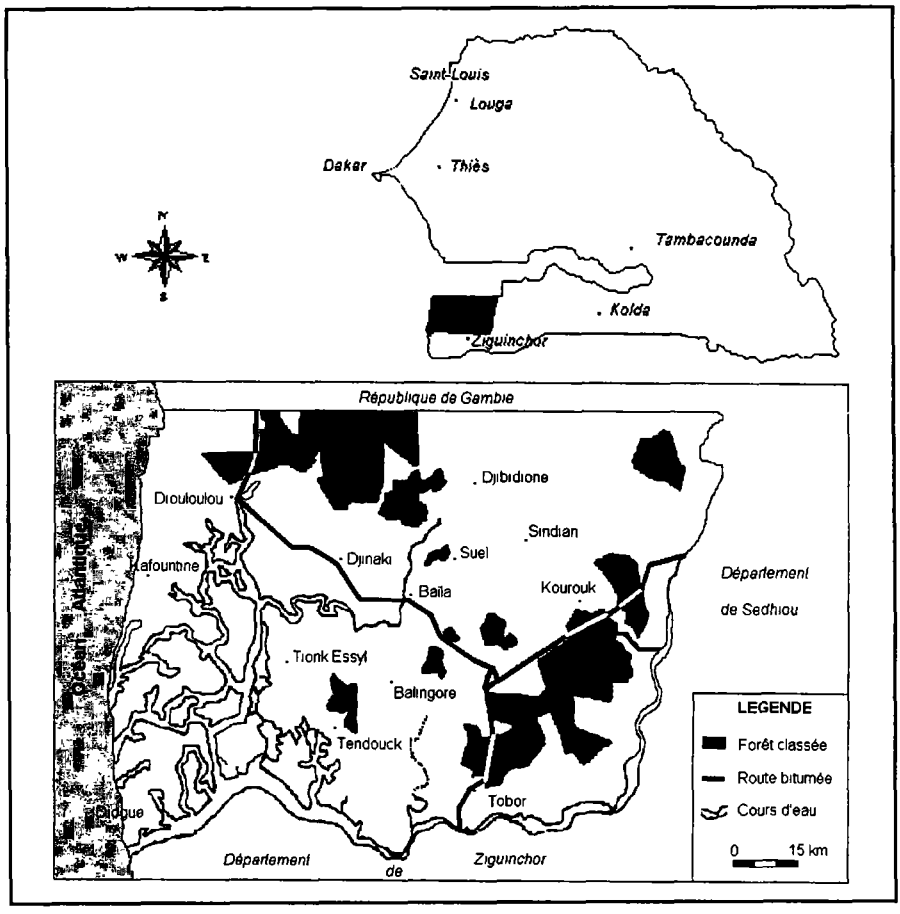


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

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

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

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

3. Méthodologie

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

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

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

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

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

3.2. Superposition des photographies aériennes et des images

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

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

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

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

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

3.3. Photo-interprétation assistée par ordinateur et cartographie

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

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

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

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

4. Résultats et discussion

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

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

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

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

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

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

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

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

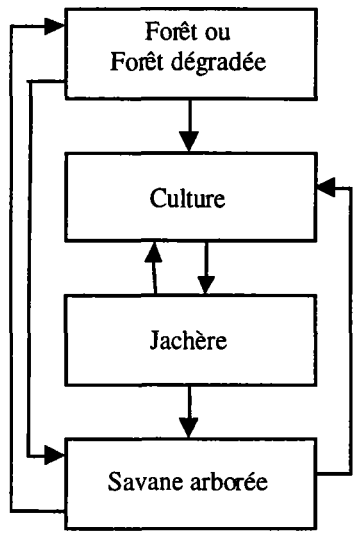


Figure 5. Cycle de l'évolution forêt, culture, jachère et savane.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Conclusion

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

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

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

6. Remerciements

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

7. Références

ANONYME, 1986. Cartographie et télédétection des ressources de la république du Sénégal. Etude de la géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols. DAT/USAID/RSI, 653 p.

AUBREVILLE, A., 1948. La Casamance. Agronomie tropicale, vol. III, n° 1-2, p. 25-52.

AUDIBERT, M., 1966. Étude hydrogéologique de la nappe profonde du Sénégal: « nappe maestrichienne ». BRGM, Paris, 105 p.

BADJI, J.E., 1996. Impact des feux de brousse sur la végétation dans le département de Bignona. Mémoire de DEA, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 52 p.

BERHAUT, J., 1967. Flore du Sénégal. Édition Clairafrique, Dakar, 487 p.

CONDAMIN, M., 1988. Dégradation anthropique des forêts de Basse Casamance. *Notes de Biogéographie,* 3 - Dép. de géo., Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, p. 115-120.

DPS (Direction de la prévision et de la statistique) 1992. Recensement général de la population et de l'habitat de 1988. Rapport régional, Ziguinchor, 45 p.

GUEYE, M., 1995. Sécheresses hydro-climatiques et modifications du milieu naturel dans le bassin de la Casamance. Mémoire de maîtrise, Université de Saint-Louis du Sénégal, 116 p.

GUEYE, M., 1999. Transformation du système de production agricole et crise de l'environnement dans le département de Bignona (Sénégal méridional). Eléments pour une gestion durable des ressources naturelles agricoles. Mémoire de DES, Université de Liège, 78 p.

PELISSIER, P., 1966. Les paysans du Sénégal : les civilisations du Cayor à la Casamance. Ed. Saint Yrieux, Imprimerie Fabrègue, 954 p.

POSNER, J., KAMUANGA, M. and LO, M., 1991. Lowland cropping systems in the lower Casamance of Senegal : results of four years of agronomic research (1982-1985). MSU International Development Papers, 129 p.

ROOSE, E., 1977. Érosion et ruissellement en Afrique de l'ouest. Vingt ans de mesures en petites parcelles expériementales. ORSTOM, *Série Travaux et Documents*, n° 78, 108 p.

SGD (Service géographique de Dakar) 1957. Carte topographique de l'Afrique de l'ouest. Feuilles Ziguinchor 4a, 4c et 4d.

VANDEN-BERGHEN, C., 1994 : La culture itinérante sur des brûlis, en Basse Casamance occidentale (Sénégal méridional) L'évolution de la végétation. In LEJEUNIA, Nouvelle série n°144, p. 1-26.

WELE, A., 1996. Contribution à l'étude de la phytogéographie et de l'écologie des espèces ligneuses de la Basse Casamance (Sénégal). Mémoire de DES, Université de Liège, 60 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 153-161

16

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

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

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

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

Résumé

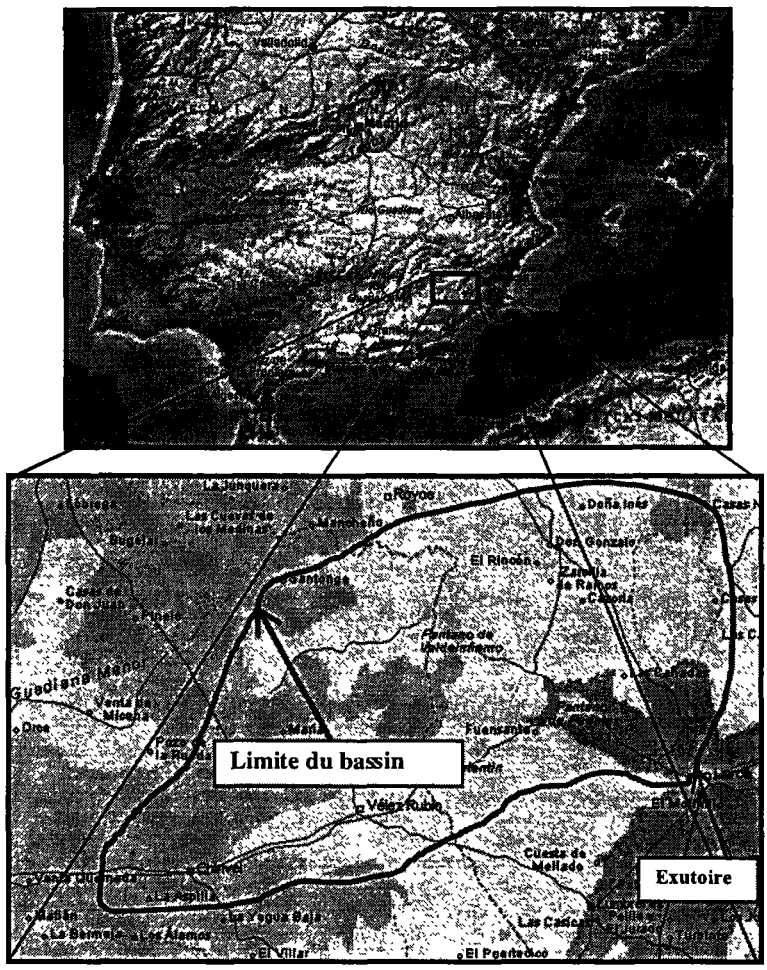
Dans les milieux arides et semi-arides où la végétation verte est généralement peu couvrante, les sols nus occupent la majeure partie de l'espace et leurs propriétés spectrales dominent le signal télédétecté. La variation de ces propriétés exprime les changements majeurs affectant les sols lors des phénomènes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

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

1. Introduction

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

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



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

Figure 1. Localisation de la zone d'étude.

2. Matériel et méthode

2.1. Données spectrales

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

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

2.2. Traitement des données

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

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

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

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

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

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

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

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

3. Résultats et interprétation des résultats

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

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

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

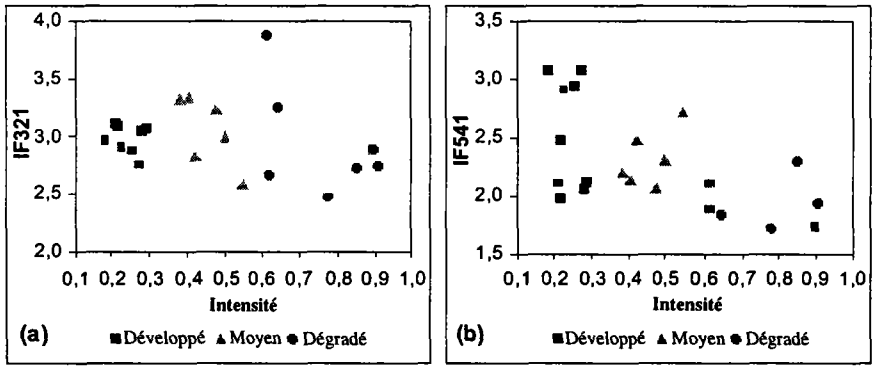


Figure 2. Indices de forme, avec des données au sol, combinant les bandes TM 3, 2 et 1(a) et les bandes TM 5, 4 et 1 (b) en fonction de l'intensité pour des sols développés, peu développés et dégradés.

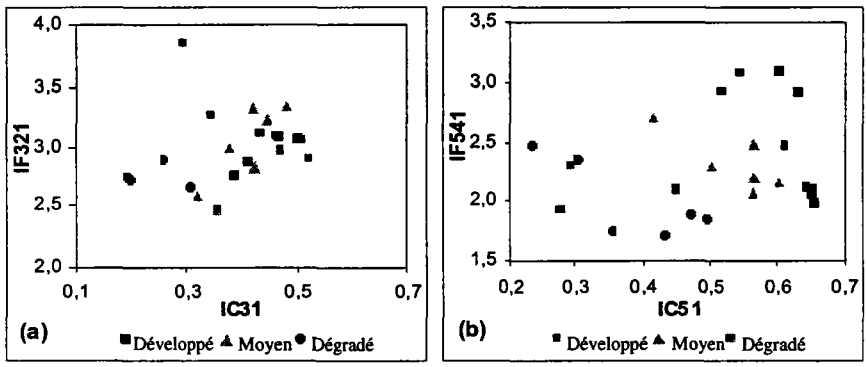


Figure 3. Indices de forme, avec des données au sol, en fonction des indices de coloration combinant les bandes TM 3, 2 et 1(a) et les bandes TM 5, 4 et 1 (b) pour des sols développés, peu développés et dégradés.

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

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

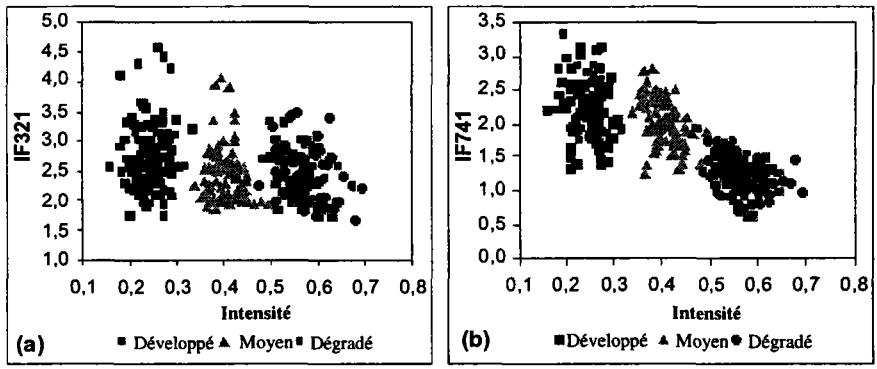


Figure 4. Indices de forme, avec des données-images, combinant les bandes TM 3, 2 et 1(a) et les bandes TM 5, 4 et 1 (b) en fonction de l'intensité pour des sols développés, peu développés et dégradés.

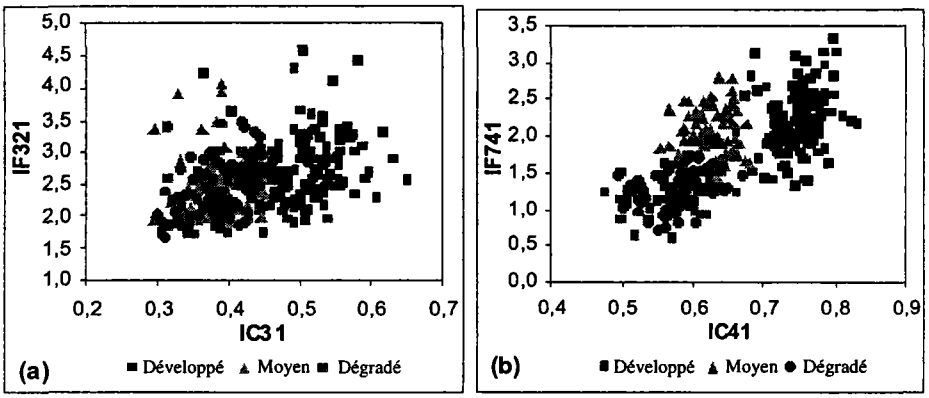


Figure 5. Indices de formes, avec des données-images, en fonction des indices de coloration combinant les bandes TM 3, 2 et 1(a) et les bandes TM 5, 4 et 1 (b) pour des sols développés, peu développés et dégradés.

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

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

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

5. Conclusion

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

6. Remerciements

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

7. Références

ADAMS, J. B., SMITH, O. M. and GILLESPIE, A. R. 1989. Simple models for complex natural surfaces : A strategy for the hyperspectral era of remote sensing. Proceedings of IGARSS'89 Symposium, 10-14 July 1989, Vancouver, Canada, p. 16-21.

BANNARI, A., HUETE, H. R., MORIN, D. et ZAGOLSKI, F. 1996. Effets de la couleur et de la brillance sur les indices de végétation. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 10, p. 1885-1906.

BAUMGARDNER, M. F., SYLVA, L. F., BIEHL, L. L. and STONER, E. R. 1985. Reflectance properties of soil. Advances in Agronomy, vol. 38, p. 1-44.

ESCADAFAL, R. and BACHA, S. 1995. Strategy for the dynamic study of desertification. Proceedings of the ISSS International Symposium (Working Groups RS and MD), Ouagadougou, Burkina Faso, 6-10 February 1995, p. 19-34.

ESCADAFAL, R., BELGHITH, A. et BEN MOUSSA, H. 1994. Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride. Sixième Symposium International « Mesures physiques et signature spectrale en télédétection », 17-21 janvier 1994, Val d'Isère, France, p. 253-259.

ESCADAFAL, R. 1993. Remote sensing of soil color : principles and applications. Remote Sensing Reviews, vol. 7, p. 261-279.

ESCADAFAL, R. et HUETE, A. 1991. Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. C. R. Acad. Sci., Paris, tome 312, Série II, p. 1385-1391.

GEESON, N. A. and THORNES, J. B. 1996. MEDALUS II : Mediterranean Desertification and Land Use. Executive summary phase II. European Commission, DG XII, Environment and Climate Programme.

HILL, J., MEHL, W. and RADELLOF, V. 1995. Improved forest mapping by combining corrections of atmospheric and topographic effects in Landsat TM imagery. *In Sensors and environment applications of remote sensing*, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 143-151.

HUETE, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, n° 25, p. 295-309.

LIU, J. G. and MOORE, J. M. 1990. Hue image RGB composition. A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature. International Journal of Remote Sensing, vol. 11, n° 8, p. 1521-1530.

MATTIKALLI, N.M. 1997. Soil color modeling for the visible and near-infrared bands of Landsat sensors using laboratory spectral measurements. Remote Sensing of Environment, n° 59, p. 14-28.

MOUGENOT, B. et CAILLEAU, D. 1995. Identification par télédétection des sols dégradés d'un domaine sahélien au Niger. Proceedings of the ISSS International Symposium (working groups RS and MD), Ouagadougou, Burkina Faso, 6-10 February 1995, p. 19-34.

SCHOWENGERDT, R. A. 1983. Techniques for image processing and classification in remote sensing. Academic Press, New York, p. 117-126.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUPELF-UREF. 2000. p. 163-169

17

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

YAO BERTIN KOUADIO[1], AUGUSTIN TIYEGBO TOURÉ[2] et BI ZUELI KOLI[1]

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

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

Résumé

L'étude présentée ici a trait au débat sur les rapports entre la densité de population et la dégradation des milieux naturels. Elle part de l'hypothèse que l'extension des cultures est liée au croît démographique et qu'il est alors possible d'établir un lien direct entre la densité de population et le niveau de déforestation. L'image HRV(XS) de SPOT (1994) utilisée couvre le Parc national du Mont Péko en zone de forêt dense soumise à une forte pression humaine. Après une classification dirigée et un filtrage laplacien sur des fenêtres de cinq pixels sur cinq, équivalents à des parcelles de 100 m de côté, l'image montre le niveau de forestation et, inversement, celui de la déforestation de 1973 à 1994. Sa superposition à une carte du bilan de l'évolution des densités de population révèle, qu'au-delà de 30 hab./km^2,

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

1. Introduction

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

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

2. Méthode

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

Les densités de population sont calculées à partir d'un carroyage de 4 km de côté de la zone d'étude suivant les coordonnées UTM, en considérant que l'aire d'emprise d'une localité a un rayon de 4 km, égal à la distance moyenne entre les localités. Les intersections obtenues par ce carroyage sont des points cotés par le quotient entre le total de la population (DIRECTION DE LA STATISTIQUE, 1975 et 1988) des localités rencontrées (INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE, 1995) dans chaque cercle centré sur un point et la superficie réelle du cercle, soit 50,26 km^2. Autour du parc et du fleuve Sassandra, seule la fraction de cercle à l'extérieur de ces entités fut considérée. Les points cotés ont servi au tracé des lignes d'isodensité.

3. Résultats et discussion

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

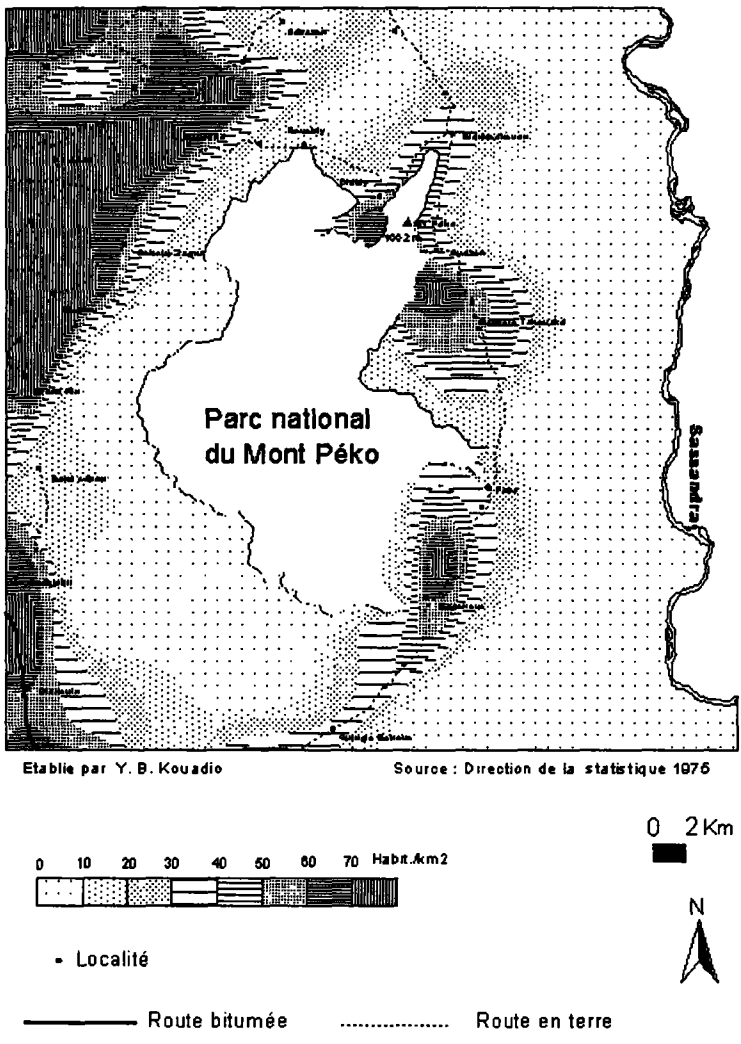


Figure 1. Densités de population en 1975

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

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

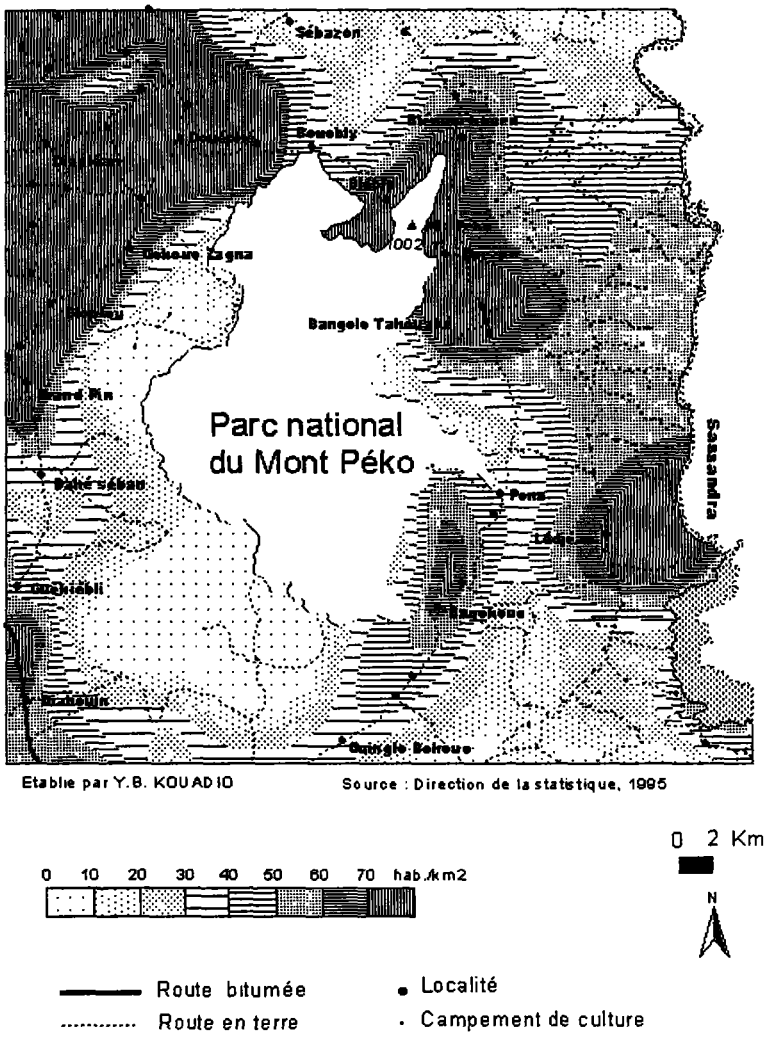


Figure 2. Densités de population en 1995

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

La superposition de la carte du bilan des densités à l'image révèle, qu'en 1995, la ligne 30 hab./km^2 souligne la limite entre la zone des forêts secondaires et fourrés à recrûs forestiers et celle des jachères et cultures.

L'étude révèle un lien entre la densité de population et la dégradation de la végétation et établit à 30 hab./km^2, la densité à partir de laquelle la forêt disparaît totalement. FILLERON (1990) fixe ce seuil à 29 hab./km^2, en utilisant des photographies aériennes.

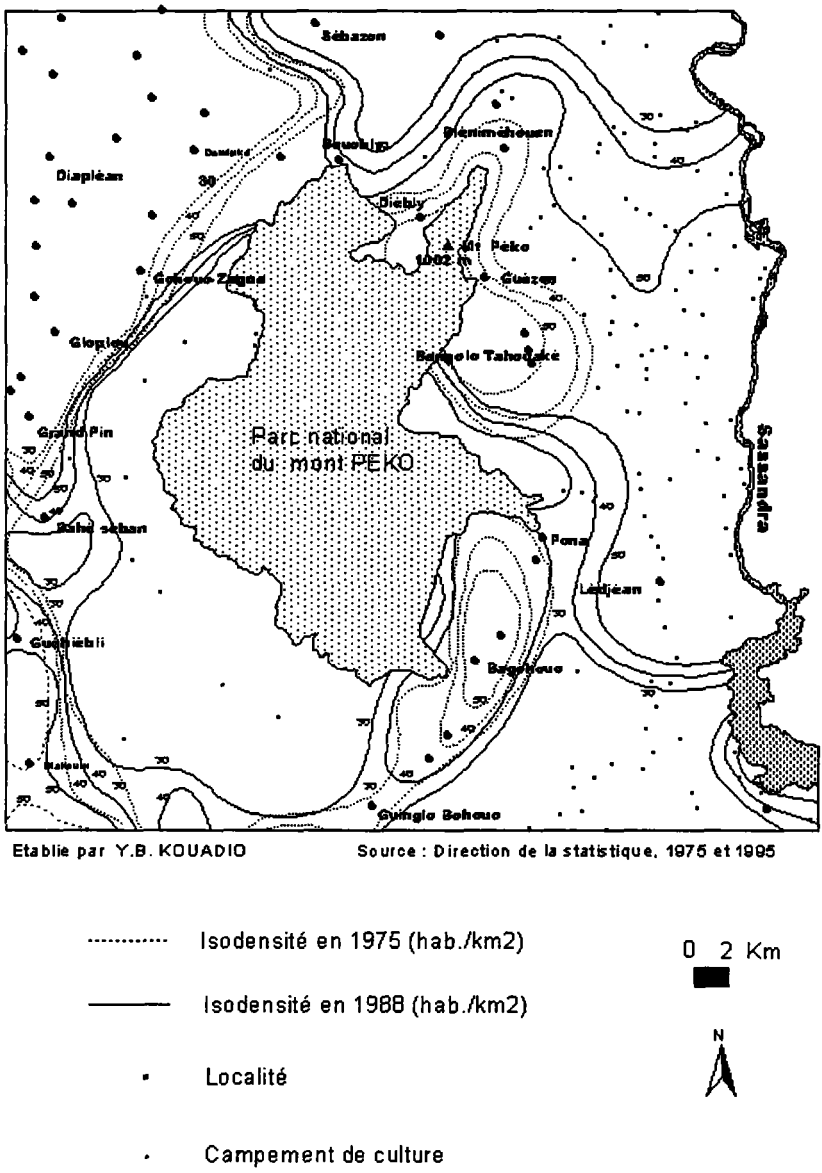


Figure 3. Synthèse de l'évolution des densités de population de 1975 à 1995

L'expression des jachères sur l'image est due à leur composition, une mosaïque de vieilles jachères, de bosquets boisés et de graminées de savanes guinéennes intégrés dans des terrains de *Chromolaena odorata*. La densité de population peut donc être un indicateur dans le traitement d'image de zones en déforestation (CHATELAIN, 1996). Au-delà de 30 hab./km^2, il semble difficile de raisonner en termes de forêt, à moins d'un changement d'échelle (PUECH, 1998).

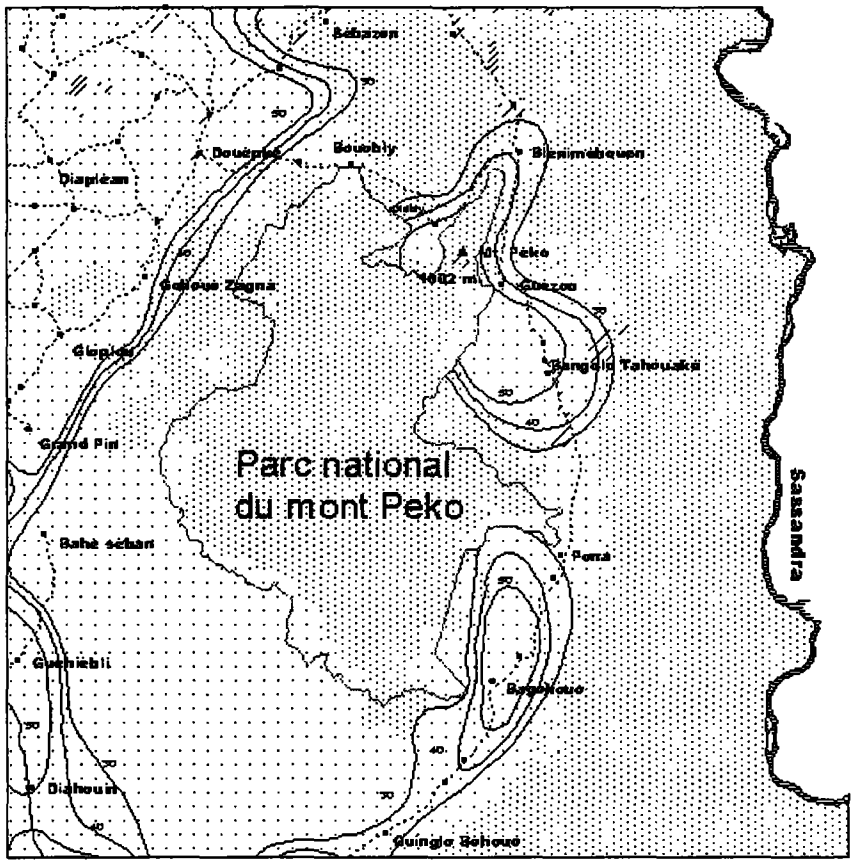


Figure 4. Densités de population et état de la végétation en 1975

4. Conclusion

La forêt se dégrade suivant la densité de la population. Au-delà de 30 hab./km^2, la dégradation devient presque irréversible. Ce résultat corrobore celui des travaux antérieurs et est acceptable. Les densités sont un indicateur utile au traitement d'image pour le suivi de l'évolution des milieux naturels. La méthode devra être appliquée à d'autres zones pour une généralisation.

5. Références

BROU, Y.T., SERVAT, E. et PATUREL, J.-E. 1998. Activités humaines et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien. Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Variabilité des Ressources en Eau en Afrique au XX^{ème} Siècle). International Association of Hydrological Sciences, IAHS publication n° 252, p. 365-373.

CHATELAIN, C. 1996. Possibilités d'application de l'imagerie satellitaire à haute résolution pour l'étude des transformations de la végétation en Côte d'Ivoire forestière. Thèse de doctorat, Université de Genève, 206 p.

DIRECTION DE LA STATISTIQUE. 1975. Recensement Général de la Population 1975. Abidjan.

DIRECTION DE LA STATISTIQUE. 1988. Recensement Général de la Population et de l'Habitat 1988. Abidjan.

FILLERON, J.-C. 1990. Potentialités du milieu naturel, densités de population et occupation du sol dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire. in J.-F. Richard (réd.) La dégradation de paysages : actes du colloque de Dakar, Presses universitaires de Dakar, p. 253-263.

INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE. 1995. Cartes des localités des départements de Man et de Duékoué, 1 : 200 000.

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE DE CÔTE D'IVOIRE. 1973. Cartes de Man et Guiglo. 1 : 200 000.

KOUADIO, Y.B. 1998. Paysages et utilisation du sol dans un front pionnier de savanes sub-soudanaises : dynamique des milieux naturels en pays malinké de Dianra (nord-ouest Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Cocody-Abidjan, 212 p.

PUECH, C. 1998. Décomposition du pixel et changement d'échelle. Réflexions autour de la structure forestière. Photo-interprétation, n° 1998-1, vol. 36, numéro spécial Séminaire télédétection et végétation, p. 20-24.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 171-176

18

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

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

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

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

Résumé

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

1. Introduction

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

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

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

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

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

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

2.1. Approche utilisant un seul paramètre géophysique (NDVI)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.2. Approche utilisant la combinaison de deux paramètres géophysiques

L'approche développée se compose de trois étapes :
- combinaison des paramètres AL et TS,
- combinaison des paramètres NDVI et TS,
- élaboration de la carte de désertification par la synthèse des résultats des deux premières étapes.

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

Pour compléter les informations sur la caractérisation des différents états de surface, on a utilisé simultanément l'évolution conjointe de l'albédo (AL) et de la température de surface (TS). Pour cela, on s'est servi d'un histogramme bidimensionnel de l'image à deux canaux (AL et TS) qui nous a fourni une représentation imagée pour chaque état de surface. L'histogramme bidimensionnel (figure 2), dans la majorité des images étudiées, fait ressortir une forme géométrique en cloche que l'on peut segmenter en trois parties :
- les zones stables à « logique hydrique », couvertes de végétation et à alimentation en eau normale;
- les zones désertiques à « logique radiative », dénudées et à alimentation en eau limitée;
- « zones intermédiaires », montrant le passage entre les deux logiques, définit les zones à risque modéré de désertification.

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

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

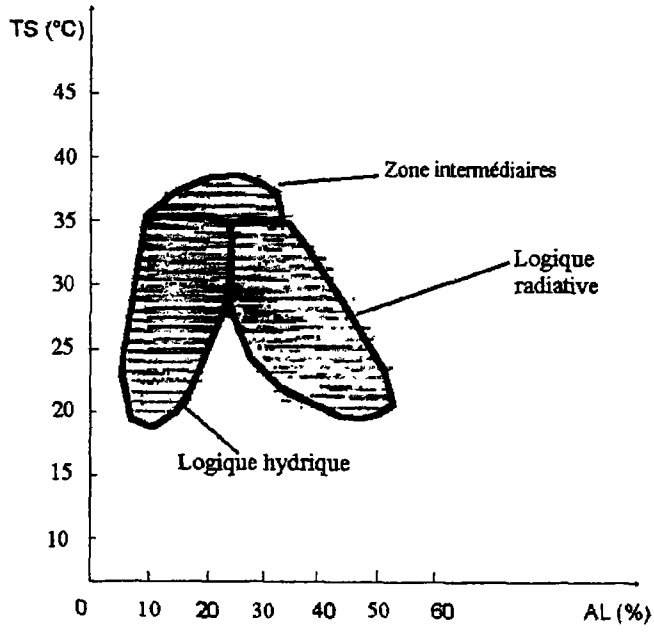


Figure 2. Histogramme de l'albédo et de la température de surface de l'image du 03-03-1987.

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

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

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

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

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

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

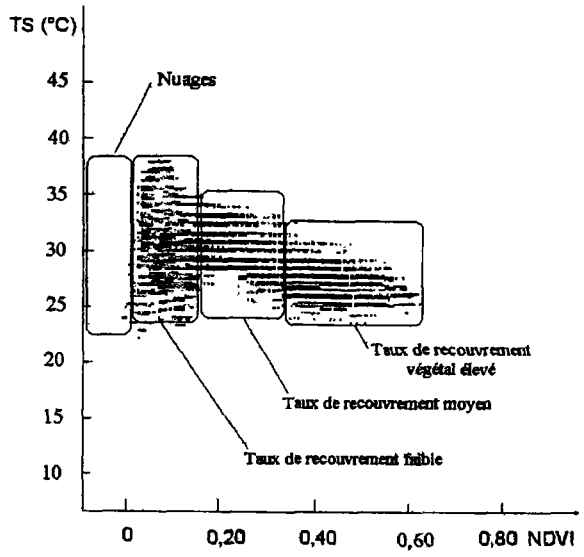


Figure 4. Histogramme de l'indice de végétation et de la température de surface de l'image du 03-03-1987 .

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

3. Élaboration de la carte de désertification

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

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

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

4. Conclusion

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

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

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

6. Références

AÏT BELAÏD, M., LEMSANNI, A. et SMIEJ, M.F. 1998. Le suivi de la désertification au Maroc : une approche globale. Photo-interprétation. (Sous presse).

BECKER, F., BOLLE, H. J. and ROWNTREE, P.R. 1988. The International Satellite Land-Surface Climatology Project (ISLSCP). United Nations Environnemental Programme ISLSCP Secretariate, Berlin, 92 p.

MULLINS, D.W. and CIHLAR, J. 1993 . Monitoring rangeland change using Landsat MSS data. Remote Sensing of Environment, n° 1993-3, p. 1968-1971.

SEGUIN, B. 1987. Application de la télédétection dans l'infrarouge thermique à la détermination de l'évaporation et de l'humidité du sol. Étude de la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique (DGRST), Station de bioclimatologie de l'INRA, Avignon, 10 p.

SMIEJ. M.F. et MERDAS, M. 1999. Application de la télédétection aux statistiques agricoles. Projet AGRIMA, Action 1, Zonage et suivi des principales cultures à partir des données AVHRR, Rapport final, 36 p.

WARREN, S.T. and BAGLY, C.F. 1992 . Spot imagery and GIS in support of Military Land Management. Geocarto International, n° 1992-1, p. 35-43.

WENDLER, G. and EATON, F. 1983. On the desertification of the Sahel zone. Part 1 : Ground observations, Climate Change, n° 1983-5, p. 365-380.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 177-185

19

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

HUBERT N'DJAFA OUAGA [1] et MARIE-FRANÇOISE COUREL [2]

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

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

Résumé

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

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

1. Introduction

La sous-préfecture de Mandélia (2584 km^2) est située à la sortie sud de la capitale tchadienne entre les fleuves Chari et Logone dans la zone sahélo-soudanienne et reçoit à peine 450 mm de pluie par an (figure 1). En 1967, un décret présidentiel érige près des deux tiers de ce territoire en réserve de faune dite de Mandélia avec l'intention de créer une ceinture faunique autour de la capitale (N'Djaména). Il était question de tempérer le mouvement des animaux sauvages vers la réserve camerounaise de Waza.

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

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

2. Matériel et méthode

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

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

Figure 1. Localisation de la zone d'étude

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

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

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

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

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

3. Résultats

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

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

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

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

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

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

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

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

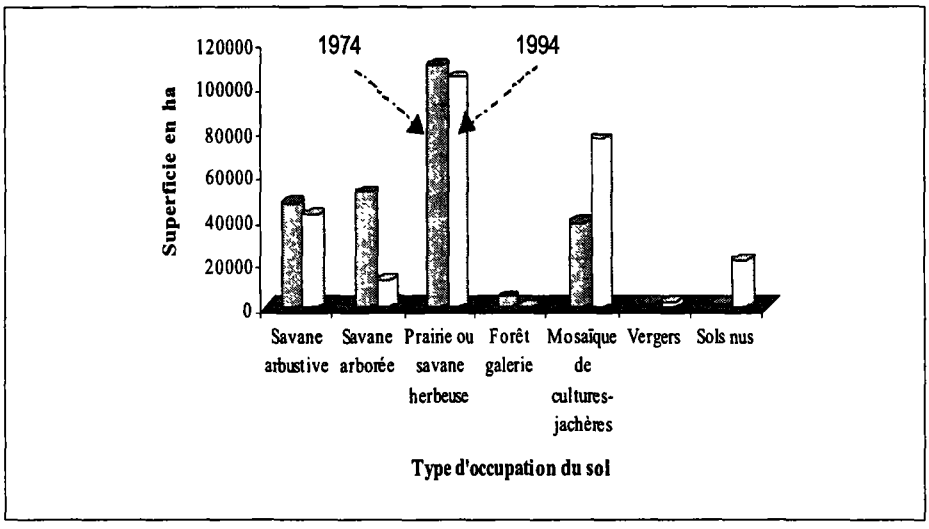


Figure 2. Occupation du sol dans la sous préfecture de Mandélia par interprétation de PVA de 1974 et d'images HRV du 29-11-1994 et du 30-11-1994. Figure établie d'après la photo-interprétation des PVA de 1974 et des images HRV (XS) du 29-11-1994 et du 30-11-1994.

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

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

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

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

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

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

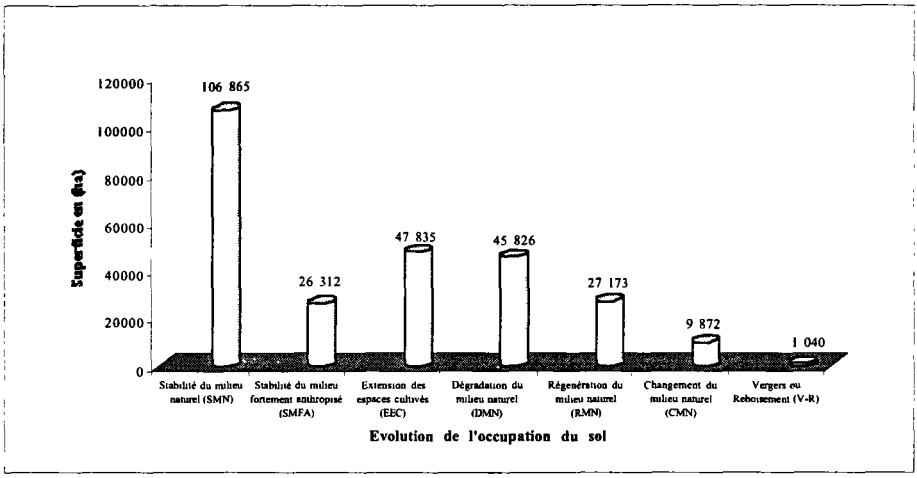


Figure 4. Évolution de l'occupation du sol dans la sous préfecture de Mandélia entre 1974 et 1994. Figure établie par croisement des cartes de l'occupation du sol de 1974 et 1994

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

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

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

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

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

5. Conclusion

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

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

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

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

Quels enseignements tirer de cette esquisse d'analyse :

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

6. Remerciements

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

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

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

7. Références

COUREL, M.-F. 1985. Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. IBM France, Paris, 440 p.

COUREL M.-F. 1985. L'adaptation de la végétation sahélienne à la sécheresse récente : la contraction des ligneux. Photo-interprétation, n° 1985-1-2, p. 9-15.

N'DJAFA OUAGA. H. 1996. Étude spatio-temporelle de l'occupation du sol (1974-1994) de la région de Mandélia dans le canton Madiago (TCHAD). Mémoire de DEA, Université de Paris, 75 p.

N'DJAFA OUAGA. H. 1998. Appréhension des stratégies paysannes dans la mutation des espace ruraux. Cas du canton Madiago (Chari-Baguirmi), Rapport du 1er stage de thèse de doctorat, UMR/PRODIG-CNRS, Universités de Paris I, 14 p. + annexes.

N'DJAFA OUAGA. H. 1999. Appréhension des stratégies paysannes et mutations des espace ruraux. Cas du canton Madiago dans la zone de concentration du 6è F.E.D. Rapport du 2ème stage de thèse de doctorat, UMR/PRODIG-CNRS, Université de Paris I, France, 13 p. + annexes.

IGN. 1958. Carte topographique de Mogroum à l'échelle du 1 : 200 000e, feuille NC-33-XXII, Paris.

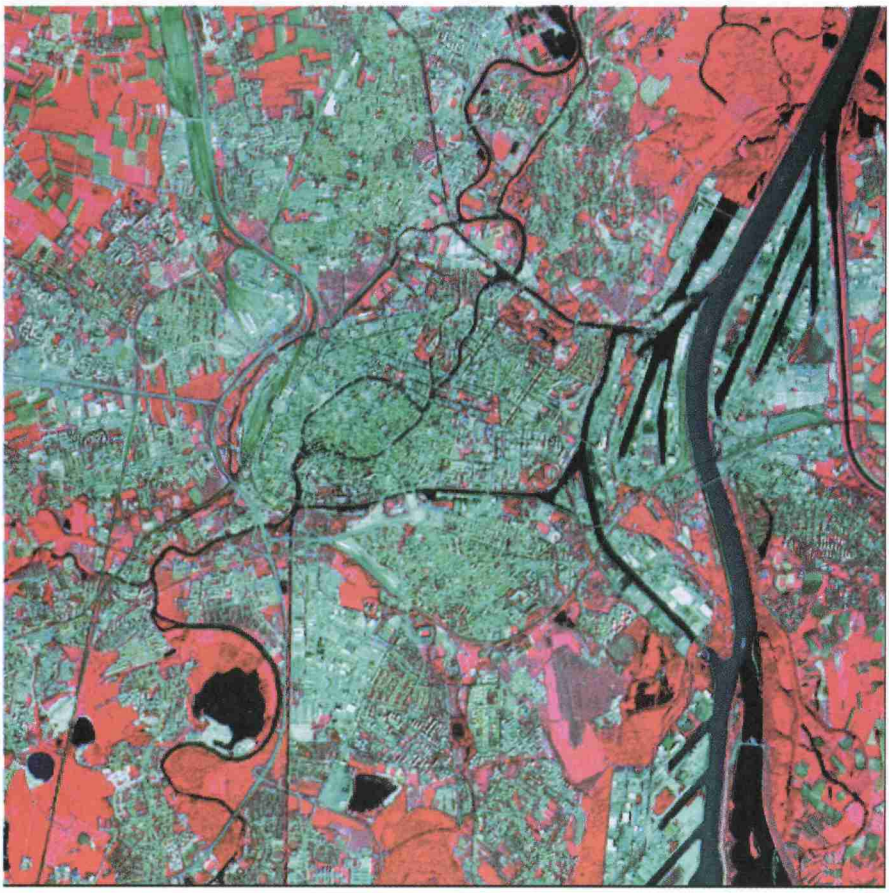


Figure 5-1. Fusion d'images HRV (XS) de juillet 1992 et P de mars 1992 de SPOT sur le centre de l'agglomération de Strasbourg par la méthode de fusion HPF.

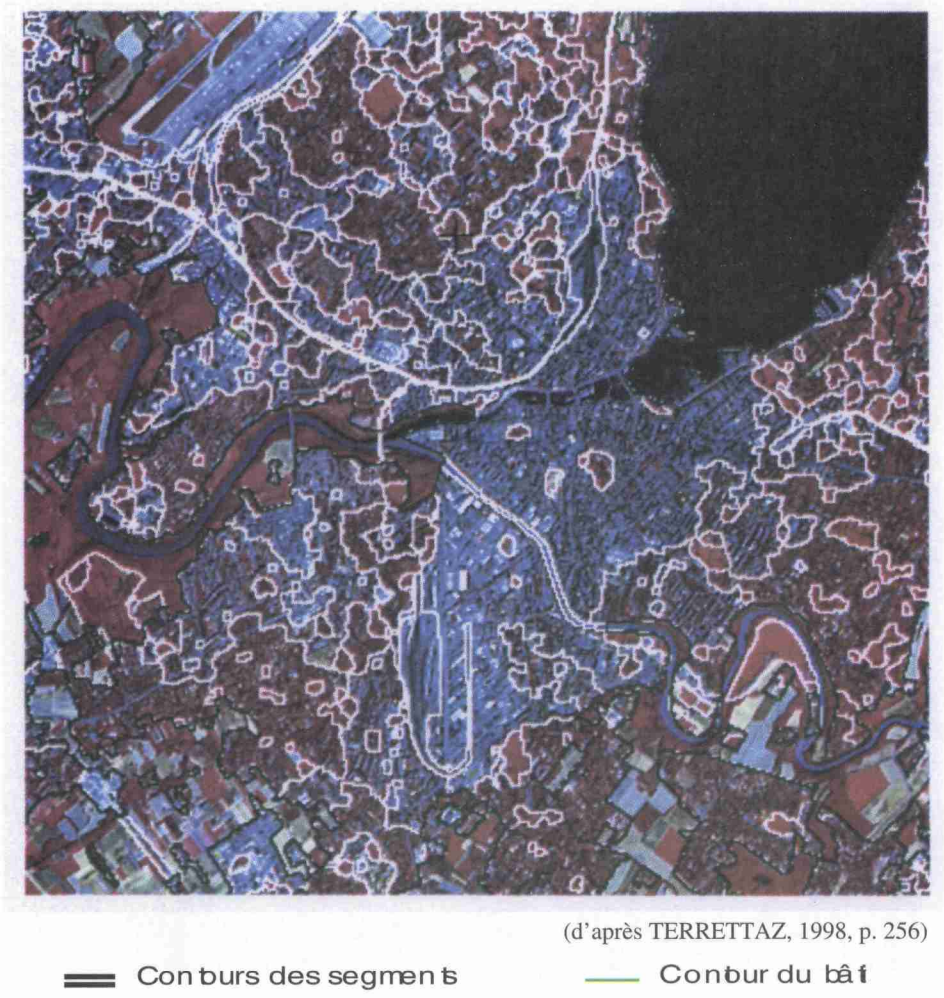


Figure 5-3. Segmentation de l'enveloppe bâtie de l'agglomération de Genève à l'aide de la méthode « PVI-MM-VOI ». Les limites ont été superposées à la composition colorée issue de la fusion des bandes HRV (XS et P) de SPOT par la méthode HPF.

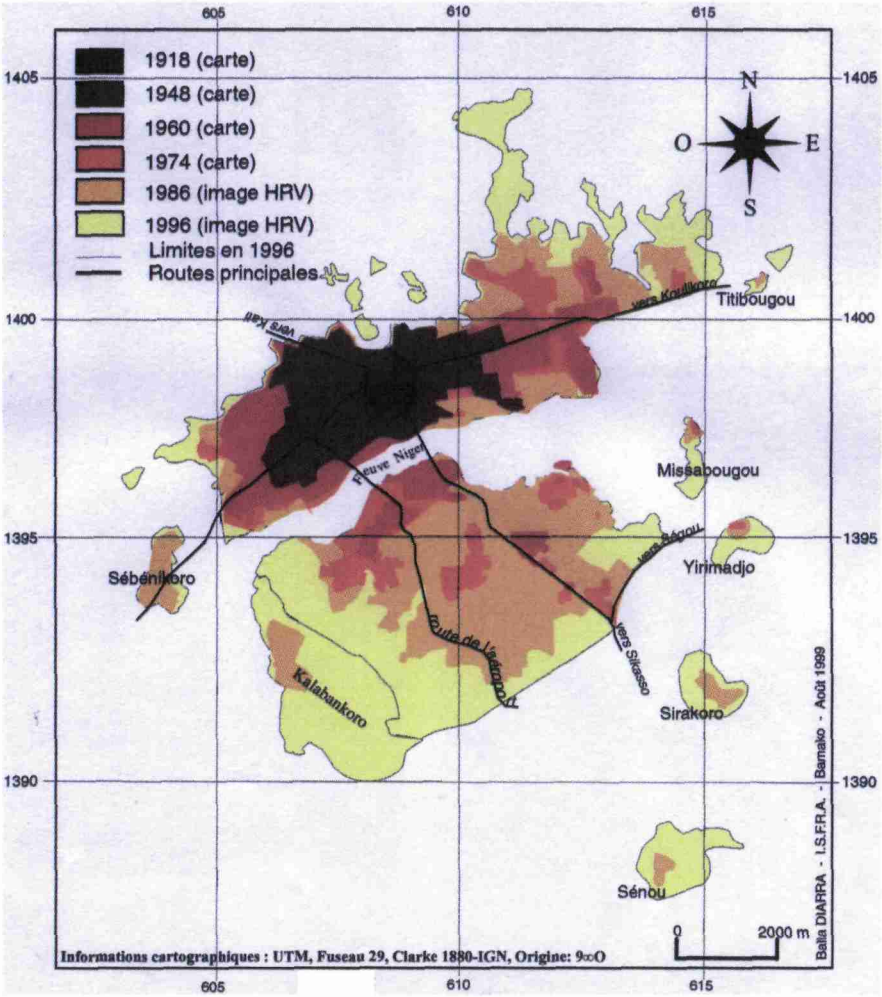


Figure 6-2. Carte résumant l'évolution de Bamako et des villages étudiés, de 1918 à 1996

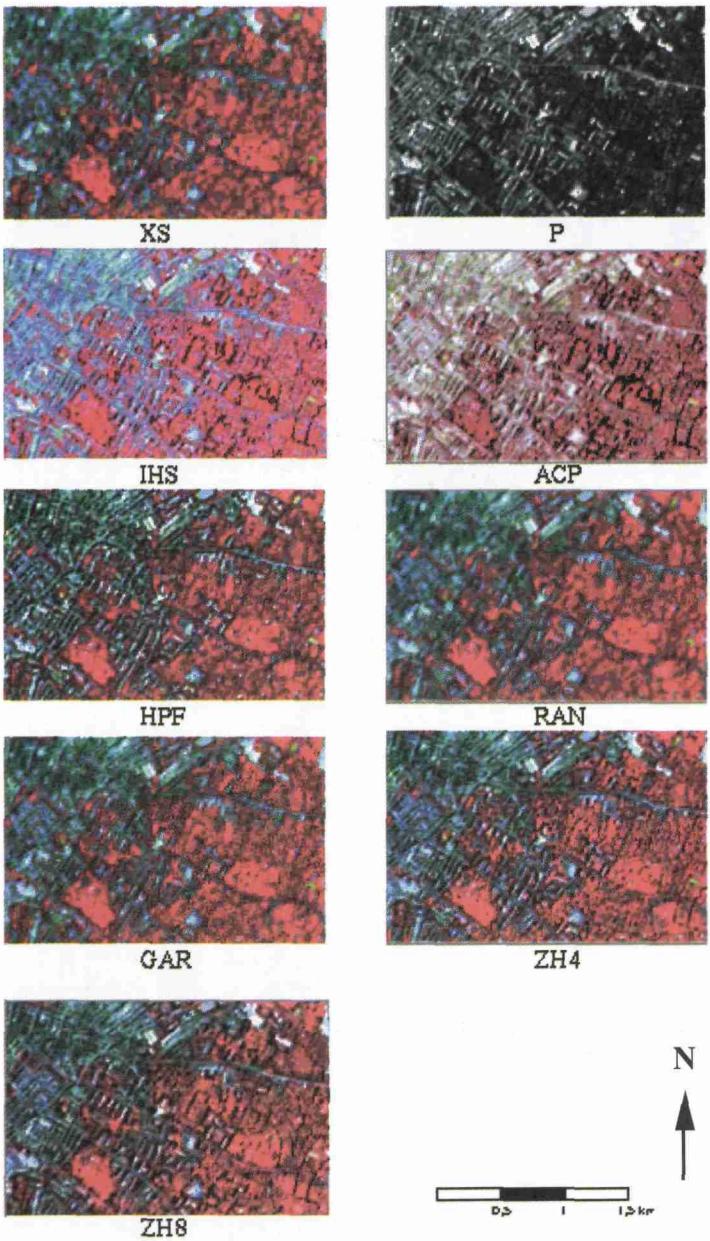
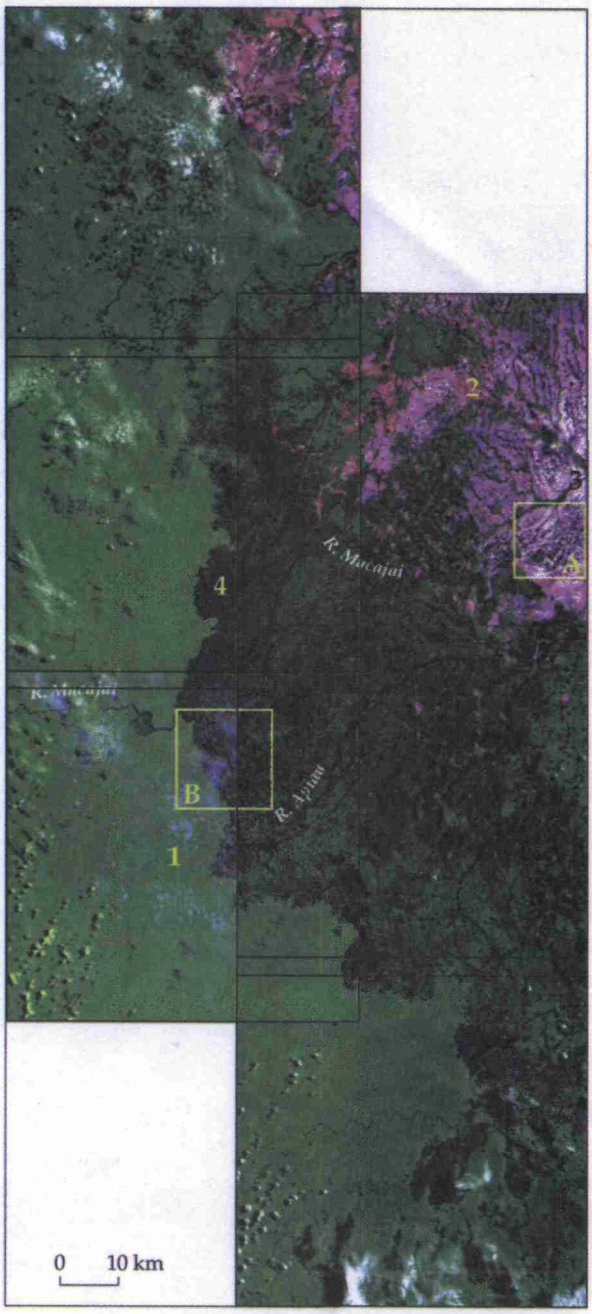


Figure 9-6. Compositions colorées des imagettes de fusion obtenues à partir des différentes méthodes. Sur cette figure, XS désigne la composition colorée des bandes originales; P l'image panchromatique; IHS, ACP et HPF compositions colorées obtenues respectivement à partir des méthodes de l'IHS, de l'ACP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

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

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



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

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

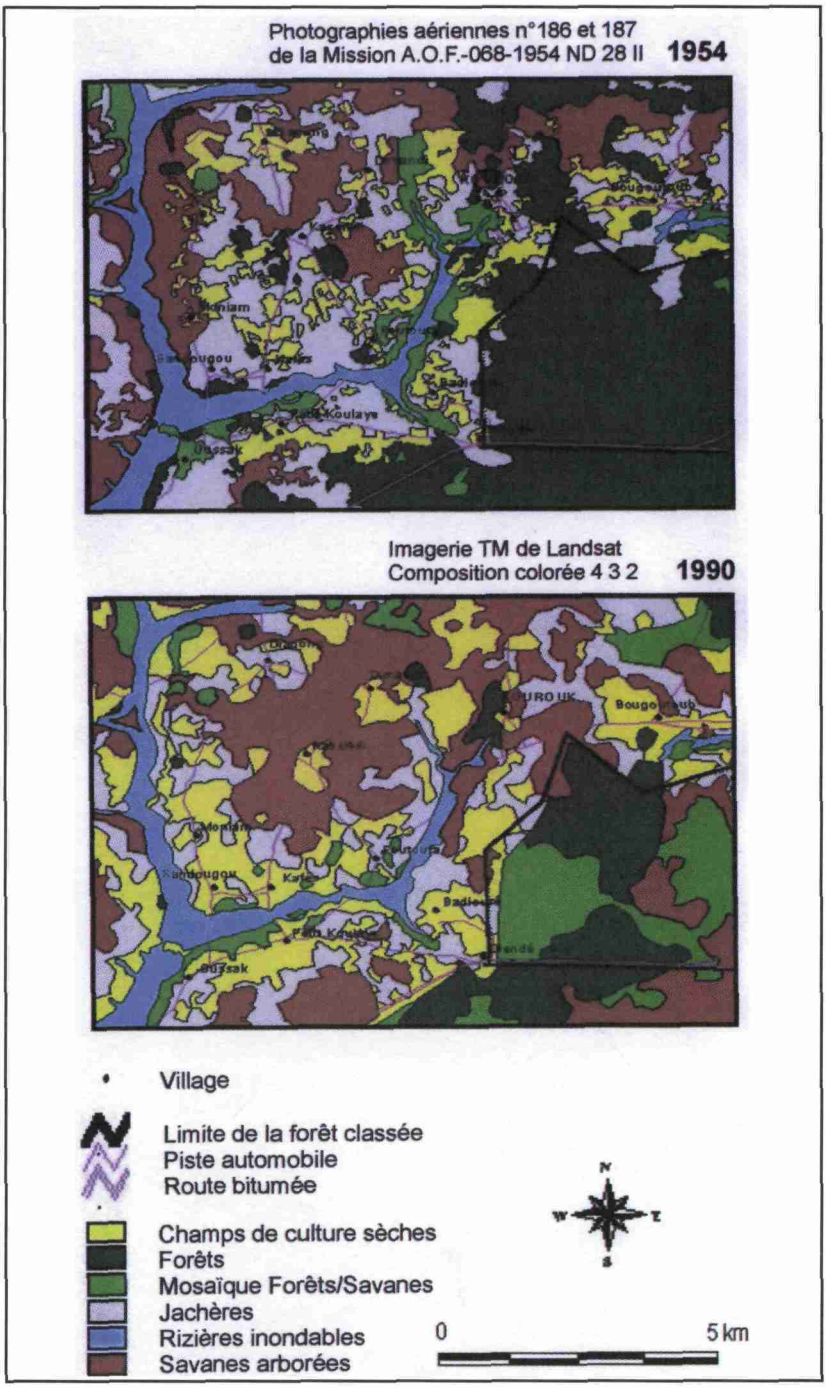


Figure 15-2. Évolution de l'occupation du sol entre 1954 et 1990 dans le terroir de Kourouk et ses environs.

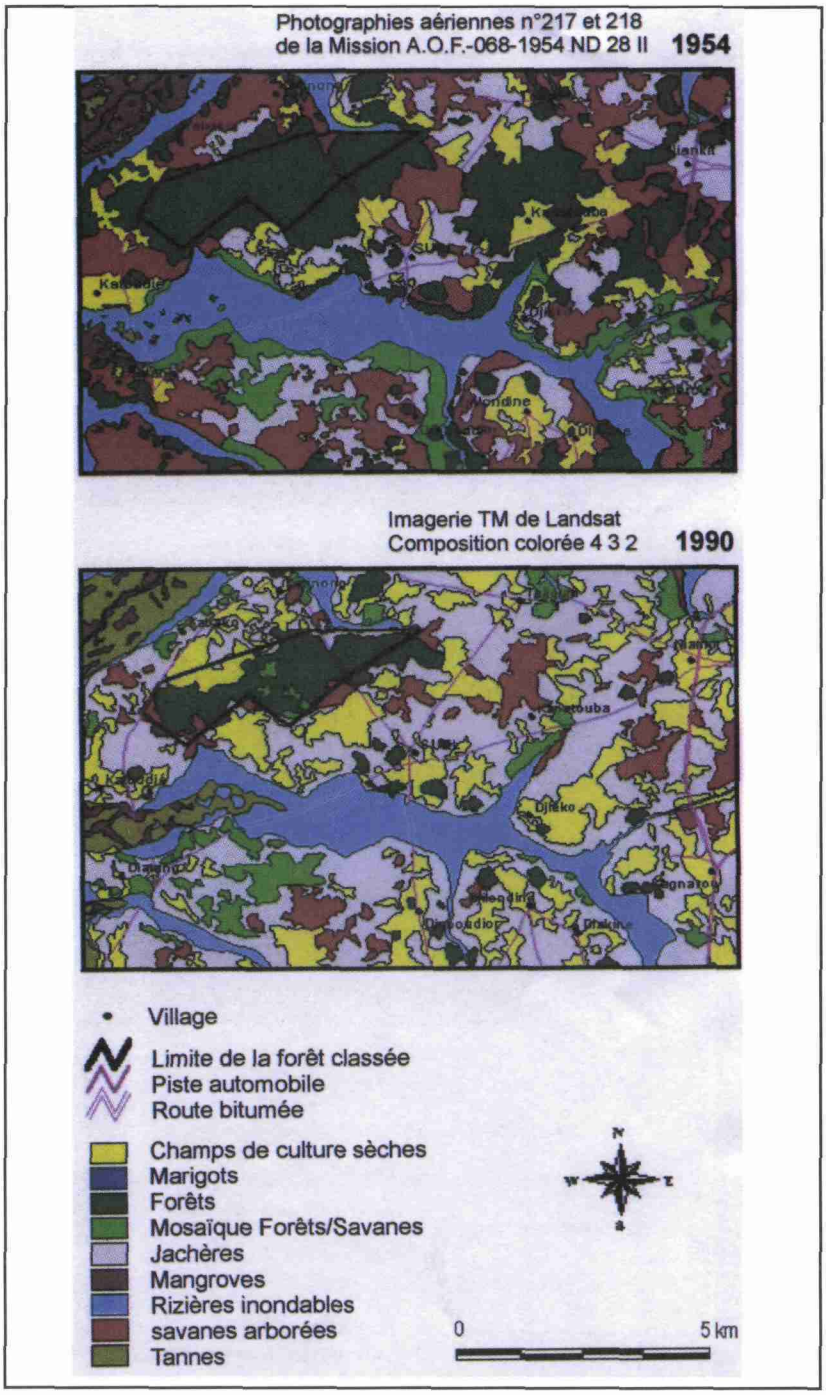


Figure 15-3. Évolution de l'occupation du sol entre 1954 et 1990 dans le terroir de Suel et ses environs.

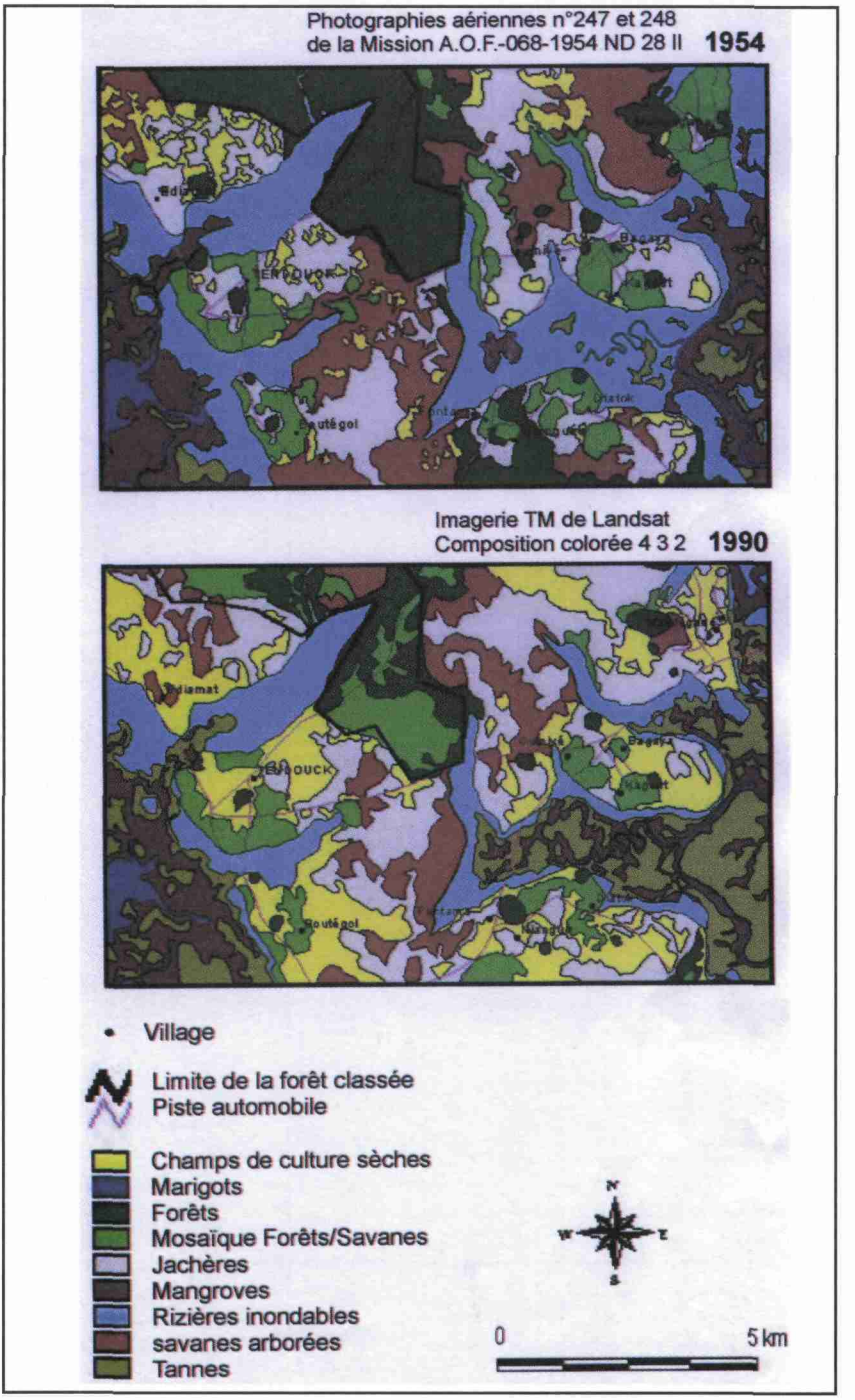


Figure 15-4. Évolution de l'occupation du sol entre 1954 et 1990 dans le terroir de Tendouck et ses environs.

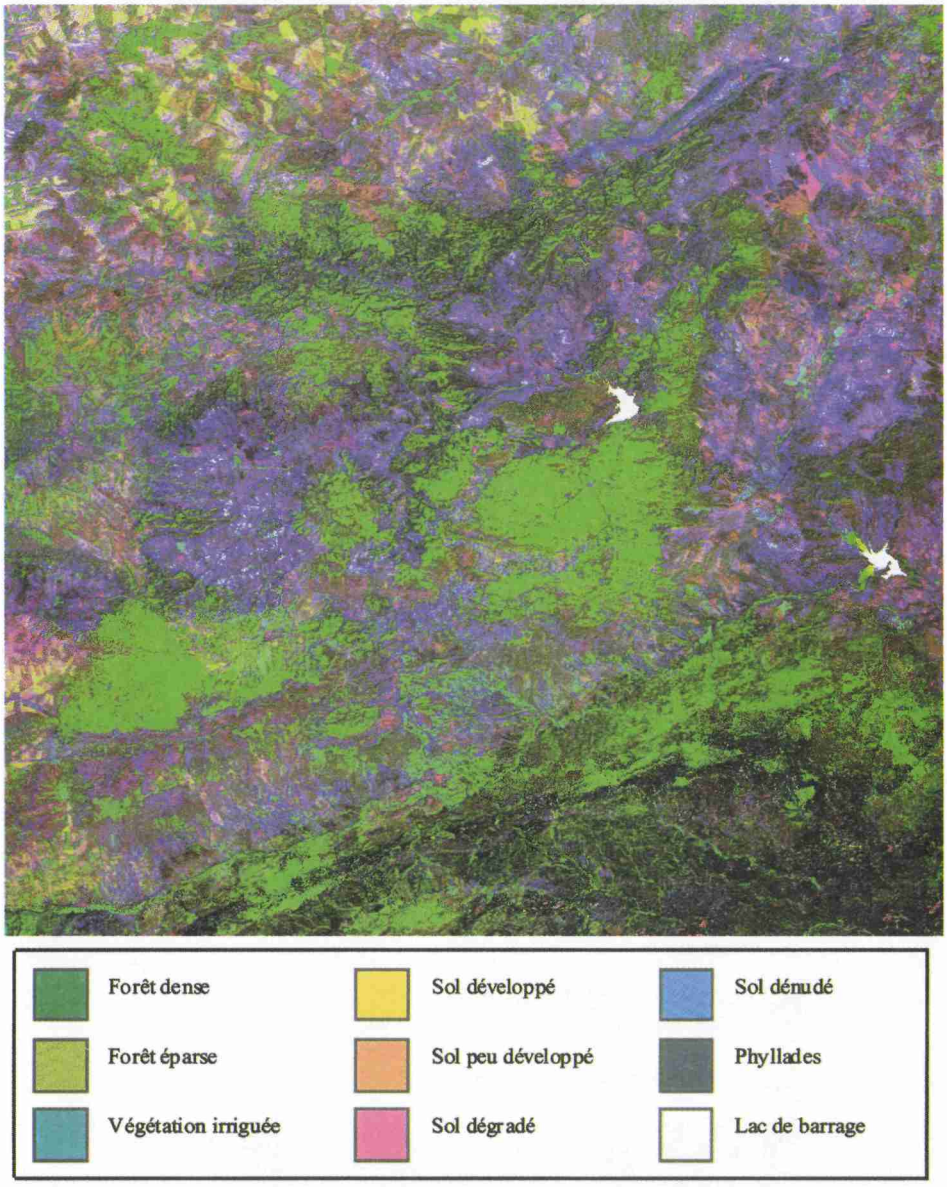


Figure 16-6. Image fausse couleur représentant les conditions de surface de la zone d'étude, produite par codage de la teinte dans le rouge, la saturation dans le vert et l'intensité dans le bleu. Cas des bandes TM7, TM4 et TM1. Image de 45 km par 45 km.

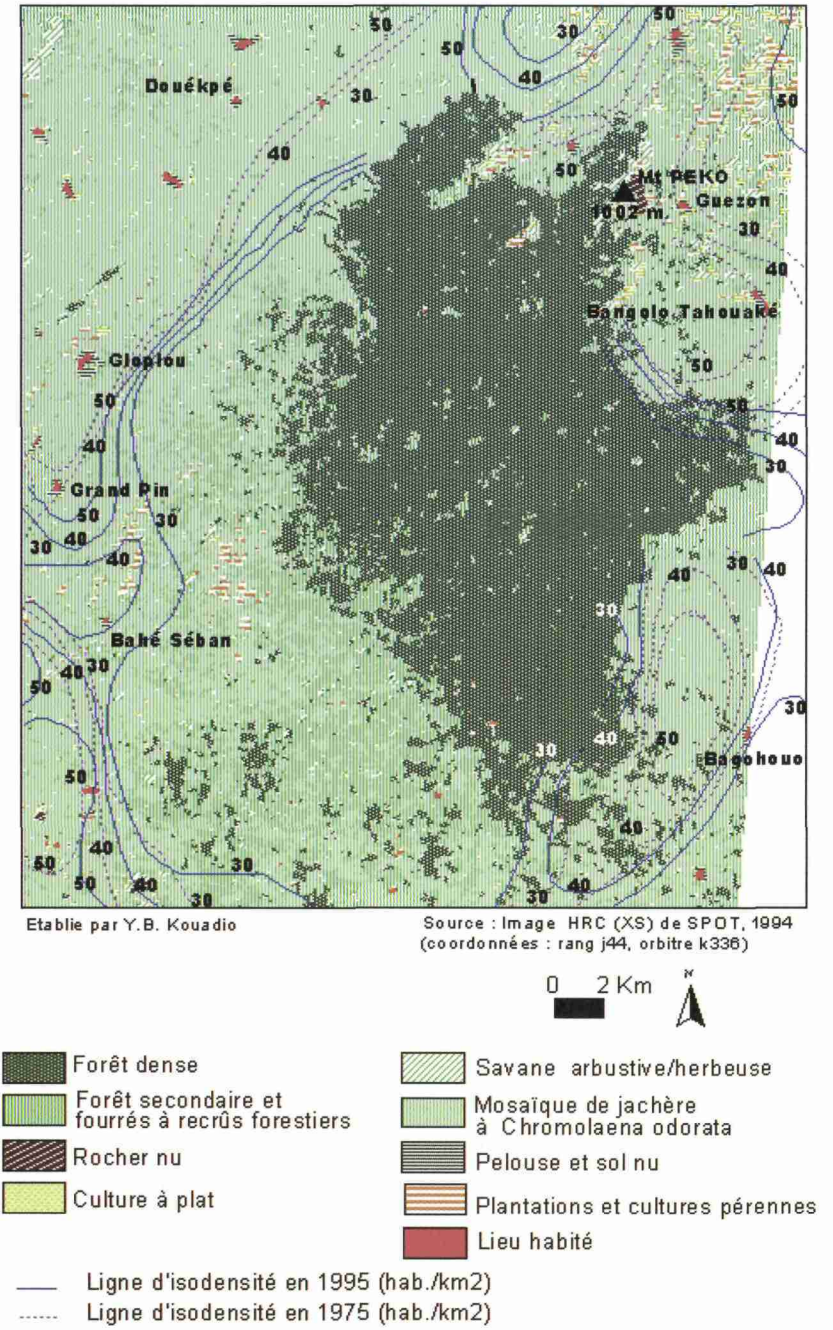


Figure 17-5. Densités de population et état de l'occupation du sol en 1995.

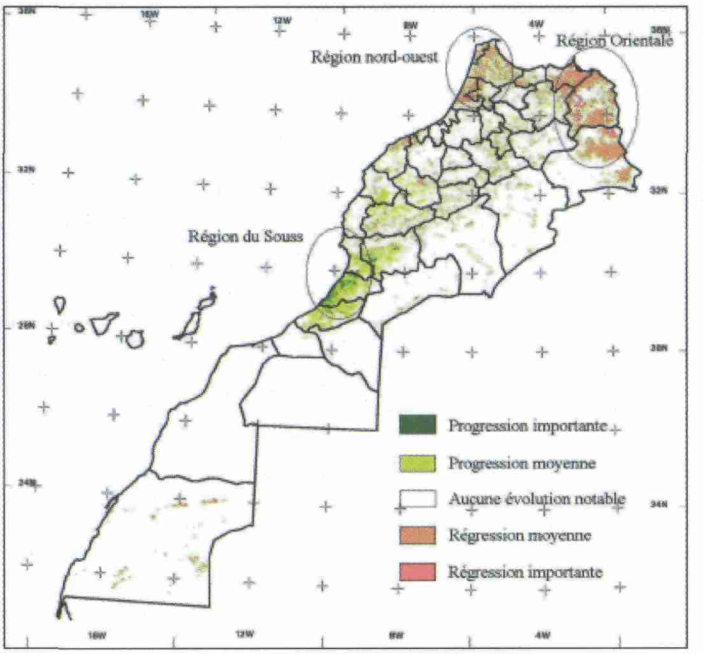


Figure 18-1. Comparaison des synthèses annuelles de NDVI entre les années 1994 et 1996.

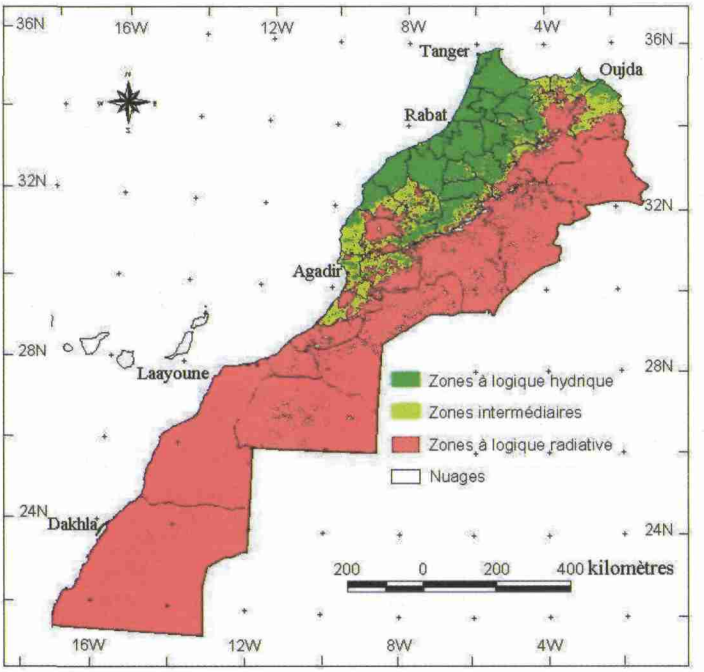


Figure 18-3. Résultat de l'approche basée sur le calcul de l'albédo et de la température de surface à partir de l'image du 03-03-1987 : caractérisation de l'état hydrique.

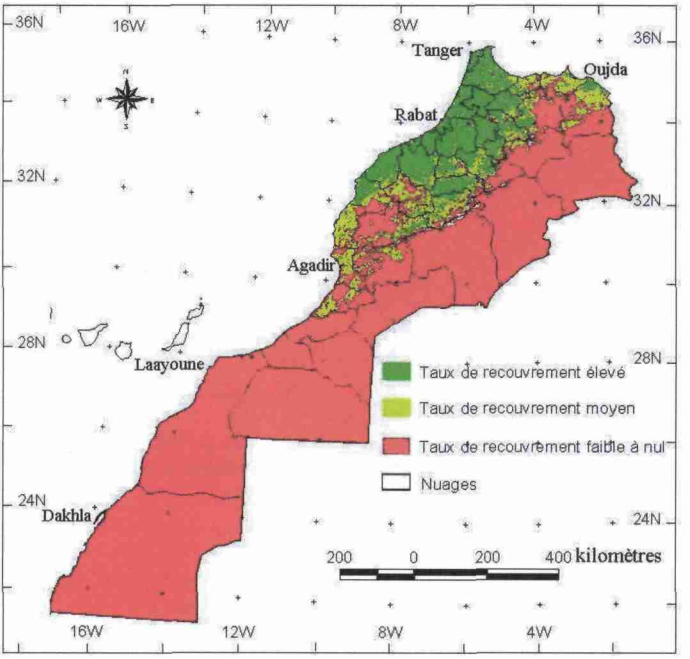


Figure 18-5. Résultat de l'approche basée sur le calcul de l'indice de végétation et de la température de surface à partir de l'image du 03-03-1987 : caractérisation de l'état de la végétation.

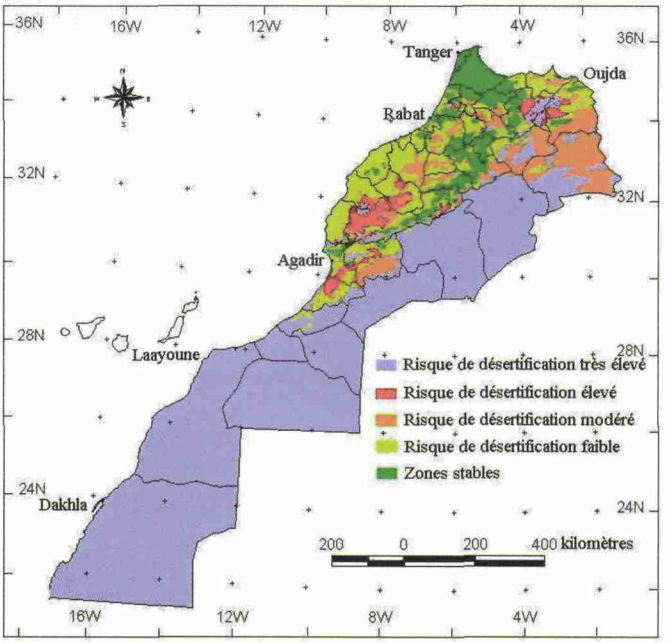


Figure 18-6. Carte synthétique du risque de désertification au Maroc.

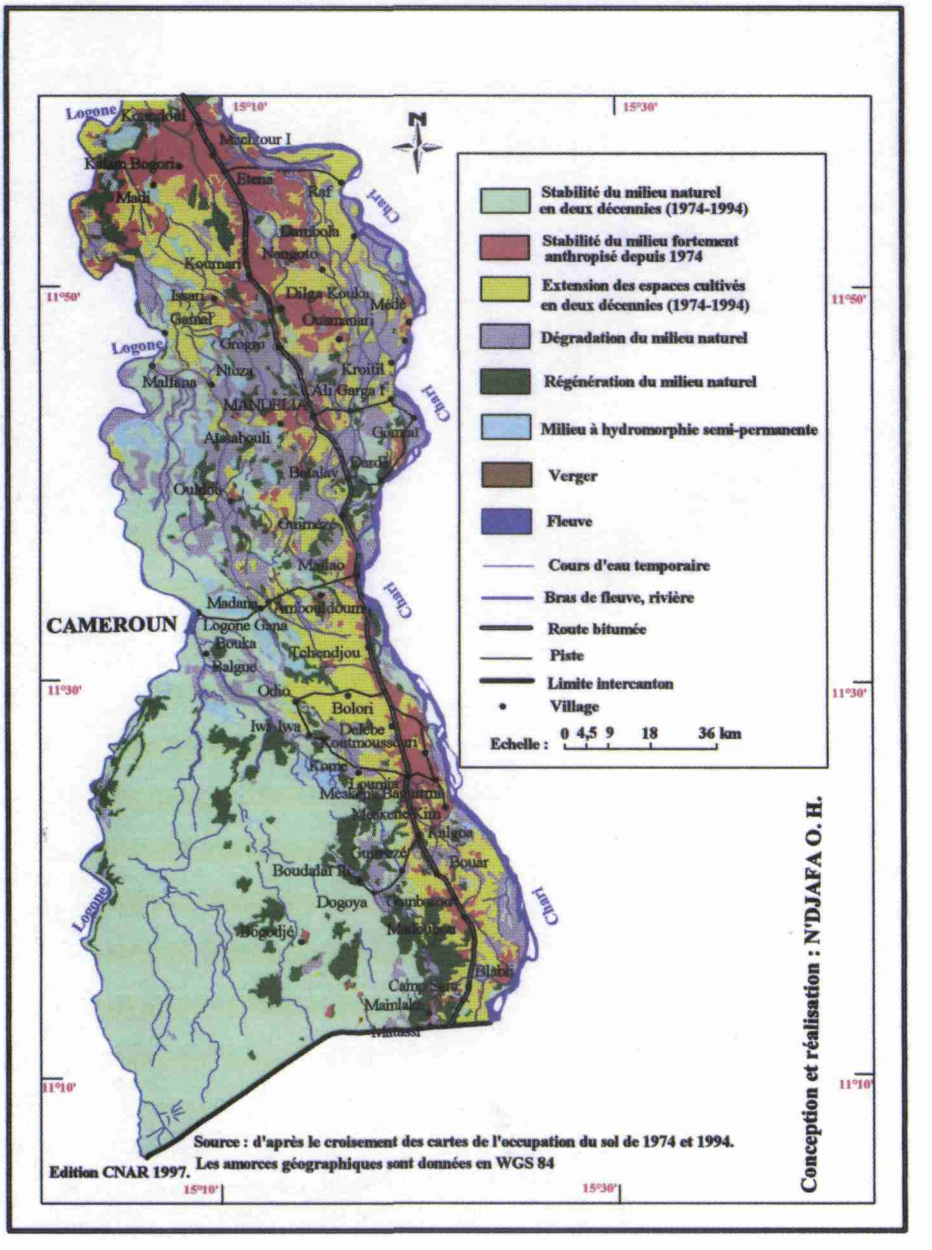


Figure 19- 3. Évolution de l'occupation du sol dans la sous préfecture de Mandélia entre 1974 et 1994.

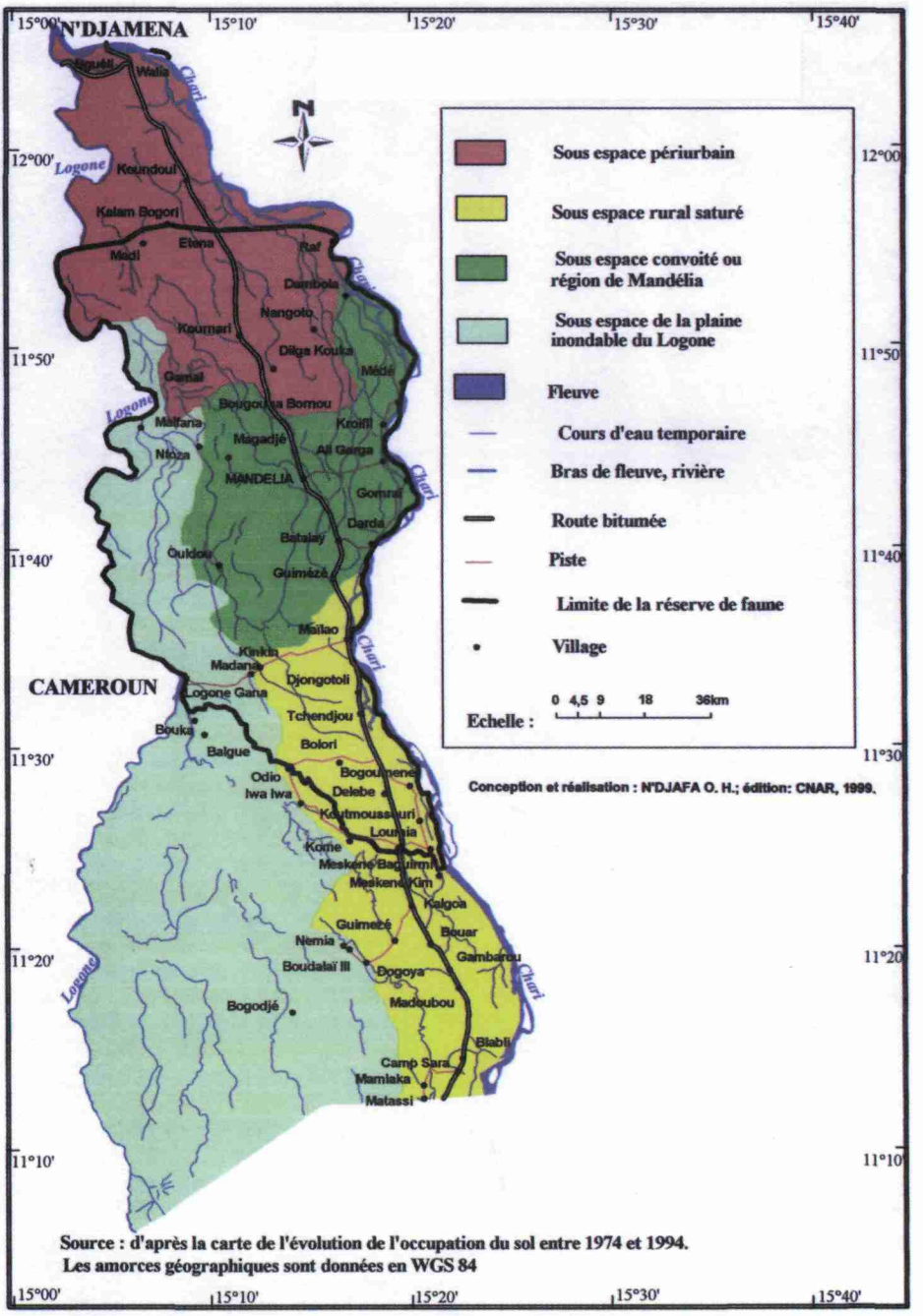


Figure 19- 5. Segmentation de la sous préfecture de Mandélia

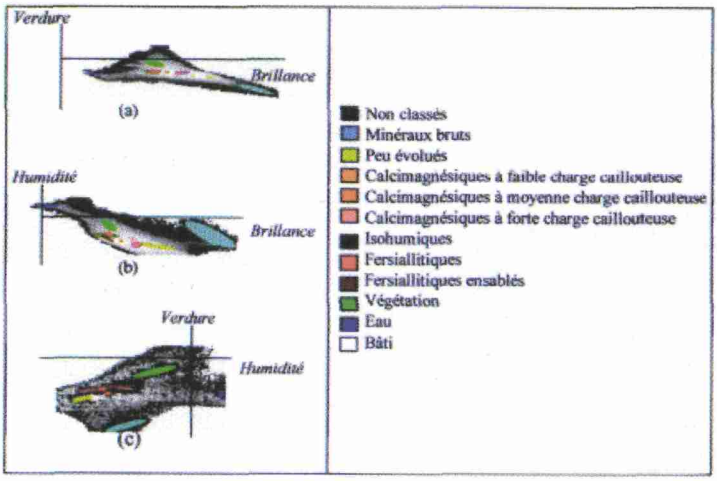


Figure 21-3. Projection des différentes classes de sol sur les plans de la végétation (a), des sols (b) et de la transition (c), issues de l'application de la transformation du chapeau haut-de-forme sur la zone étudiée.

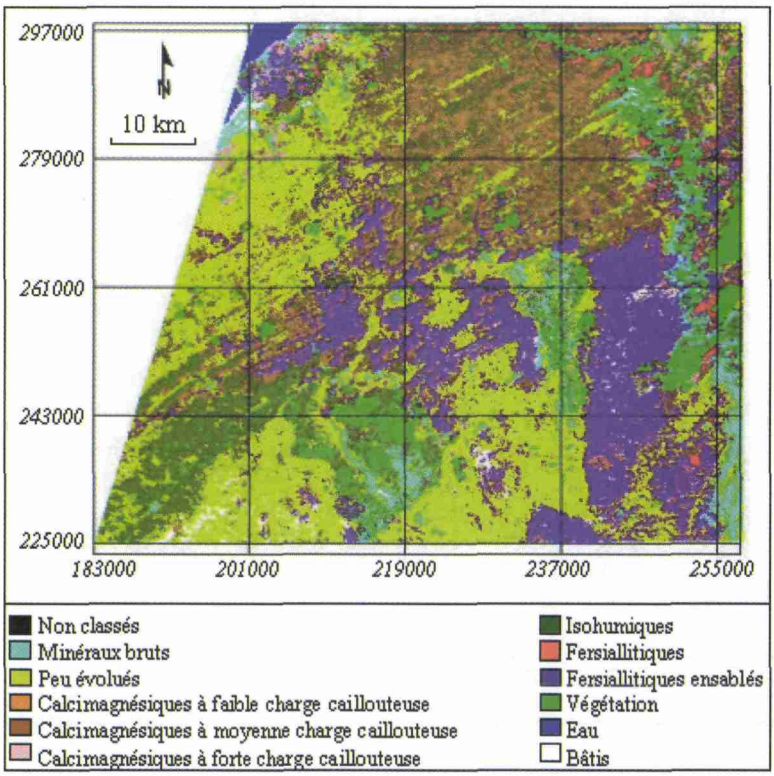


Figure 21-4. Carte des sols obtenue par classification dirigée de l'image TM de la zone d'étude.

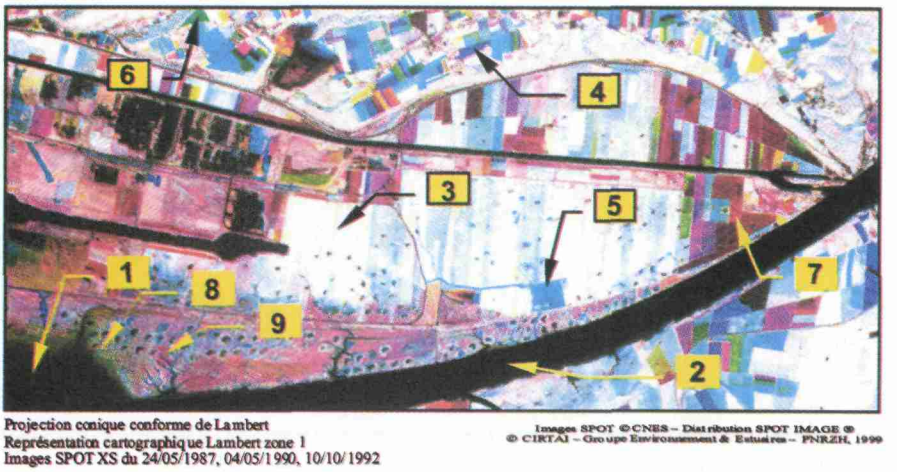


Figure 22-2. Appréhension de la cinématique paysagère à l'aide du NDVI : 1) vase nue; 2) eau; 3) formation végétale qui n'a pas évolué; 4) espace encore végétalisé en mai 1987 mais qui a été transformé en surface artificialisée dès 1990; 5) secteur dont la minéralisation est postérieure à mai 1990; 6)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

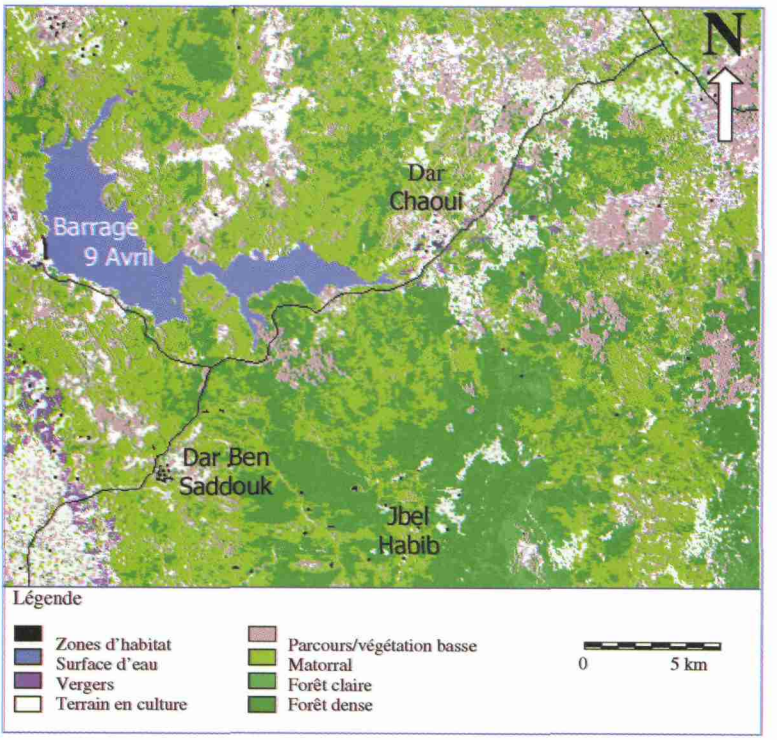


Figure 23-4. Carte de l'occupation du sol à partir de l'image HRV du 28-04-1998

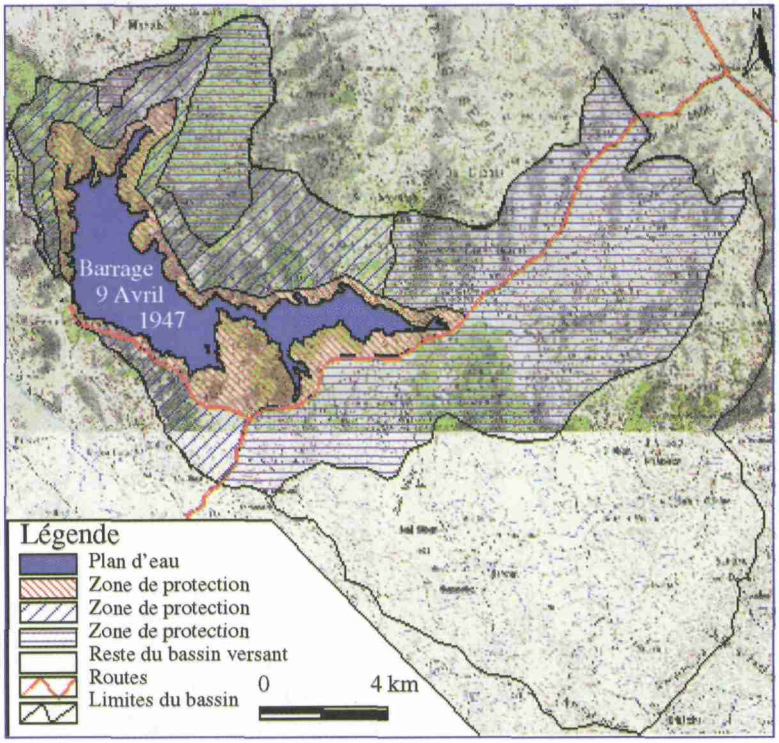


Figure 23-5. Carte de la délimitation des zones de protection des ressources en eau

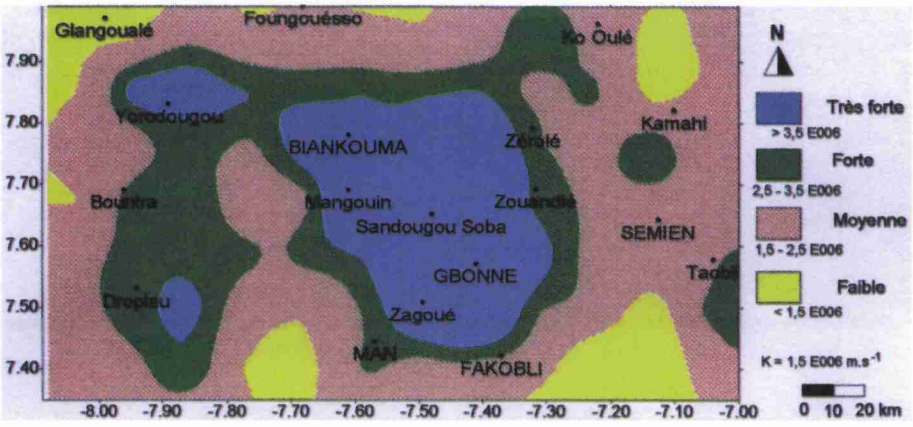


Figure 25-3. Carte de la perméabilité induite moyenne de la région semi-montagneuse de Man-Danané

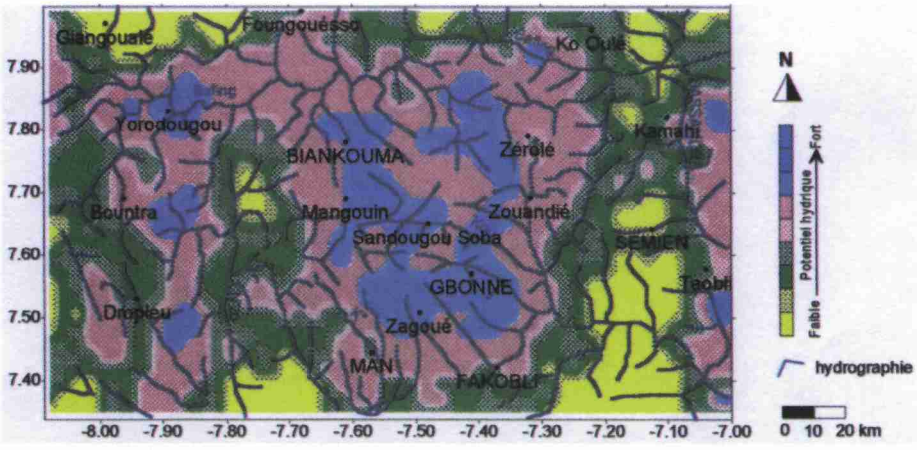


Figure 25-4. Relation de type alimentation-drainage entre les couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines et les principaux cours d'eau de la région semi montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire.

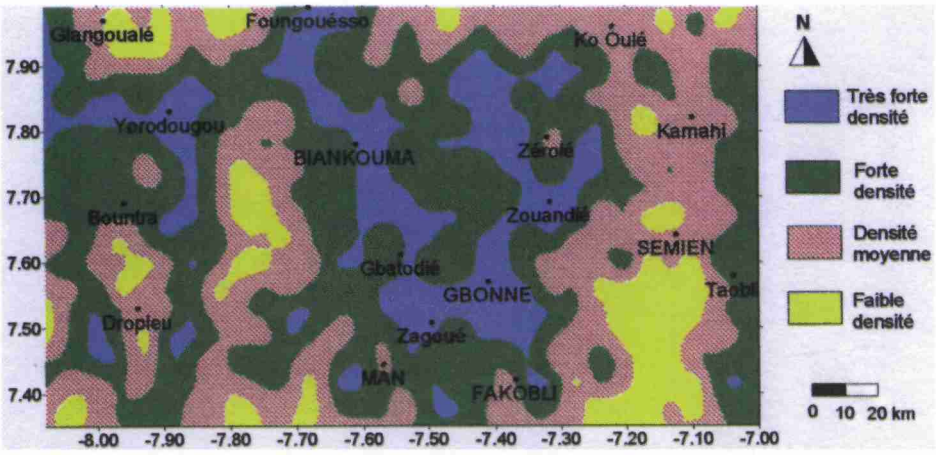


Figure 26-6 : Carte des densités définissant les domaines structuraux de la région semi-montagneuse de Man-Danané (coordonnées : en degré décimal)

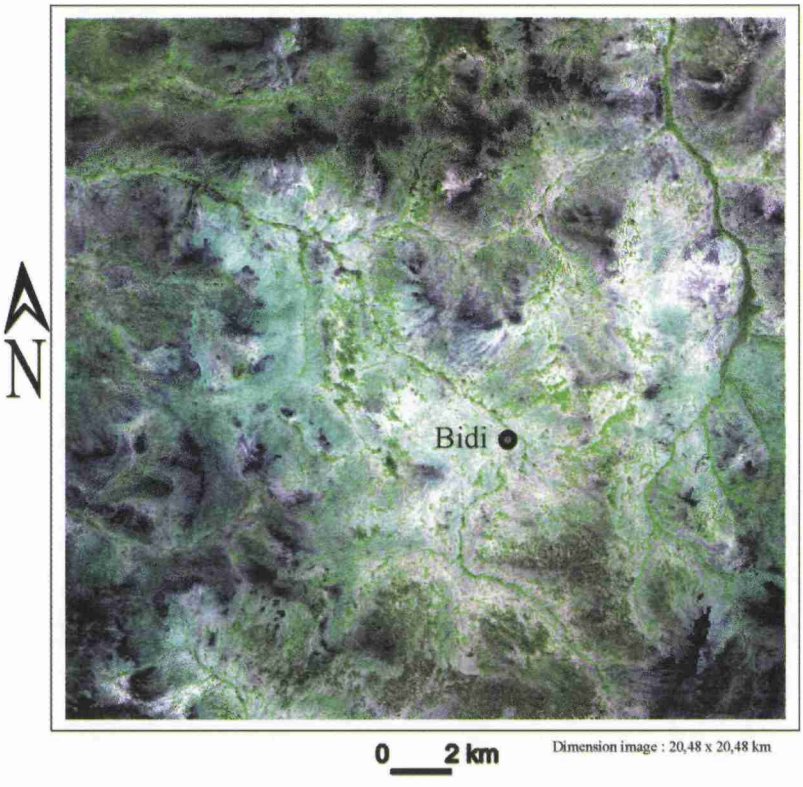


Figure 27-3. Image satellitaire HRV de SPOT (scène 051/322, juillet 1988): composition colorée RGB-132, étalement linéaire de contraste

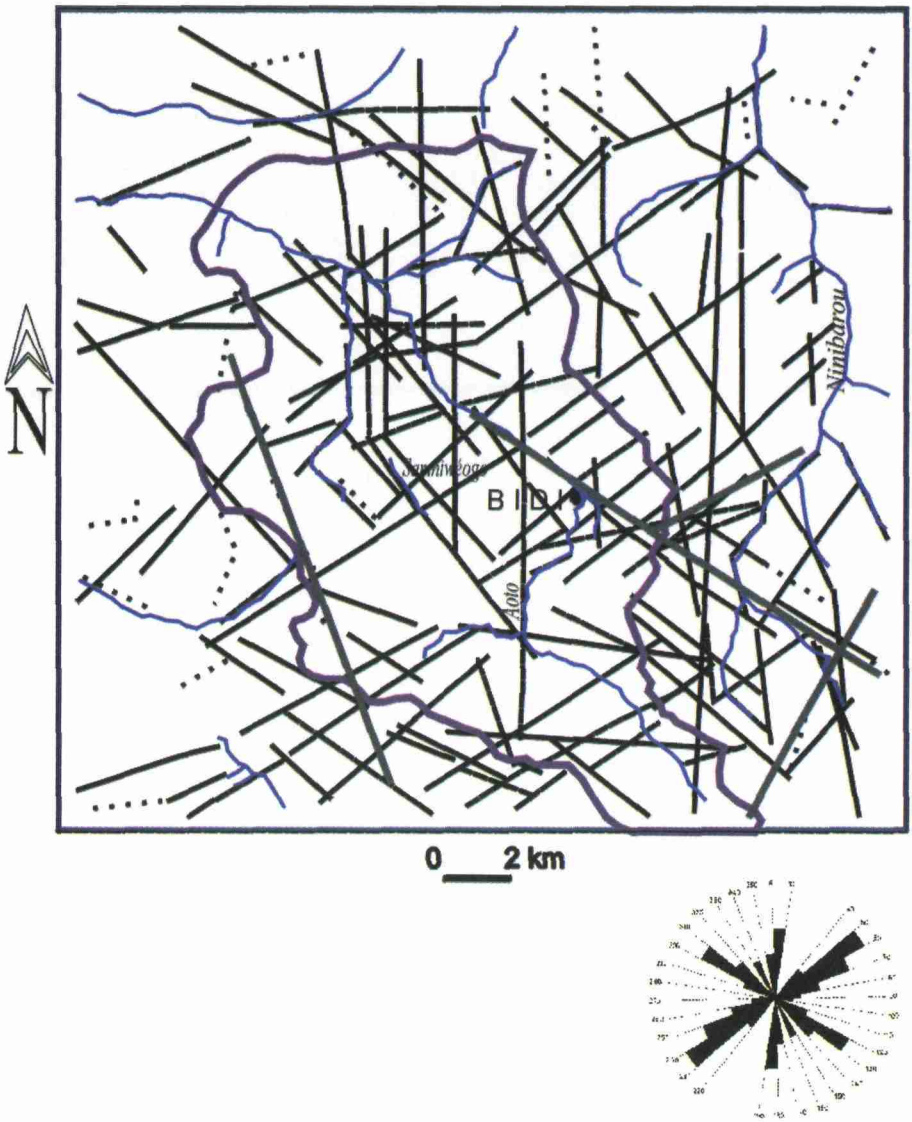


Figure 27-4. Carte linéamentaire de l'image HRV de SPOT (scène 051/322, juillet 1988) Légende : tiretés = type A (alignement de végétation); traits pleins = type B (contraste de tonalité et de texture); pointillés = type C (corniche de cuirasse latéritique); trait épais continu = limite du bassin de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

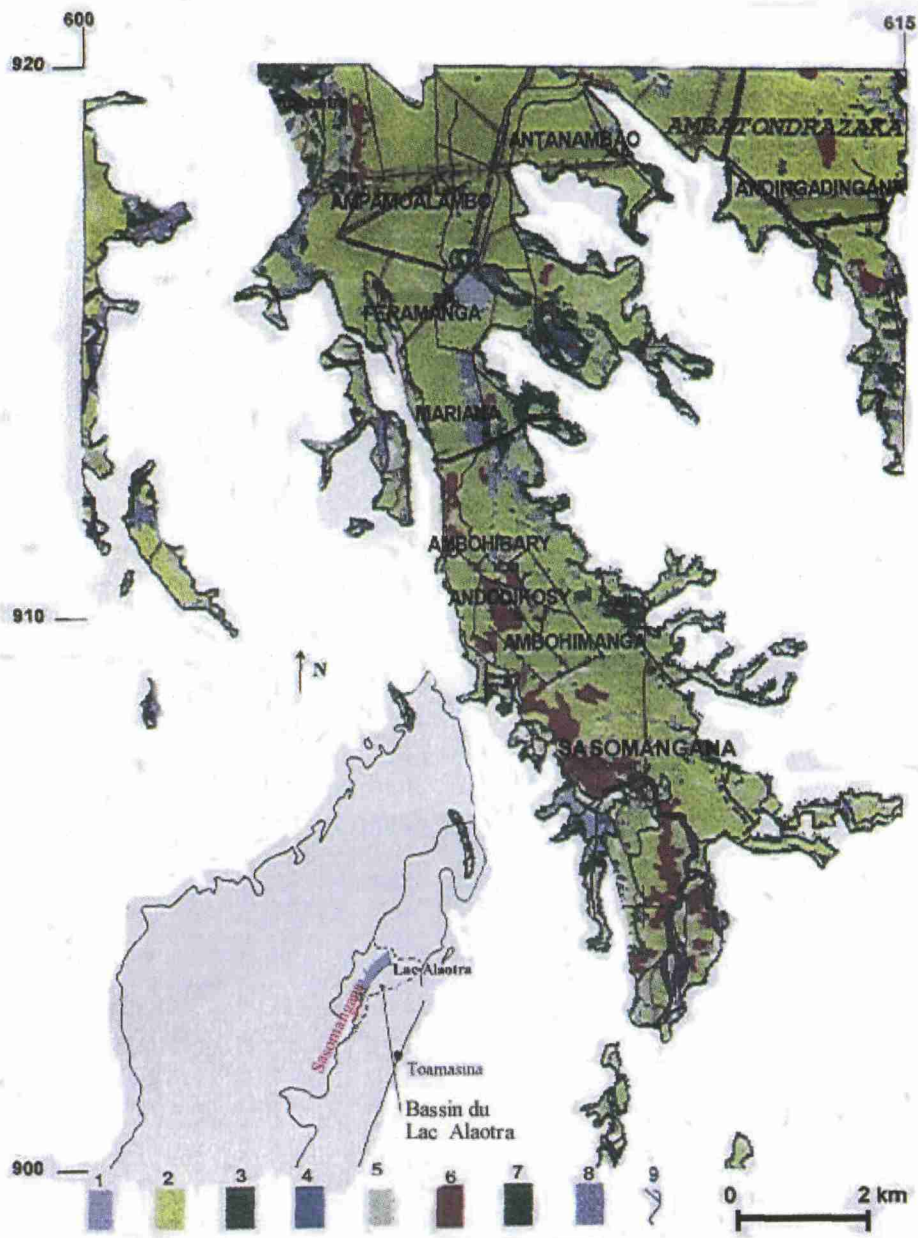


Figure 28-2. Carte de l'occupation du sol (plaine rizicole de Sasomangana) obtenue par analyse numérique de la composition colorée effectuée sur les données initiales et générée à partir des canaux TM2, TM3 et TM4. Classification dirigée au maximum de vraisemblance; masque sur le domaine extérieur à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

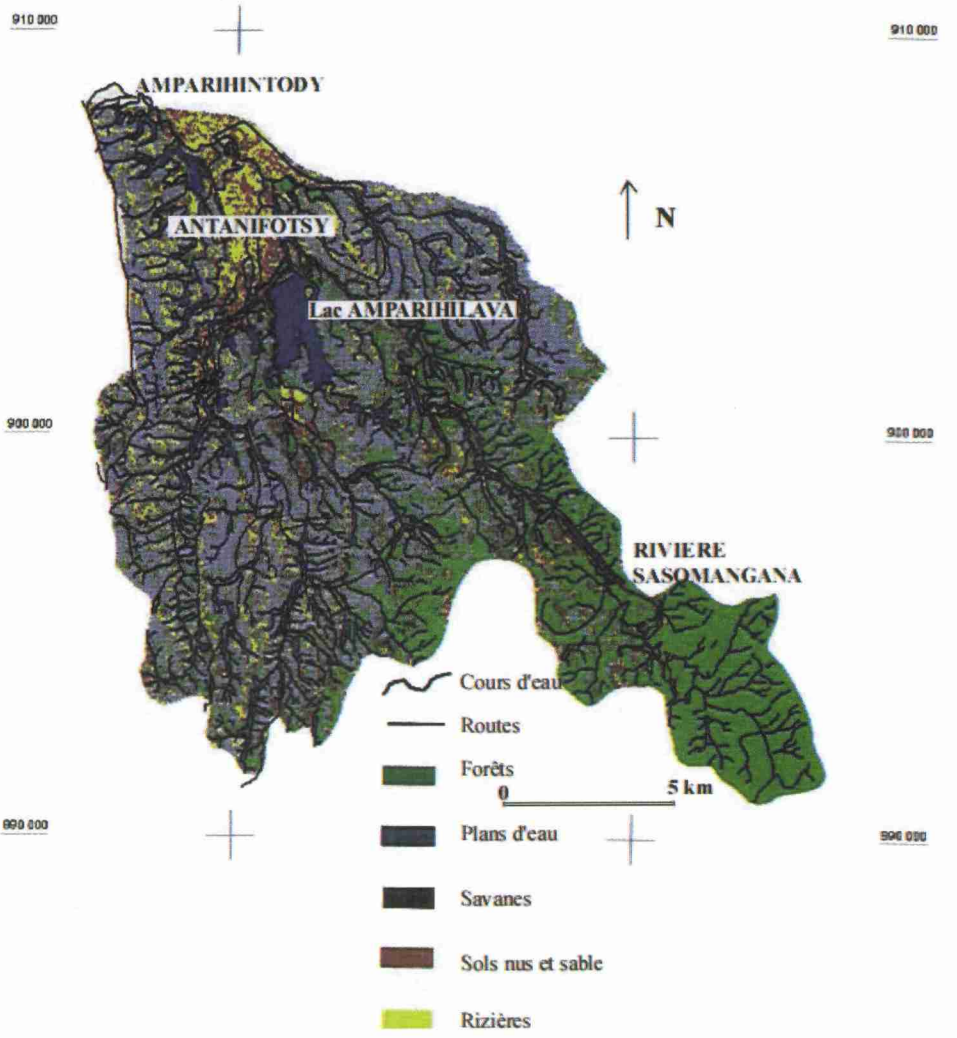


Figure 28-3. Carte de l'occupation du sol (bassin versant de Sasomangana) obtenue par les mêmes traitements numériques décrits pour la figure 2 et classification en 5 thèmes au lieu de 8.

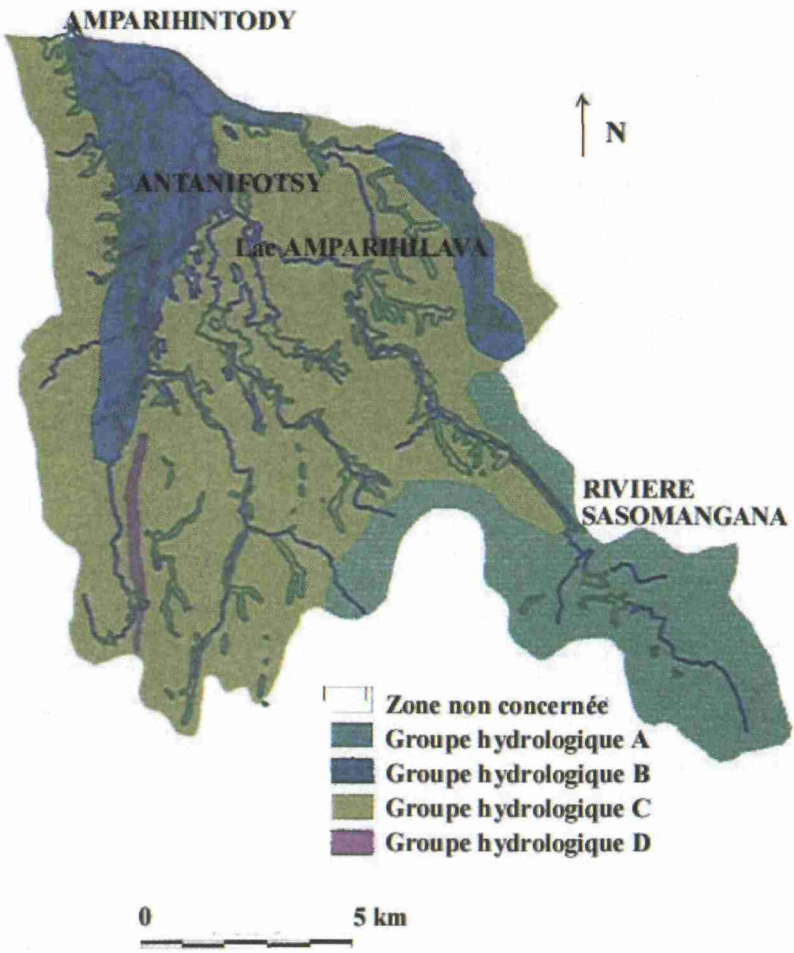


Figure 28-4. Carte des sols par groupe hydrologique résultant de la classification des sols selon leur aptitude au ruissellement et leur capacité d'infiltration (modèle SCS).

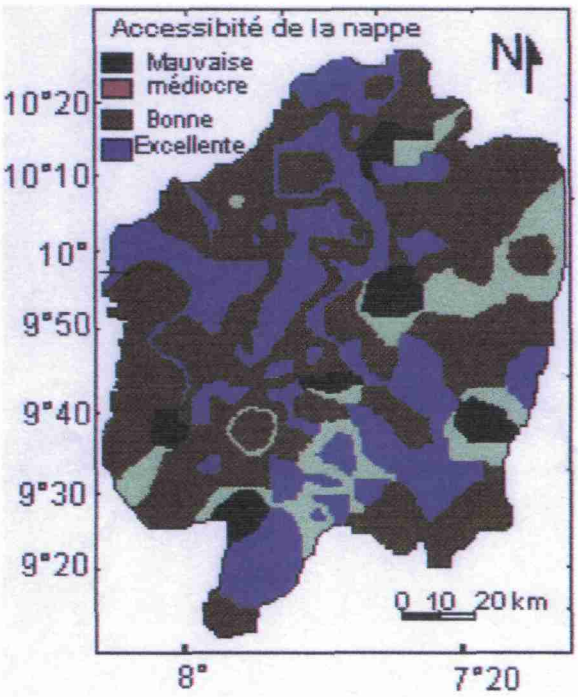


Figure 29-5. Carte d'accessibilité de la nappe souterraine d'Odienné

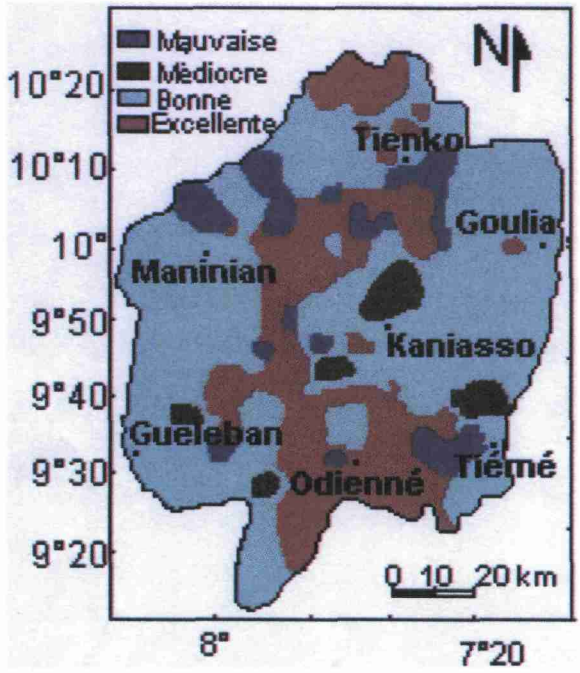
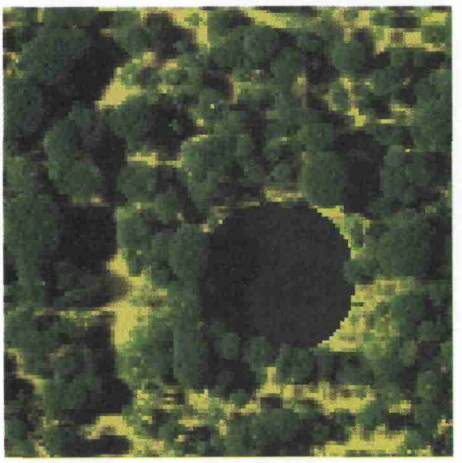
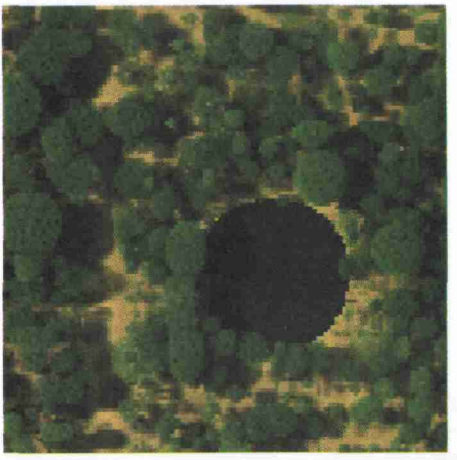


Figure 29-6. Carte d'exploitabilité de la nappe d'Odienné

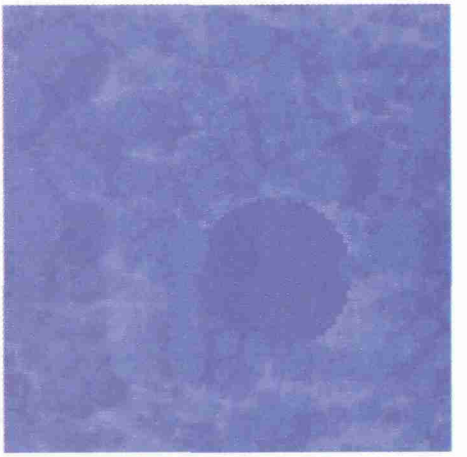


a) Bas de l'atmosphère - Eclairement direct

b) Bas de l'atmosphère - Eclairement diffus

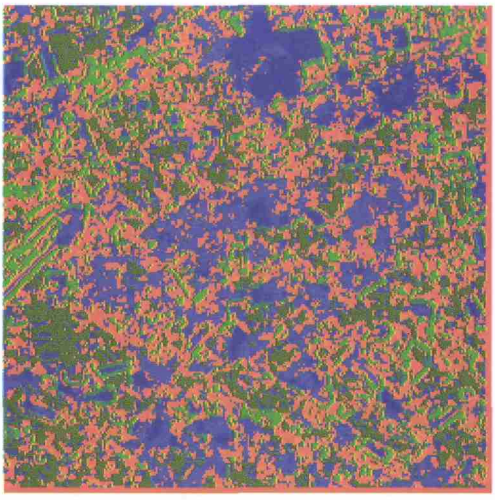


c) Bas de l'atmosphère-Éclairement mixte (a+b)



d) Haut de l'atmosphère

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



Échelle : 1 : 100 000

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

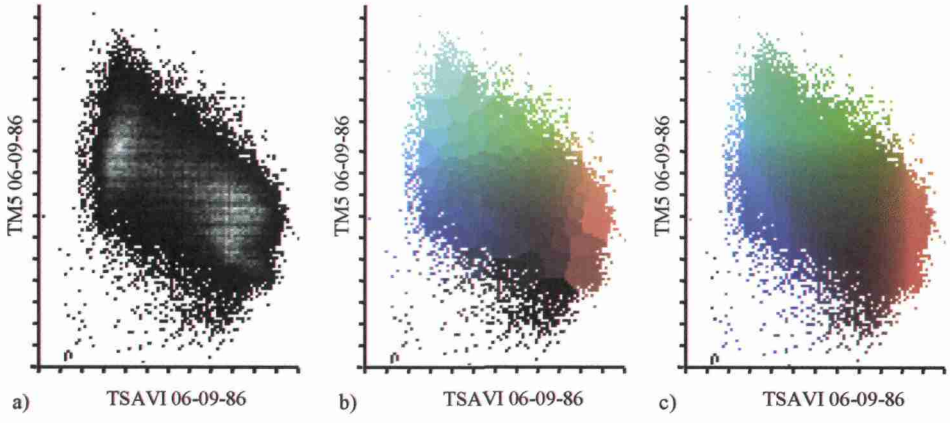


Figure 34-1. Base de décision formée par a) un histogramme bivarié, b) un scattérogramme thématique selon une classification non dirigée et c) un scattérogramme thématique selon une classification point par point

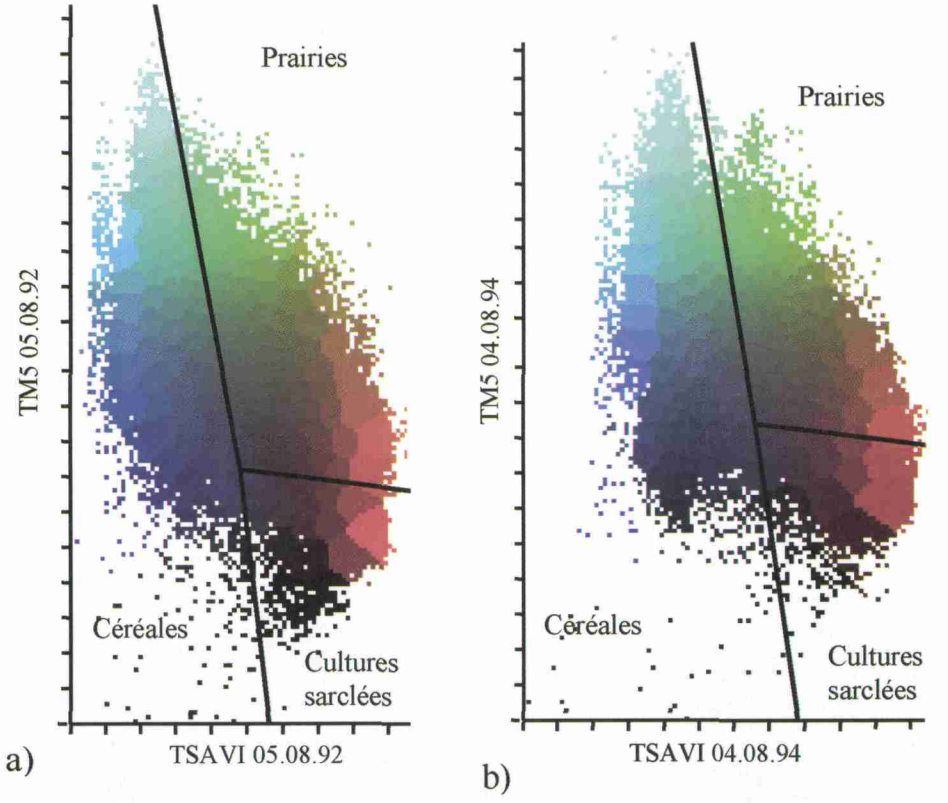


Figure 34-4. Partition de l'espace des attributs : a) pour 1992 et b) pour 1994

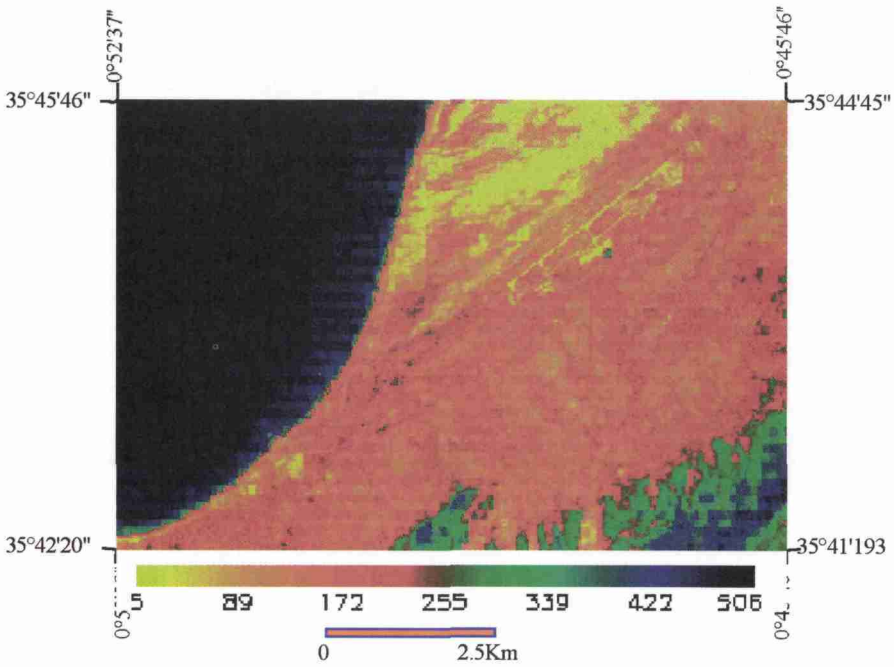


Figure 37-3. Image de la densité de flux de chaleur latente : plaine de Bousfer

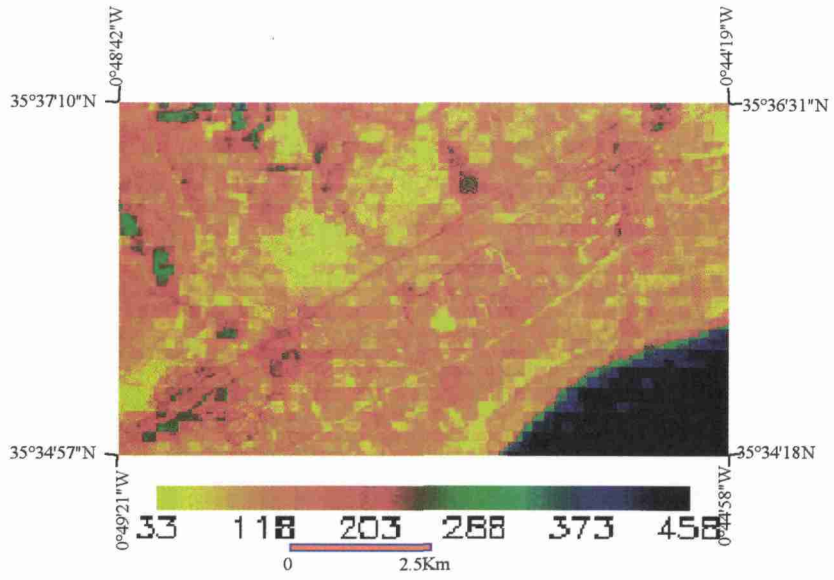


Figure 37-4. Image de la densité de flux de chaleur latente : plaine de Misserghine

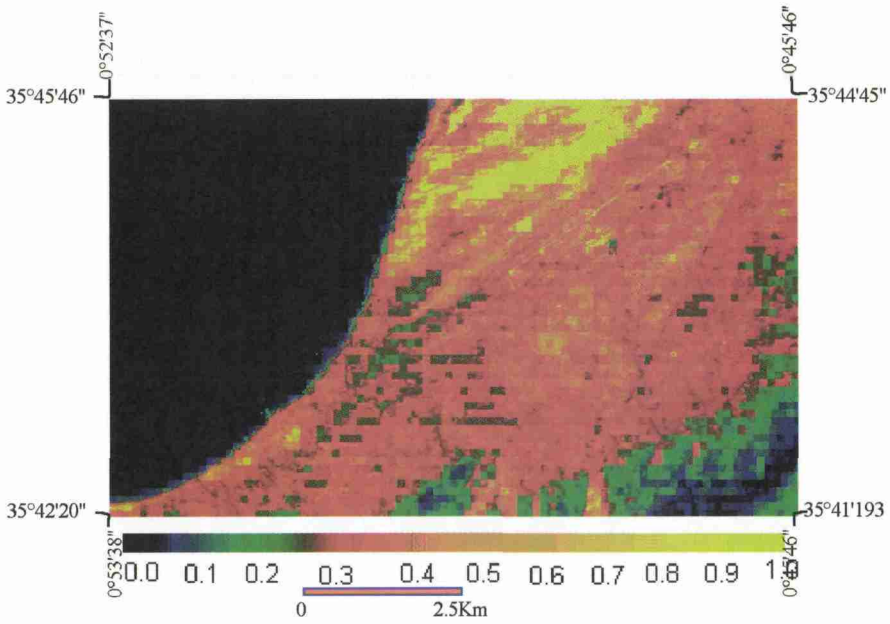


Figure 37-5. Image de l'indice de stress hydrique (CWSI) : plaine de Bousfer

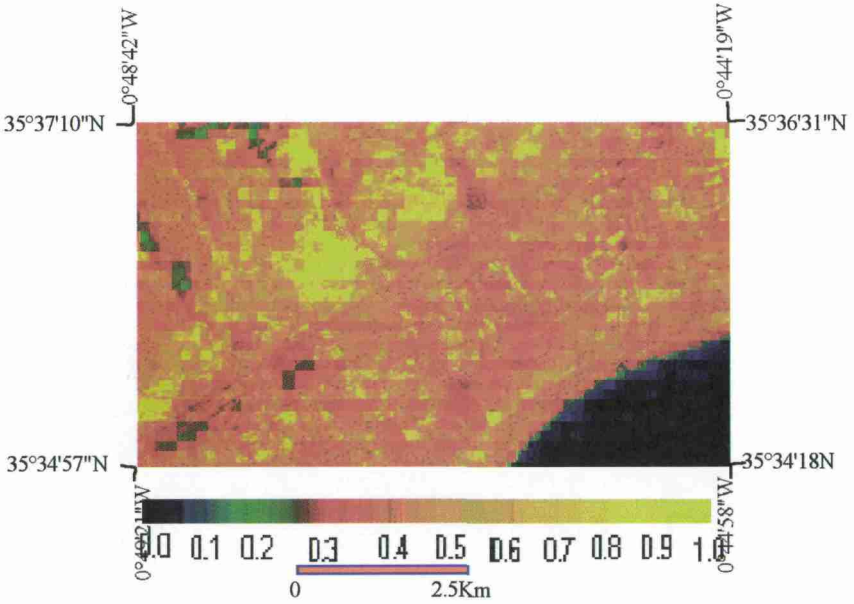


Figure 37-6. Image de l'indice de stress hydrique (CWSI) : plaine de Misserghine

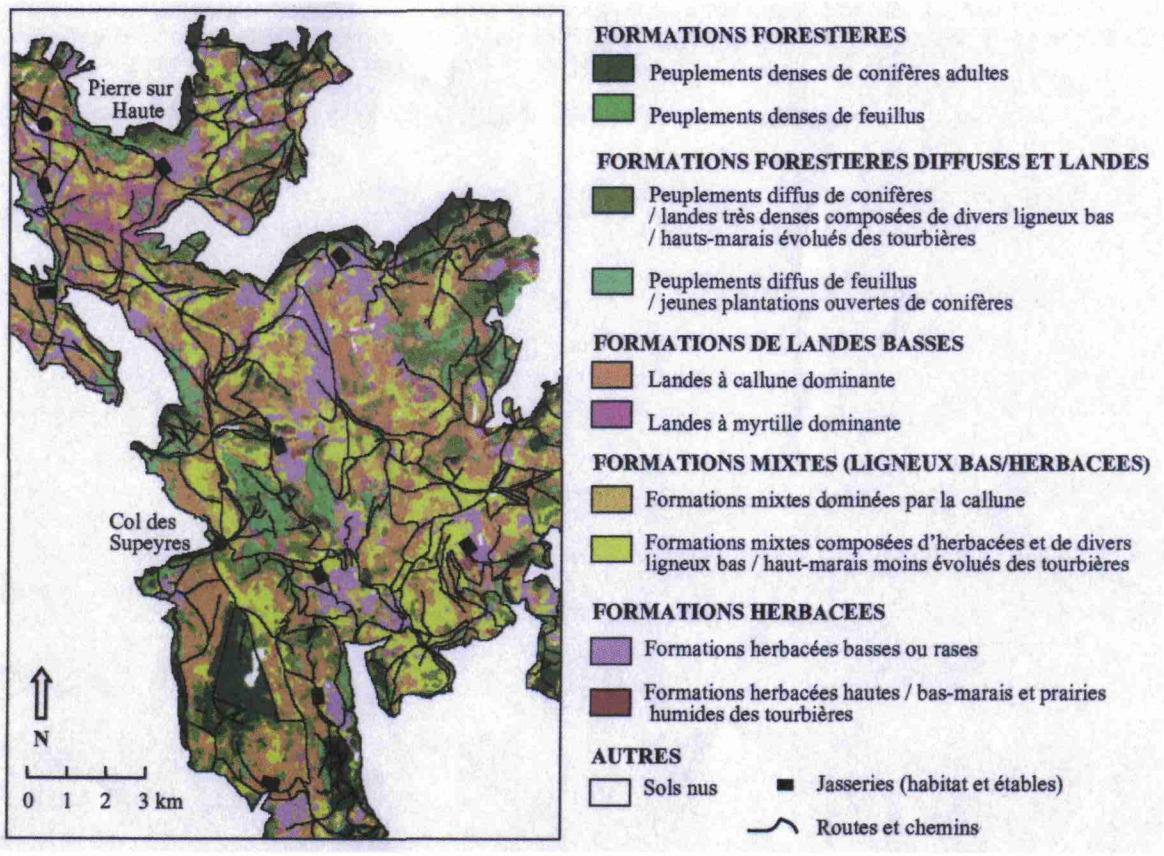
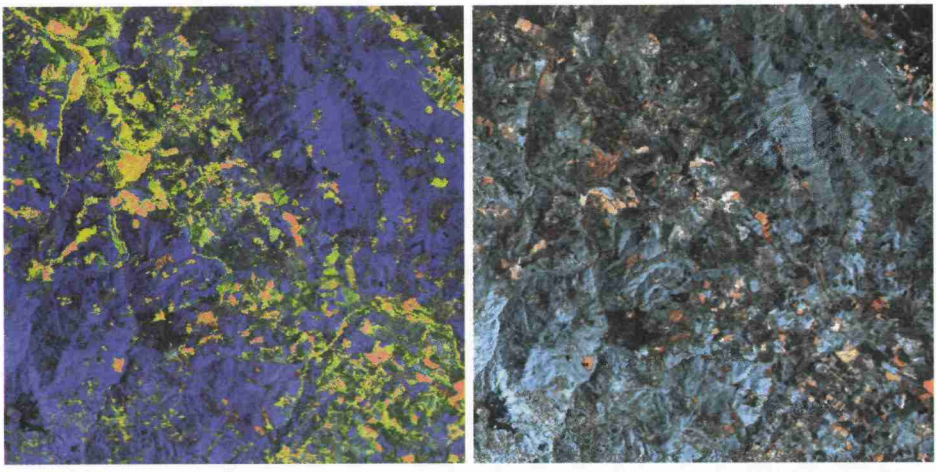
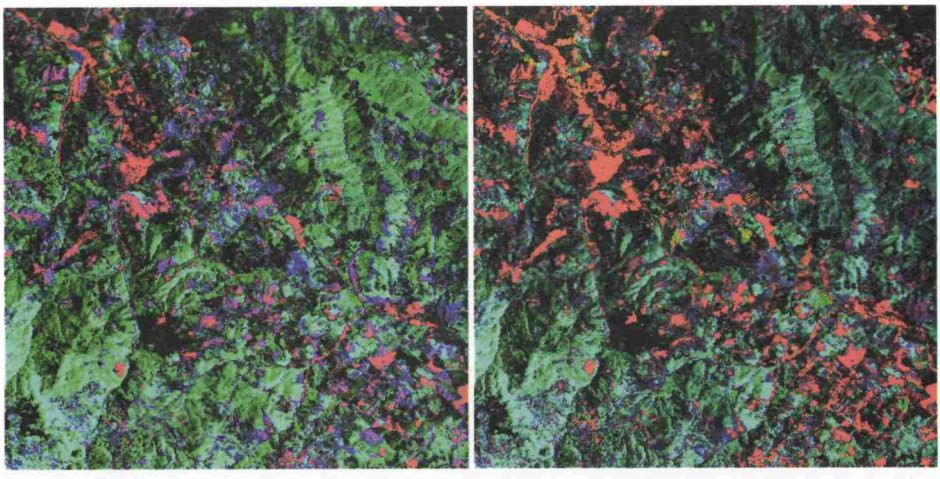


Figure 38-2. Extrait de la carte des formations végétales des Hautes-Chaumes (Massif Central français) d'après une image HRV de SPOT du 24 août 1994. (Source : BESSENAY, 1995)



(a) (b)

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



(a) (b)

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

PARTIE III

Télédétection des ressources en eau

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 189-203

20

La place des observations par capteur satellitaire dans l'estimation et la régionalisation des ressources en eau

GUY FLOUZAT [1], OLIVIER AMRAM [1] et JEAN-PIERRE FORTIN [2]

[1] *Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CNES-CNRS-UPS), B.P. 2801, 18 avenue Edouard-Belin, 31401 Toulouse Cedex 4, France; téléphone : +33 (5) 61 55 66 38; télécopieur : +33 (5) 61 55 85 00; courriel : guy.flouzat@cesbio.cnes.fr*

[2] *Institut National de la Recherche Scientifique-EAU, B.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4C7; téléphone :+1 (418) 654-2591; télécopieur : +1 (418) 654-2600; courriel : j.-p._fortin@inrs-eau.uquebec.qc.ca*

1. Introduction

Dans de nombreuses régions, la connaissance des ressources en eau est un problème majeur pour le développement économique. Lorsque cette connaissance est nécessaire sur de grands territoires, les mesures ponctuelles, même si elles sont très précises, ne peuvent conduire à la vision synoptique dont les scientifiques, les gestionnaires et les aménageurs ont besoin. Ainsi, la demande sociale de plus en plus forte impose d'élucider les grandes questions qui se posent tant aux chercheurs qu'aux gestionnaires afin de mieux connaître les mécanismes conditionnant la disponibilité et la répartition de cette ressource.

En particulier, la nature des échanges entre bassins versants et atmosphère ainsi que les caractéristiques spatiales et temporelles des flux d'eau en surface et en profondeur sont encore insuffisamment connues. Ces différents processus de la phase continentale du cycle de l'eau correspondent à des variables caractéristiques : précipitations, ruissellement, infiltration, drainage profond vers les nappes, remontée capillaire, évaporation des surfaces minérales, transpiration des couverts végétaux, humidité des sols (en surface et dans la zone non saturée) ainsi que, par relation, le bilan radiatif et la météorologie. Ce sont ces flux qui déterminent les bilans et les réserves, et, compte tenu de leur diversité et de leur

complexité, on admet actuellement que la régionalisation des bilans hydriques ne peut être obtenue qu'en s'appuyant sur la modélisation du couplage de ces transferts verticaux et horizontaux.

Ces modèles décrivent les transferts sol-végétation-atmosphère (TSVA) et les flux hydrologiques superficiels et profonds dans des systèmes maillés (MHM) et doivent être fortement contraints par les interactions entre flux d'eau et structure des écosystèmes. Aussi, ils nécessitent de bien décrire : 1) les hétérogénéités des milieux dans lesquels se déroulent les flux d'eau et de matières associées ; 2) les couplages de processus de transfert eux-mêmes conditionnés par les propriétés de ces milieux. Une grande amélioration de la connaissance des bilans hydriques vient souvent de cette meilleure prise en compte des caractéristiques des écosystèmes et des bassins versants.

Dans ces conditions, on voit bien la place que peuvent prendre les données de télédétection dans cette perspective : d'une part, certains termes de flux ou de réserves peuvent être estimés directement et, d'autre part, la description quantitative des milieux naturels contribue à améliorer la qualité des sorties de modèles. Or, beaucoup de mesures satellitaires sont devenues couramment accessibles dans les trois principaux domaines d'énergie (optique, infrarouge, micro-ondes) utilisés en observation de la Terre. Cependant, elles restent généralement utilisées séparément comme des estimateurs directs de quantités (surfaces d'eau libre), de paramètres (réflectance, température) ou comme des termes d'assimilation. Dans l'estimation des ressources en eau, il est souvent indispensable de mettre en oeuvre la synergie de plusieurs types de mesures afin d'initialiser différents termes dans des modèles de flux.

Aussi, dans cet article, on s'efforce de donner un bref rappel sur les ressources planétaires et les différents termes de la phase continentale du cycle de l'eau. Ensuite, on met l'accent sur la diversité des observations et des traitements de données de télédétection qui contribuent à l'estimation des différents termes de flux et de bilans d'eau. À cet effet, seront décrites les approches utilisant les mesures satellitaires et leurs différentes résolutions spatiales et temporelles disponibles en visible, en infra-rouge et en micro-ondes. Leurs combinaisons permettent : 1) la détection directe de certaines caractéristiques de réservoirs de la ressource en eau ; 2) le calcul des quantités physiques qui conduisent au couplage des flux hydriques verticaux et horizontaux ; 3) la quantification des propriétés structurales et fonctionnelles des systèmes naturels.

2. Ressources en eau et apport de la télédétection dans l'estimation des flux

La connaissance de la ressource en eau nécessite d'appréhender les quantités existant sous forme de réservoirs (ou stocks) et sous forme de flux (ou transferts). La somme des réservoirs constitue la ressource proprement dite et l'ensemble des flux forme le cycle de l'eau avec les transports et les changements d'états entre les réservoirs.

2.1. Les grands réservoirs

Il n'est pas original d'indiquer que l'eau est indispensable à la vie. Par contre, il est important de rapporter, qu'en 1995, une enquête de la Banque mondiale avait montré que 80 pays et 40 % de la population mondiale étaient touchés par le manque d'eau. Cela souligne l'importance de la ressource en eau et de sa connaissance pour les décennies à

venir.

Du point de vue quantitatif, quelques chiffres synthétisent l'état global de la ressource. Ces valeurs proviennent de diverses synthèses ou de compilations numériques (CIEAU, 1999; CHOISNEL, 1997; DE MARSILLY, 1995; PEIXOTO et OORT, 1990; RAMADE, 1994; UNESCO, 1978)

Ainsi, 72 % de la surface terrestre est recouverte par les mers, les océans et les calottes glaciaires, et les océans contiennent 97,4 % de la masse totale de l'eau sur Terre (environ 1,4 x 10^9 km^3). Cette eau est salée et il n'y a que 2,7 % d'eau douce. Une synthèse sur ces quantités est donnée sur le tableau 1.

Tableau 1. Volumes des principaux milieux réservoirs d'eau

Réservoirs	Volume (10^4 km^3)	Quantité relative
Océans, mers (eau salée)	1 350	97.4 %
Calottes glaciaires	27.8	2.01 %
Eaux souterraines (nappes phréatiques)	8.10	0.58 %
Eaux superficielles (lacs, rivières)	0.225	0.02 %
Vapeur d'eau atmosphérique	0.0013	0.001 %

2.2. Les flux dans la phase continentale du cycle de l'eau

La quantité relative de l'eau dans l'atmosphère (0,0013 %) est très faible puisqu'elle n'aurait qu'une épaisseur de 3 cm si elle était uniformément répartie sur tout le globe. Lorsque cette eau se recondense en précipitations, 60 % s'évapore à nouveau, 15 % ruisselle et alimente les cours d'eau et les océans alors que le 25 % restant s'infiltre et rejoint les nappes et les réserves souterraines. C'est cette très faible quantité relative qui détermine la circulation de l'eau et son cycle biogéochimique dans sa phase continentale.

Les mécanismes d'évaporation et de transpiration de l'eau des réservoirs superficiels (voir ci-dessous) et les mécanismes de transport de la vapeur d'eau atmosphérique par la circulation générale dans l'atmosphère font que 78 % des précipitations arrive à la surface des océans. Les flux hydriques qui constituent les variables caractéristiques de la phase continentale du cycle de l'eau ne sont donc déterminés que par le 22 % de l'eau atmosphérique qui interagit avec les terres émergées.

Dans ce contexte, on présente ces flux en deux grands ensembles. On admet que les flux verticaux représentent l'ensemble des transferts de masse (phases solide, liquide, vapeur) entre atmosphère, végétation ou sol. Les flux horizontaux constituent l'ensemble des transferts de masse (essentiellement en phase liquide) à la surface et en sousurface.

2.3. Les flux verticaux

2.3.1 Précipitations

Les précipitations qui tombent sur les continents ont un volume d'un peu moins de 120 000 km^3, ce qui donnerait une hauteur d'eau uniforme sur les terres émergées de 780 mm. Ces quantités résultent des différentes formes d'eau entrant dans les écosystèmes terrestres : pluie, condensation de brouillard, grêle, neige.

La répartition de la pluviométrie contribue fortement à la zonation climatique à l'échelle planétaire mais elle est très inégale aux échelles plus locales. Elle est mesurée ponctuellement par des réseaux de pluviomètres dont les résultats doivent être traités avec deux objectifs : 1) recherche et correction éventuelle de biais dû au vent; 2) interpolation entre les stations du réseau pour obtenir une donnée régionalisée, c'est-à-dire estimée en tout point.

C'est pour améliorer cette régionalisation que des expérimentations sont menées sur le thème « estimation des pluies par satellite » : le principe est que la mesure satellitaire est uniforme sur tout le territoire considéré même s'il reste encore beaucoup à faire pour améliorer le calage des données obtenues. En particulier, des études ont été réalisées sur des images provenant de AVHRR de NOAA en zone tropicale à faible relief (KAKANE and IMBERNON, 1992). Grâce aux deux bandes thermiques, on obtient une information sur la température au sommet des nuages, indicateur de leur développement vertical. Plus ce développement vertical est important plus la probabilité que ce nuage soit précipitant est grande. On peut donc, par cette technique indirecte, fournir des cartes de probabilité de précipitation. Malheureusement, cette estimation reste médiocre, en partie à cause de la fréquence temporelle de la prise d'image (toutes les 6 heures) qui est trop longue par rapport à l'évolution des masses nuageuses.

Par contre, en complément à ces précipitations, on admet que les surfaces enneigées sont identifiables dans les domaines du visible et du proche infra-rouge si l'on dispose de bandes spectrales permettant de s'affranchir de la confusion avec les nuages. De plus, de nombreuses études sont menées actuellement afin d'évaluer le potentiel des radars pour la caractérisation des surfaces de neige : les résultats laissent penser que cette approche est pertinente. Si l'on souhaite s'intéresser à des épaisseurs importants de neige, il est vraisemblable que ce sont des mesures à des fréquences encore plus basses qui seront utiles.

L'humidité des sols modifiée par les précipitations (voir 2.3.3) peut être évaluée dans les premiers centimètres du sol par le signal radar en fonction de la fréquence utilisée. Dans les autres longueurs d'onde (visible, proche ou moyen infrarouge ou infrarouge thermique), le pouvoir de pénétration de l'onde électromagnétique est nul. On obtient seulement une caractérisation de la couche pelliculaire de surface. Par contre, les micro-ondes ont un pouvoir de pénétration dans le couvert végétal ou dans le sol. Malheureusement, si le signal émis ou rétrodiffusé dans cette gamme de longueurs d'onde est porteur d'informations sur l'humidité du sol, il dépend aussi de la rugosité de surface et de la plus grande énergie du relief. L'estimation de l'humidité ne peut donc être effectuée que dans des conditions où les autres facteurs d'interaction sont bien connus, ce qui en limite actuellement la généralisation.

2.3.2. Interception

Lorsqu'une quantité de précipitation (p, généralement exprimée en mm) arrive sur un couvert végétal, une partie est interceptée par le surface foliaire (estimée par l'indice foliaire : LAI en m^2/m^2) : ce mécanisme d'interception des précipitations par la végétation peut être très important pour les flux verticaux. En effet, la lame d'eau qui arrive réellement au sol dépend de la structure verticale de la végétation et de l'indice foliaire de chacune des strates. La pluie efficace au sol (p_{sol}) est donc du type :

$$p_{sol} = p - i_{totale} \text{ avec } i_{totale} = f(\int LAI, \text{ pour toutes les strates}).$$

Après écoulement, égouttement et évaporation, cette interception peut être un obstacle important à l'alimentation en eau du sol. Dans des milieux de savanes et de steppes en Afrique de l'ouest, un modèle de bilan hydrique a permis d'estimer qu'une valeur i = 0,1 mm par unité de LAI et par événement ajustait correctement l'humidification du sol (AMRAM, 1996). Par ailleurs, des mesures ont montré qu'une hêtraie à l'équilibre en milieu tempéré (LAI = 8) pouvait intercepter jusqu'à 30 % des précipitations en fonction de la distribution temporelle des précipitations.

L'importance de la structure de la végétation et de l'évolution de son indice foliaire dans ce mécanisme d'interception montre bien l'impact de l'occupation du sol d'un bassin versant sur son fonctionnement hydrique. De plus, il apparaît déterminant d'exploiter des données de télédétection à différentes résolutions spatiales et temporelles pour estimer l'indice foliaire avec une bonne fréquence temporelle.

2.3.3. Infiltration-percolation

La quantité p_{sol} de pluie efficace donne naissance à l'infiltration et à la percolation. C'est ce flux qui augmente l'humidité du sol. Le mécanisme d'infiltration à la surface dépend de l'occupation du sol et de la nature de la surface du sol lors de la précipitation. Ainsi, la présence ou l'absence de matière organique à la surface agit fortement sur la pénétration de l'eau. L'état de fissuration et de battance du sol est également très important.

L'infiltration ou la percolation dans le profil de sol (c'est-à-dire à l'échelle macroscopique) est fonction de l'énergie mécanique (Em) de l'eau avec Em = Ec + Ep et où Ec est l'énergie cinétique et Ep est l'énergie potentielle. La migration dans la phase solide du sol est freinée par la résistance à l'infiltration qui détermine la conductivité hydraulique (K). La conductivité est faible pour un sol sec et augmente non linéairement avec l'humidité. Cette variation de K avec le temps en milieu non saturé conduit à une valeur de conductivité à saturation (Ks) qui dépend de la structure de la porosité du sol. Le flux d'eau entre deux points A et B dépend alors du gradient de charge (H, charge ou potentiel total de pression de l'eau dans le sol) entre H_A et H_B et de la conductivité hydraulique du sol (K) pour l'humidité correspondant à H.

Lorsque le sol est saturé, les valeurs de Ks donnent des infiltrations de 10 mm/h pour les sols sableux à des vitesses inférieures à 1 mm/h dans les sols argileux. Si les précipitations ne maintiennent pas la saturation, l'infiltration profonde (percolation ou drainage profond) se développe jusqu'à l'équilibre entre le potentiel de pression et les forces de gravité à un atmosphère. La quantité d'eau correspondante est appelée capacité au champ. Par exemple, un sol argileux d'un mètre de profondeur peut retenir une lame d'eau de 400 à 450 mm, un sol argilo-limoneux retient 300 à 350 mm alors qu'un sol sableux ne retient que 150 mm pour la même épaisseur.

Dans ce domaine, la télédétection ne peut apporter que des informations sur les états de surface qui interviennent dans la première phase de l'infiltration. Pour la suite du

mécanisme d'infiltration, les observations par capteur satellitaire peuvent apporter une information indirecte : la physiographie des paysages correspond souvent à la répartition des caractéristiques des sols correspondants. Des informations précisant les propriétés physiques des sols par unité de paysage peuvent ainsi être régionalisées et indiquer la répartition des caractéristiques intervenant fortement dans ces processus.

Tous ces transferts de précipitations, d'interception (avec l'écoulement et l'égouttement) ainsi que l'infiltration (ou la percolation) sont qualifiés de flux verticaux entrants.

La végétation (naturelle ou cultivée) et les processus physiques à l'interface sol et végétation avec l'atmosphère sont à l'origine des flux verticaux sortants (ou montants).

2.3.4. Remontée capillaire

La remontée capillaire est un de ces flux ascendants les plus importants. Elle est due aux forces de tension superficielle qui peuvent induire un gradient de charge hydraulique orientant le flux vers le haut. Ce mécanisme est analogue à l'ascension capillaire décrite par la loi de Jurin : si les couches supérieures du sol voient leur humidité diminuer, le gradient de pression descendant fait que l'eau remonte dans la porosité du sol.

Dans un sol argileux ou argilo-limoneux, la hauteur de remontée capillaire peut atteindre 1 m. Cela explique que, lorsque la réserve en eau disponible dans l'épaisseur de sol prospectée par les racines a été utilisée, un flux venant des strates inférieures peut amener un transfert d'eau vers le haut et permettre aux racines d'alimenter le couvert végétal.

2.3.5. Transpiration

La transpiration des végétaux est le second flux sortant de grande importance. Ce transfert est un mouvement de vapeur d'eau qui quitte les tissus foliaires vers l'atmosphère. Ce mécanisme de transpiration par les végétaux résulte donc d'un changement d'état de l'eau qui passe de l'état liquide à l'état vapeur. Cette vaporisation s'effectue dans les chambres stomatiques des feuilles et permet ainsi à la plante de dissiper de l'énergie pour limiter l'augmentation de la température de ses tissus. Cette énergie est donc libérée sous forme de chaleur latente de vaporisation ($2{,}3 \times 10^6 J.kg^{-1}$). Cette perte d'eau dépend évidemment du rayonnement net apporté au couvert végétal et de la tension de vapeur d'eau dans la couche limite atmosphérique dans laquelle s'échangent ces flux de masse et d'énergie.

La physiologie du végétal va réguler la transpiration en fonction de ces conditions énergétiques ambiantes et en fonction des résistances rencontrées dans les transferts d'eau dans le sol, à l'interface sol-racines et dans le végétal lui-même. Lorsque la demande atmosphérique (énergie disponible pour la vaporisation) est trop forte, la plante s'oppose à cette perte hydrique par la fermeture des stomates. Cette situation va se traduire par un échauffement des tissus et un arrêt de la photosynthèse puisque le CO_2 atmosphérique n'entrera plus dans les stomates.

Dans de bonnes conditions d'alimentation en eau, de nombreuses formations végétales peuvent transpirer jusqu'à 10 mm/jour. Cette quantité montre que la réserve en eau d'un sol peut rapidement être épuisée s'il n'y a pas de réapprovisionnement par des précipitations ou des remontées capillaires.

Dans ce domaine, la télédétection ne peut permettre d'évaluer directement un flux de transpiration. Par contre, des estimations de rayonnement global et de rayonnement net avec des capteurs en visible et en infra-rouge thermique (fenêtre atmosphérique de 8 à 14 µm) sont des contributions évidentes au bilan d'énergie qui conditionne le flux de chaleur latente. De plus, le suivi thermique des couverts est un indicateur de leur stress hydrique

puisque l'échauffement et le gradient thermique par rapport à l'air sont de bons indicateurs. Il est donc important de pouvoir estimer correctement la température de surface.

2.3.6. Évaporation

L'évaporation des surfaces de sol répond aux mêmes mécanismes de dissipation d'énergie que chez les végétaux. Il s'agit également d'un flux mettant en jeu un changement d'état par vaporisation. Cependant, le flux de chaleur latente correspondant s'accompagne d'autres flux qui satisfont le principe de conservation d'énergie et que l'on peut schématiser ici par l'équation du bilan d'énergie : Rn + HC + LE + G + P = 0 (où : Rn : rayonnement net, HC : flux de chaleur sensible, LE : flux de chaleur latente, G : flux de chaleur dans le sol, P : énergie de photosynthèse; tous ces flux se comparent en W/m^2). Cette équation est valide à un t donné et pour une couche de sol qui n'emmaganisent pas d'énergie.

Par conséquent, si Rn est fortement déterminé par le rayonnement global incident, les autres flux de chaleur (HC : convection et G : conduction) vont dépendre des propriétés des matériaux du sol : capacité thermique massique et conductivité thermique. L'équilibre est obtenu par le flux de chaleur latente ou, lorsque la dissipation d'énergie ne le permet plus, le transfert de chaleur augmente la température du sol. À l'opposé de cette situation de jour, la perte d'énergie par échange de chaleur du sol vers l'atmosphère en situation de nuit permet d'abaisser la température de surface du sol.

À l'échelle planétaire, le flux d'évaporation moyen sur les terres émergées est de 470 mm par an. À l'échelle régionale, les zones où l'évaporation et la transpiration sont les plus élevées sont les forêts équatoriales : environ 1200 mm/an. Par contre, les zones désertiques peuvent avoir une évaporation de 100 mm/an ou moins.

On comprend que les variations de flux associés à l'évaporation à la surface du sol vont se traduire par des variations correspondantes de la température de surface. Ce sont ces variations qui sont intéressantes à détecter par télédétection pour comprendre la dynamique de ces flux. Malheureusement, il ne s'agit pas de mesures ou d'estimations directes de ces flux. Cependant, la connaissance de l'occupation du sol possible par observation spatiale apporte une contribution importante puisqu'elle permet de connaître, d'une part, les surfaces en végétation qui sont le siège de flux de transpiration et, d'autre part, les surfaces de sol susceptibles de perdre de l'eau par évaporation.

2.4. Les flux horizontaux

2.4.1. Ruissellement

Lorsque le sol est saturé, un apport supplémentaire d'eau ne peut s'infiltrer : il y a ruissellement sur la surface. Si la conductivité hydraulique Ks ne permet pas l'infiltration d'une quantité d'eau plus grande que l'apport, le ruissellement va se développer dans le bassin versant jusqu'au réseau hydrographique et à l'exutoire.

Dans ce flux, il n'y a pas de changement d'état. L'eau tend à diminuer son énergie potentielle par écoulement de gravité et pesanteur. L'importance des surfaces de collecte devient donc décisive et les vitesses de transfert vont dépendre de la forme des terrains et de leur occupation par différentes végétations qui ralentissent plus ou moins les écoulements de surface.

Globalement, le ruissellement représente 24 % des précipitations sur les continents et va alimenter le réservoir mers + océans (l'apport total des fleuves aux océans est de 46 000

km³/an, ce qui correspond à environ 40 % des précipitations sur les continents : la différence provient essentiellement de l'alimentation par les nappes).

Aux échelles locale et régionale, ce processus n'est pas spatialement uniforme, c'est-à-dire que, sur un même bassin versant, l'eau ruisselée en un point peut s'infiltrer en un autre point. Cela explique que le débit à la sotie d'un bassin hydrographique est souvent inférieur au débit correspondant à la lame d'eau ruisselée. Cette différence s'accroît évidemment avec la superficie de la région considérée.

2.4.2. Ruissellement hypodermique

Le ruissellement de surface s'accompagne souvent d'un ruissellement latéral dans le sol qui est qualifié de ruissellement hypodermique.

Cet écoulement dépend de la conductivité hydraulique et se trouve provoqué par la topographie qui peut entraîner un transfert latéral dans l'épaisseur du sol sans que l'eau ne contribue à l'alimentation des nappes en profondeur.

Ce phénomène est mal connu et difficile à quantifier.

2.4.3. Écoulements libres

On appelle ici, écoulements libres, les flux hydriques en phase liquide qui ont lieu dans le réseau hydrographique.

Ces flux résultent donc des processus de surface (entrants et sortants) ainsi que des ruissellements. Alors que la plupart des transferts peuvent être quantifiés en lames d'eau (exprimées en mm), les flux dans le réseau hydrographique sont quantifiés par des débits en un point donné et exprimés en m³/s. Le comportement de ce débit en réponse à un flux entrant est décrit par un hydrogramme caractéristique du bassin versant amont, de son état hydrique et de son occupation du sol.

Ces écoulements sont contraints par la géométrie des réseaux dans lesquels ils ont lieu. Cependant, les quantités concernées vont influencer le régime d'écoulement. Lorsque le niveau est élevé et permanent dans un chenal, on admet que le régime est laminaire : les frottements interviennent peu sur la variation d'énergie cinétique. Par contre, si le débit devient plus faible, il y a perte du régime laminaire et apparition de turbulences. Les pertes d'énergie par frottements ne sont plus proportionnelles à la vitesse v (m/s) mais à une puissance de v. Ainsi, dans les régimes d'étiage, lorsque le rapport de la rugosité du fond à la hauteur d'eau augmente, la perte d'énergie cinétique devient élevée et l'écoulement se ralentit.

Les écoulements libres contribuent, avec les ruissellements, à mettre en place les réservoirs d'eau en surface : étangs, lacs, retenues. Ces réservoirs sont caractérisés par leur grand volume d'eau.

Dans ce domaine, la télédétection est généralement très efficace pour identifier les surfaces d'eau libre. D'une part, on sait que la signature de l'eau se différencie fortement des autres éléments de l'occupation du sol dans les longueurs d'onde du visible et du proche infra-rouge. D'autre part, les propriétés de réflexion spéculaire des ondes radar sur une surface d'eau libre non agitée font que le rétrodiffusion en direction du capteur est très faible et permet ainsi une bonne identification.

Toutefois, ces méthodes ne peuvent devenir totalement quantitatives que si l'on dispose de la forme, et donc du volume, des réservoirs. Cette observation renvoie aux interactions des flux horizontaux avec la géomorphologie.

2.4.4. Relations avec la géomorphologie

L'ensemble des flux horizontaux interagit fortement (comme cela vient d'être indiqué pour le ruissellement superficiel) avec l'occupation du sol dans les bassins versants. On ne reprend pas ici l'apport de la télédétection dans la quantification de l'occupation du sol; par contre, il convient de se reporter à la dernière partie où il est montré en fonction de quelles voies on peut actuellement améliorer la description spatio-temporelle des surfaces.

Une autre interaction majeure de ces flux avec la surface intervient par la géomorphologie. En effet, l'influence de la géométrie des surfaces et des chenaux d'écoulement libre est très marquante.

L'organisation du relief détermine l'imbrication des bassins versants en fonction d'une hiérarchie donnée. Celle-ci provient de la géographie des lignes de crêtes qui sont à l'origine des surfaces de collecte des différents bassins d'écoulement. Inversement, la répartition des lignes de thalweg donne naissance aux réseaux d'écoulement libre et au réseau hydrographique. En tout point, la pente intervient sur l'énergie cinétique qu'elle communique à l'eau. L'exposition des facettes a deux effets : un effet direct sur le bilan d'énergie local et un effet indirect sur l'utilisation naturelle ou cultivée du sol.

Dans le domaine de la géomorphologie, la télédétection peut être un apport déterminant. La capacité de certains systèmes spatiaux, comme ceux de la filière HRV, à observer la même cible sous des géométries de prise de vue différentes permet une perception stéréoscopique du relief. Il est donc possible d'obtenir en tout point (x, y) une valeur de la fonction z(x, y) qui donne son altitude. Cela délivre un modèle numérique d'altitude. L'application d'opérateurs de différentiation locale à la fonction z(x, y) donne ensuite les informations de pente et d'orientation.

Il semble donc actuellement possible de réaliser une description quantitative d'un bassin versant dans des termes bien adaptés à la connaissance des flux d'eau en milieu naturel.

3. Modélisation et estimation de flux

Comme cela a été indiqué dans les flux, peu de mesures permettent d'obtenir directement des grandeurs utiles. La plupart donne accès à des termes intermédiaires. Les estimations ne peuvent alors provenir que de modèles qui utilisent ces grandeurs en entrée ou comme des termes de forçage. En outre, afin de tenir compte de la variabilité spatiale du milieu, la modélisation des flux doit reposer sur une description maillée du milieu dans laquelle on introduit la structure et la phénologie dans chaque maille du modèle. Pour cela, il est nécessaire de réaliser un couplage entre la description physique du continuum sol-plante-atmosphère et la modélisation des flux latéraux de surface et de subsurface. Ces sous-modèles contribuent à la spatialisation de l'ensemble en appliquant des transferts latéraux aux termes de ruissellement calculés à partir des états successifs des équations de conservation de la masse. Chacune des mailles est dotée de ses flux 1D et fait communiquer les termes résultants à la surface avec les mailles voisines. Les forces de gravité responsables de ces transferts sont générées à partir du modèle de sol et appliquées en 3D aux écosystèmes considérés avec les données de géomorphologie numérique.

3.1. Les flux verticaux

La modélisation des processus d'échange dans les écosystèmes fait traditionnellement appel aux fonctions SVAT (*Soil Vegetation Atmosphere Transfer*) qui représentent les différents termes de flux hydriques : précipitation, interception, égouttement, évapotranspiration et infiltration.

Pour décrire ces processus, il existe de nombreux modèles, différant par leur niveau de complexité, le nombre et le type de variables en jeu, la finesse de description des mécanismes et les possibilités d'utilisation à différentes échelles. On peut en distinguer trois grands types : 1) les modèles détaillés, multicouches traitant une partie ou l'ensemble des processus évoqués; ils résolvent explicitement les équations de conservation et de transfert en jeu; 2) les modèles qui assimilent les surfaces sol-couvert à une surface foliaire fictive exposée à un microclimat moyen; ce sont les modèles dits « mono-couches » ou *big leaf*; 3) les modèles, enfin, reposant sur des hypothèses plus fortes, permettant par exemple d'exprimer l'évaporation en fonction des grandeurs climatiques.

Ces approches permettent donc de calculer l'évolution temporelle des flux d'énergie et des flux hydriques verticaux; par contre il néglige le plus souvent les flux horizonatux.

3.2. Les flux horizontaux

Les flux horizontaux de ruissellement et d'écoulement déterminent les quantités qui vont sortir d'un écosystème par l'exutoire d'un bassin versant. Ces termes de sortie dépendent de l'organisation spatiale du milieu et de ses caractéristiques.

Le développement des études sur des systèmes complexes comme les milieux naturels (e.g. bassins versants, rivières, nappes, lacs, etc.) a provoqué au cours de ces 30 dernières années une prolifération de modèles dans les sciences de l'eau. On peut distinguer les différentes approches en tenant compte des champs d'applications et de la structure du modèle : 1) mécanistes, 2) conceptuels et 3) empiriques et stochastiques.

Toutes ces approches décrivent de façon plus ou moins détaillée les flux horizontaux pour fournir une estimation la plus correcte possible du débit à l'exutoire. Dans ces modèles les flux verticaux sont souvent considérés comme des termes de pertes. Ces flux sont alors décrits de façon simplifiés qui ne permet pas une bonne connaissance de la distribution verticale de l'humidité dans le sol.

3.2.1. Les modèles mécanistes

Les modèles déterministes ou mécaniques se basent sur des lois de la mécanique, de la physique, de la chimie ou de la biologie et sur une « parfaite » connaissance de la structure physique du système. En théorie, ce type de modèle est indépendant du calage car tous les paramètres sont censés être mesurables. Dans les sciences de l'eau, on est loin d'une théorie déterministe des processus hydrologiques. Même dans des secteurs relativement réduits, où l'on dispose de modèles mécanistes qui représentent bien le comportement du système, certains paramètres ne sont pas directement mesurables sur le terrain (e.g. conductivité hydraulique dans la loi de Darcy, coefficient de Strickler dans les équations de Saint-Venant, etc.).

3.2.2. Les modèles conceptuels

En raison d'incertitudes, ou de la pauvreté des informations, on procède alors à une

simplification du comportement du système. Ces modèles intègrent des facteurs complexes et décrivent le concept physique par une représentation plus simple dépourvue de réalité physique. Les plus utilisés sont les modèles à réservoirs qui se remplissent et se déversent les uns dans les autres par des lois de vidange semi-empiriques. Dans ces modèles à réservoirs, on distingue deux fonctions principales : 1) la fonction de production qui regroupe les phénomènes responsables des pertes subies par l'eau de pluie tombant sur le sol et empêchant l'eau d'atteindre l'exutoire du bassin (interception, évapotranspiration, stockage temporaire); 2) la fonction de transfert qui permet la transformation de la fraction de la pluie qui va devenir écoulement à l'exutoire du bassin versant.

3.2.3. Les modèles empiriques et stochastiques

Les modèles empiriques sont des modèles qui expriment directement des relations entre grandeurs déterminantes en entrées et grandeurs résultantes en sortie. Les modèles empiriques ne font pas référence aux processus internes du système et se contentent d'établir des relations directes entre les variables de forçage et les variables de sortie. Lorsque des grandeurs impliquées sont des variables aléatoires représentées par une fonction de distribution des probabilités, on appelle ce type de modèles un modèle stochastique. Le but de ces modèles est de fournir une description statistique de la réponse du système. Ces types de modèle n'impliquent donc pas la connaissance physique des phénomènes mais nécessite, en général, de longues séries d'observations pour l'ajustement des paramètres.

3.3. Vers un modèle 3D

Le couplage de ces deux approches verticale et horizontale devrait donc permettre d'interpréter correctement à terme les flux entrants (pluie, égouttement, infiltration), les flux sortants (évapotranspiration réelle, remontée capillaire), les flux de ruissellement en surface et dans le réseau hydrographique d'écoulement libre ainsi que l'évolution du profil d'humidité sur la profondeur racinaire active. C'est la disponibilité simultanée et cohérente de ces différents termes qui est indispensable pour préciser les relations flux hydriques - écosystèmes et les qualités de l'eau qui en dépendent.

4. Amélioration de la description des écosystèmes et des paysages

On considère actuellement qu'une grande amélioration de la connaissance des flux et des bilans hydriques viendra de cette meilleure prise en compte des caractéristiques des écosystèmes terrestres.

En effet, cette idée du besoin de coupler tous ces processus est de plus en plus partagée mais se heurte toujours à la difficulté de représenter la variabilité des paramètres induite par l'hétérogénéité des milieux physiques et biologiques. Aussi, différents grands programmes recommandent maintenant ce thème comme une priorité. En particulier, le National Research Council (USA) montrait en 1995 l'intérêt d'une modélisation des interactions entre changements dans les écosystèmes terrestres et modification des flux et des bilans hydriques et énergétiques.

De son côté, le premier colloque Biospheric Aspects of Hydrological Cycle (1995) a montré que la distribution de la végétation, de ses changements physiologiques, des

paramètres mal connus dans le sol et des insuffisances sur la description de la redistribution de l'eau en surface sont des limitations qui doivent être levées. De même, une connaissance affinée des facteurs qui introduisent des non-linéarités difficiles à modéliser est à rechercher particulièrement pour le sol et son humidité, la végétation et la topographie. Ces orientations se sont trouvées confortées par les conclusions de la 5ème Assemblée Internationale des Sciences Hydrologiques (avril 1997).

L'étude des interactions entre flux hydriques et écosystèmes terrestres par télédétection nécessaire à la connaissance peut répondre en partie à cette demande mais pose de nombreux problèmes méthodologiques dus à la multiplicité des échelles qui sont pertinentes pour en décrire les mécanismes. En effet, les constituants des écosystèmes (la structure) et leurs processus (le fonctionnement) ont une imbrication spatiale et temporelle qui rend indispensable leur étude aux différentes échelles où existe une information utile à la description et à la modélisation des flux.

Les relations structurales et fonctionnelles qui unissent ces constituants peuvent donc être appréhendées par une approche multi-niveaux puisqu'il y a analogie entre :

- le concept décrivant les écosystèmes comme un ensemble de composants emboîtés ayant leur signification propre à différentes échelles,
- et la télédétection offrant une capacité d'observation continue en surface et à différents niveaux de résolution spatiale et temporelle.

Dans cette perspective, les stratégies d'observation de la Terre font émerger les deux tendances suivantes pour faire coopérer des données à haute résolution spatiale et à haute fréquence temporelle. Par exemple, SPOT 4 possède deux capteurs complémentaires : HRV qui a une bonne résolution spatiale mais une mauvaise résolution temporelle et VEGETATION qui a une mauvaise résolution spatiale mais une bonne résolution temporelle; cela ouvre de nouvelles perspectives de surveillance si l'on parvient à une utilisation combinée des deux sources.

4.1. Décomposition des pixels mixtes

Un premier type d'approche consiste à exploiter les méthodes nouvelles permettant la désagrégation de l'hétérogénéité perçue à différentes échelles d'espace et de temps par les mesures satellitaires. Cette approche conduit à la restitution de profils temporels de réflectance à haute résolution spatiale et à haute fréquence temporelle.

Le besoin de l'analyse temporelle pour le suivi des états de surface et en particulier de la végétation conduit à exploiter les données des capteurs satellitaires à faible résolution spatiale (e.g. de l'ordre du kilomètre) mais à haute résolution temporelle (e.g. le jour) : AVHRR de NOAA et depuis peu VEGETATION de SPOT-4. Dans la plupart des situations, les paysages naturels sont hétérogènes constitués d'éléments très mélangés et imbriqués entre eux. Une amélioration de la connaissance des processus de fonctionnement d'un écosystème ne peut être obtenue qu'en améliorant la perception des processus de fonctionnement des différents éléments constitutifs de cet écosystème. Il faut donc caractériser chacun de ces éléments car leur contribution aux mécanismes propres des systèmes écologiques est spécifique. Dans ces conditions, le pixel à basse résolution est un pixel hétérogène. C'est la notion de pixel mixte.

La réponse d'un tel pixel mixte, dans les courtes longueurs d'onde, peut être considérée comme une combinaison linéaire des réponses des différents composants pondérées par leur probabilité d'occurrence dans cette surface. Cela signifie qu'une connaissance de la structure fine (ensemble des probabilités d'occurrence des différents constituants à haute résolution spatiale) doit permettre de déconvoluer la mesure grossière au kilomètre carré

et donner les réflectances séparées des composants purs.

Dans ce but, l'utilisation conjointe de deux types de données, soit les données à haute résolution spatiale (e.g. SPOT-HRV 20 m) mais à faible répétitivité temporelle qui décrivent la structure des écosystèmes et les données à haute résolution temporelle mais à faible résolution spatiale qui permettent l'observation du fonctionnement, permet d'affiner la signature de chaque objet constituant ce pixel mixte. Le modèle mathématique sous-jacent à cette approche est la régression linéaire multiple.

Grâce à cela, il est possible de restituer les profils temporels de réflectance des différentes classes de végétation et d'occupation du sol.

4.2. Analyse multirésolution et fusion par des pyramides

Un second type d'approche met en œuvre les méthodes d'analyse multirésolution et de reconstruction par des pyramides qui permettent la description d'une image et des informations imbriquées qu'elle contient par des traitements hiérarchiques (JOLION and ROSENFELD, 1994).

Par exemple, l'approche de MARR (1982) est à la base de nombreux développements lorsqu'il s'agit de rechercher une caractérisation complète des transitions, c'est-à-dire des contours entre les objets. De même, la recherche d'une représentation multirésolution d'une image a été montrée par BURT et ADELSON (1983) et CROWLEY et STERN (1984) avec les pyramides de laplaciens.

La préservation du signal significatif des régions d'images peut être assurée également par une analyse multirésolution basée sur l'analyse en ondelettes (GROSSMANN and MORLET, 1984) qui permet de recomposer une image à partir de sa représentation multiniveaux. Une structure de reconstruction pyramidale a été proposée par MALLAT (1989) à partir de l'information extraite à chaque niveau de résolution et significative à ce niveau. Ainsi, dans le cas des images de télédétection, la transformée en ondelettes a déjà montré l'intérêt d'une analyse multirésolution pour la fusion de données et la synthèse d'images multicapteurs (PROENCA et FLOUZAT, 1990 et 1991; PROENCA, 1992).

L'analyse multirésolution appliquée à la fusion de données peut également exploiter les opérations de la morphologie mathématique (SERRA, 1982). La morphologie multirésolution fait appel à des suites d'opérations comme les filtres alternés séquentiels (SERRA, 1986) qui sont utilisés comme filtres passe-bas. L'échantillonnage de la composante basse fréquence obtenue génère le niveau de résolution suivant (FLOUZAT, 1997).

Dans toutes ces méthodes d'analyse multirésolution, la fusion de données est obtenue lors de la phase de reconstruction de la pyramide : la donnée basse fréquence spatiale est remplacée par l'image d'un capteur à basse résolution spatiale. Comme cette image peut être acquise à une fréquence temporelle élevée, la donnée composite obtenue contient donc une information à haute fréquence spatiale et temporelle.

5. Conclusion

La connaissance des ressources en eau et de leur régionalisation conduit à un besoin de quantification de volumes, de lames d'eau et de débits. Mais il est également indispensable de décrire les interactions avec les écosystèmes (tant en partie aérienne que souterraine) car les mécanismes biophysiques sont déterminants pour les flux.

C'est donc la disponibilité de cette diversité d'observations et de traitement de données qui contribue à l'estimation des différents termes de flux et de bilans d'eau. En effet, seules les mesures satellitaires peuvent fournir des caractéristiques physiques avec une uniformité d'observation valide pour tous les milieux indépendamment de la diversité et de l'hétérogénéité des bassins versants concernés. Les différentes résolutions spatiales et temporelles disponibles en visible, en infra-rouge et en micro-ondes et leurs combinaisons permettent ainsi : 1) la quantification des propriétés structurales et fonctionnelles des systèmes naturels et la détection directe de certains termes de la ressource en eau; 2) le calcul des quantités physiques qui conduisent au couplage des flux verticaux et horizontaux en conditionnant les interactions entre les deux compartiments du modèle général.

En conclusion, les progrès réalisés en télédétection dans ces domaines proposent quelques lignes directrices sur les apports que l'on peut raisonnablement en attendre dans les années à venir. En particulier, on comprend la place importante que vont prendre les systèmes d'observation dans cette perspective si l'on associe les données invariantes aux mesures spatiales qui assurent la surveillance.

6. Références

AMRAM, O., 1996. Régionalisation du bilan hydrique à l'aide de mesures satellitaires pour l'étude du fonctionnement des écosystèmes d'Afrique de l'ouest. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier.

BURT, P.J. and ADELSON, E.H., 1983. The Laplacian pyramid as a compact image code. IEEE Trans. on Comm. vol. 31, n° 4, p. 532-540.

CIEAU, 1999. L'eau et le cycle de l'eau. Documentation du Centre international de l'eau (Site Internet : ww.cieau.com), Paris.

CHOISNEL, E., 1997. Le cycle de l'eau : processus physiques et aspects planétaires. La Météorologie 8e série, n° 20, Paris.

CROWLEY, J.L. and STERN, R.M. 1984. Fast computation of the difference of low pass transform. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 6, p. 212-222.

DE MARSILLY, G., 1995. L'eau. Flammarion, Paris, 126 p.

FLOUZAT, G., 1997. Contribution de la morphologie mathématique à l'interprétation des images d'observation spatiale des surfaces terrestres. H.D.R., Université Paul-Sabatier, Toulouse.

GROSSMANN, A. and MORLET, J. 1984. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape - SIAM J. Math. Anal, p. 723-736.

JOLION, J.M. and ROSENFELD, A., 1994. A pyramid framework for early vision. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

KAKANE, V.C.K. and IMBERNON, J., 1992. Estimation of rainfall in Senegal using satellite NOAA-9/AVHRR. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, n°11, p. 2059-2069.

MALLAT, S., 1989. Multifrequency channel decompositions of images and wavelets models. IEEE - ASSP, vol. 37, n° 12.

MARR, D., 1982. Vision. A computational investigation into the human representation and processing of visual information. Freeman, New York.

PEIXOTO, J.P. et OORT, A., 1990. Le cycle de l'eau. La Recherche, n° 220, p. 570-571.

PROENCA, M.C. et FLOUZAT, G., 1990. Un concept d'analyse multirésolution pour le suivi temporel de paysage en évolution. 3e Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990.

PROENCA, M.C. and FLOUZAT, G., 1991. Orthogonal wavelet analysis:a multiresolution tool applied to remote sensing images. IGARSS'91,vol. III, p.1463-1465.

PROENCA, M.C., 1992. La transformée en ondelettes appliquée au traitement d'images de télédétection. Thèse de doctorat. Université Paul-Sabatier, Toulouse.

RAMADE, F., 1994. Éléments d'écologie : écologie fondamentale. 2e édition, Ediscience international, Paris.

SERRA, J., 1982. Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London.

SERRA, J., 1986. Eléments de théorie pour l'optique morphologique. Thèse de doctorat. Université de Paris VI, Paris.

UNESCO, 1978. World water balance and water ressources of the earth. V.I. Korzun ed., Studies and reports in hydrology, n° 25, Paris, 663 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 205-213

21

Apport de la télédétection et des SIG pour la recherche hydrogéologique dans la région du Sahel central des Doukkala (Maroc occidental)

HAFIDA BOUAOUDA [1] et YOUSSEF TIMOULALI [2]

[1] *Faculté des sciences, Université Mohamed V, avenue Ibn Battouta, B.P. 1014, Rabat, Maroc; téléphone : (212) 7 771957; télécopieur : (212) 7 703577; courriel : bouaouda @hotmail.com*

[2] *Centre National de Coordination et Planification de la Recherche Scientifique et Technique (CNCPRST), 52, avenue Omar Ibn Khattab, B.P. 8027, Agdal, Rabat, Maroc; téléphone : (212) 7 778674; télécopieur : (212) 7 778678; courriel : timoulali@cnr.ac.ma*

Résumé

La région du Sahel des Doukkala située au Maroc occidental a connu dernièrement d'épineux problèmes d'approvisionnement en eau. Ainsi, plusieurs recherches hydrogéologiques se sont avérées nécessaires en vue d'assurer une bonne alimentation en eau pour les populations locales. Dans cet article, nous proposons de montrer l'apport des techniques de télédétection et des SIG pour la prospection hydrogéologique. Les différents traitements numériques d'images ont été effectués avec le logiciel Erdas alors que le SIG utilisé est Arc/Info. À partir d'une image de haute résolution spatiale TM de Landsat enregistrée pendant la saison sèche et couvrant la zone d'étude, nous avons pu extraire l'information concernant l'humidité du sol en appliquant la transformation du chapeau haut-de-forme (*tasseled cap*) et le rapport des bandes TM5/7. Nous avons aussi utilisé l'opération des filtres directionnels de Moore pour élaborer une carte de densité de drainage. Les différentes cartes obtenues ont ensuite été intégrées dans un SIG afin de délimiter les zones les plus favorables pour l'implantation des forages. La confrontation

du résultat avec la carte piézométrique existante de la région étudiée a bien montré la présence de deux zones de recharge de la nappe qui pourront faire l'objet de forages hydrogéologiques.

1. Introduction

L'eau est une substance fondamentale pour le maintien de la vie. C'est aussi un facteur d'une grande utilité pour la production agricole, la production de l'énergie, le domaine de l'industrie, les usages domestiques et dans d'autres activités de la vie courante. Devant la nécessité croissante des besoins humains en eau, plusieurs techniques, dont la télédétection, ont été développées. Cependant, l'analyse hydrogéologique des données de télédétection est d'une certaine complexité. En effet, l'eau souterraine ne peut pas être directement observée sur les images satellitales. Par conséquent, il faut procéder à l'identification et à l'étude d'un certain nombre d'indices révélateurs de l'occurrence de cette eau, notamment les phénomènes associés aux zones de recharge ou aux zones de décharge, la persistance du sol humide pendant la saison sèche, la nature lithologique des roches, les traits structuraux régionaux, le système de fracture et la densité du réseau de drainage (ANDERSSON *et al.*, 1992).

Le travail présenté dans cet article met en valeur l'apport de la télédétection et des SIG dans le domaine de l'investigation hydrogéologique à travers l'exemple de la région du Sahel des Doukkala qui a connu ces dernières années, comme les autres régions du Maroc, d'importants problèmes d'approvisionnement en eau potable.

1.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude fait partie du Sahel de Doukkala. Elle est située entre les latitudes 32°45' - 33°15' et les longitudes 8°24' - 8°40', avec une superficie de 5 400 km^2. La zone est délimitée par l'oued Oum Er Rabia au nord-est, l'océan Atlantique au nord-ouest et la plaine de Doukkala au sud (figure 1).

Du point de vue géomorphologique, c'est un pays de dunes fixées, dont l'altitude maximale est d'environ 250 m, allongées en longues crêtes d'orientation SO-NE, parallèles au rivage.

À cause de sa proximité immédiate de l'océan et de son relief très peu accidenté, les températures sont modérées dans les zones près de l'océan et plus contrastées à l'intérieur (25 °C en moyenne). Les pluies tombent régulièrement en automne et en hiver; une longue saison sèche s'étend au printemps et en été (à l'exception des périodes de grande sécheresse). Du point de vue hydrologique, aucun des oueds des Rhemna et des collines des Mouissates ne trouve un exutoire naturel vers l'océan à l'exception de l'oued Felfel (FERRÈ et RUHARD, 1975).

1.2. Données utilisées

Pour la réalisation de ce travail, on a utilisé les différentes données suivantes :
- une image numérique TM de Landsat enregistrée le 9 octobre 1984;
- des cartes topographiques au 1 : 50 000 datant de 1983 qui ont servi aussi bien pour la correction géométrique que pour les missions de terrain;

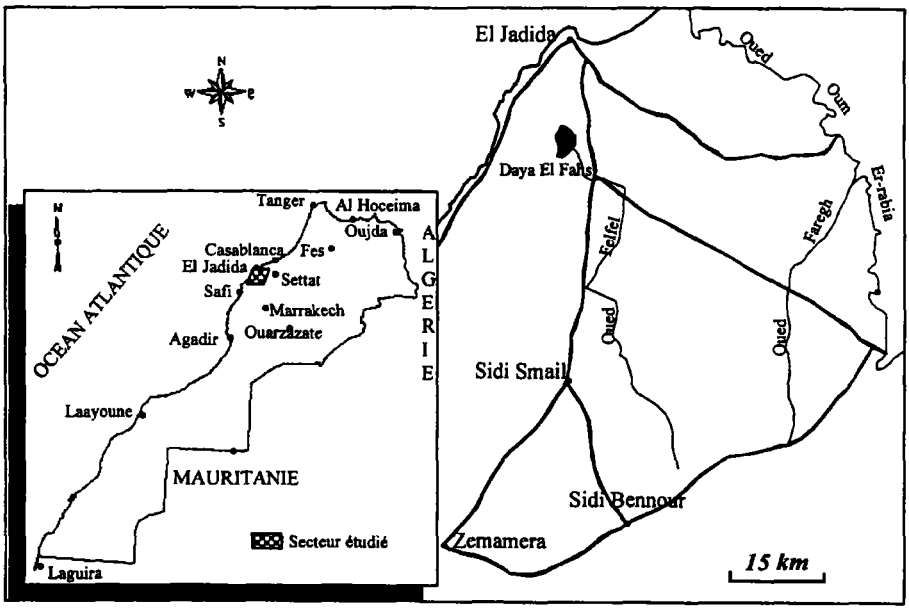


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

- des photographies aériennes au 1 : 20 000 datant de 1986;
- une carte piézométrique de la zone d'étude pour la période 1984 - 1985 (CHTAINI, 1987).

2. Méthodologie

L'ensemble des étapes suivies et des produits obtenus est représenté dans l'organigramme méthodologique de la figure 2.

2.1. Analyse des images TM

Après correction géométrique de l'image TM de la région, on a procédé à l'extraction de l'information concernant l'humidité du sol et le réseau de drainage.

2.1.1. Détermination de l'humidité du sol

L'information concernant l'humidité du sol a été obtenue en appliquant deux techniques différentes : la transformation de type chapeau haut-de-forme et le rapport des bandes TM5/TM7.

La transformation du chapeau haut-de-forme est une technique qui consiste en une combinaison linéaire des bandes originales de TM permettant ainsi de générer de nouvelles composantes dont les trois premières sont la brillance (*Brightness*), la verdure (*Greenness*) et l'humidité (*Wetness*). Les composantes brillance et verdure définissent le plan de végétation, la brillance et l'humidité définissent le plan des sols, alors que la verdure et

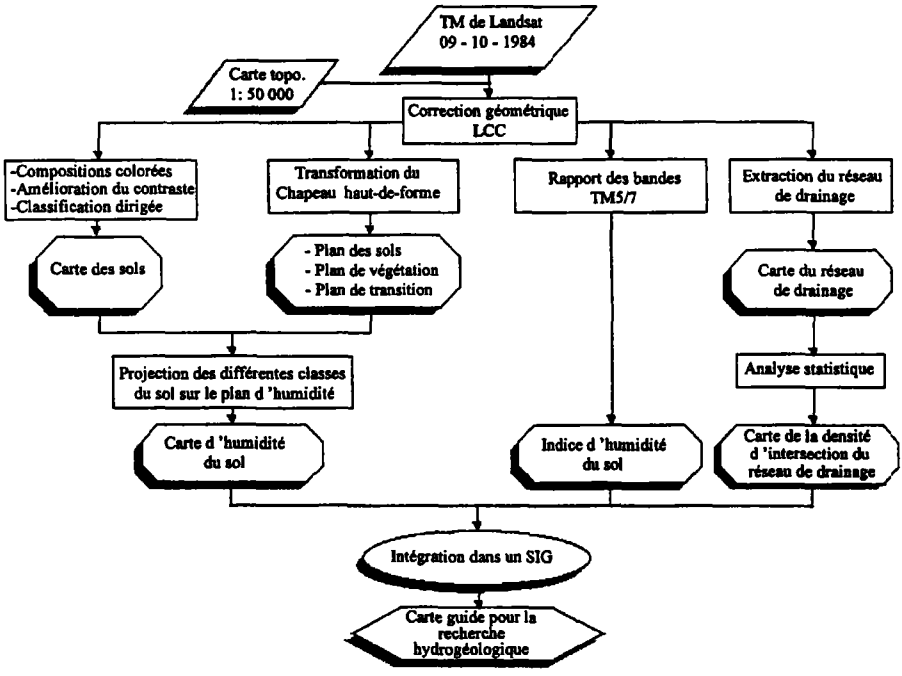


Figure 2. Organigramme méthodologique

l'humidité définissent le plan de transition (KAUTH and THOMAS, 1976; CRIST and CICONE, 1984). L'application de la transformation du chapeau haut-de-forme sur la zone d'étude a généré trois nouvelles images. Sur la figure 21-3 (voir cahier couleur), on montre les plans végétation, sols et transition, obtenus pour les données TM de la zone d'étude. Sur ces plans, on a projeté les différentes classes des sols obtenues par une classification dirigée basée sur la méthode du maximum de vraisemblance de la zone d'étude (figure 21-4) (voir cahier couleur). L'analyse de la disposition des classes en présence sur le plan des sols a permis de les reclasser selon leur degré d'humidité.

Le rapport des bandes TM5/7 est sensible à l'humidité du sol qui prend de fortes valeurs au fur et à mesure que l'humidité augmente (MUSICK and PELLETIER, 1986; BATELAAN and DE SMEDT, 1994). L'application de la méthode sur la région du Sahel central des Doukkala a permis de définir les zones plus humides qui peuvent être des zones de recharge, d'écoulement ou de décharge d'eau ou bien une zone de transition.

2.1.2. Analyse du réseau de drainage

Dans le but d'obtenir une carte de la densité d'intersection du réseau de drainage, on a procédé au rehaussement et à l'extraction des structures linéaires liées au réseau de drainage (humide et sec) suivis d'une analyse statistique. Le rehaussement des structures linéaires a été effectué en appliquant les filtres de MOORE (1983). Sur la figure 5, on montre le résultat du relevé du réseau de drainage obtenu par cette démarche.

Pour l'analyse statistique, on a choisi les linéaments de longueur supérieure à un kilomètre et on a dressé une carte de densité d'intersection des linéaments qui correspond aux zones d'infiltration maximale des eaux (BROOK, 1988).

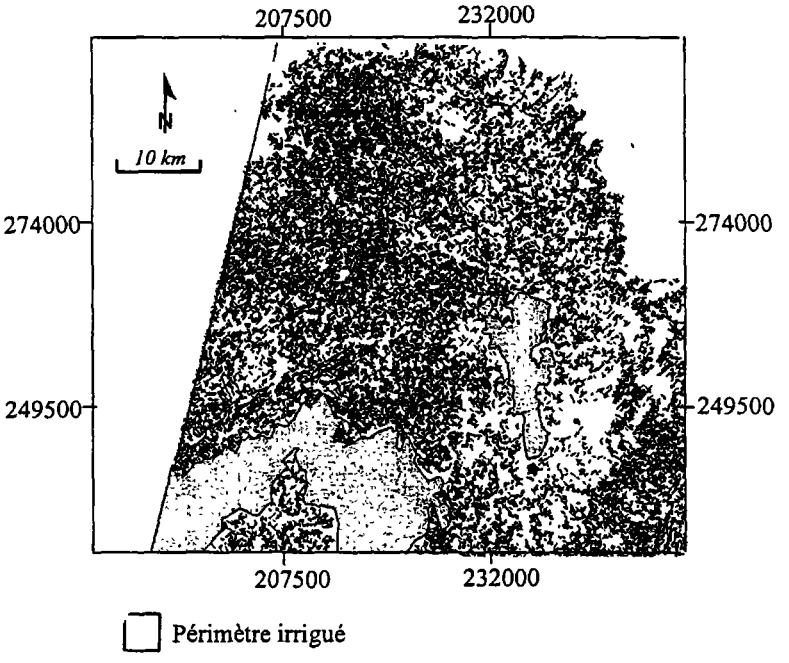


Figure 5. Carte du réseau de drainage détecté par la méthode de MOORE

2.2. Intégration des données dans un SIG

Chacune des cartes établies dans les étapes précédentes est transformée en code binaire, et ensuite représentée comme une couche d'information dans le SIG. Une simple multiplication entre ces différentes couches a permis de localiser les régions qui répondent le mieux aux conditions d'occurrence d'eau souterraine à savoir les zones représentant à la fois une humidité du sol et une forte densité du réseau de drainage.

3. Résultats

L'évaluation de la classification obtenue s'exprime par une matrice de confusion (tableau 1) qui montre une précision globale de l'ordre de 77 %.

La carte d'humidité obtenue à partir de la transformation du chapeau haut-de-forme (figure 6) contient deux grandes classes, la première correspond à la classe des zones humides dans laquelle on a regroupé l'eau, la végétation, les sols isohumiques et les calcimagnésiques, alors que la deuxième est celle des zones non humides où on a regroupé les sols fersiallitiques, les sols peu évolués, les sols minéraux bruts et le bâti.

Le rapport des bandes TM5/TM7 a permis de dresser une carte d'humidité (figure 7) correspondant à des zones de recharge ou de transition.

Les deux cartes d'humidité obtenues sont corrélées à 75 % (BATELAAN and DE SMEDT, 1994), ce qui nous pousse à les considérer toutes les deux pour l'établissement de la carte finale.

Tableau 1. Matrice de confusion de la classification dirigée de l'image TM de la zone d'étude.

TERRAIN / CLASSIFICATION	cl 1	cl 2	cl 3	cl 4	cl 5	cl 6	cl 7	cl 8	cl 9	cl 10	cl 11	Total
Calcimagnésiques à faible charge (cl 1)	14	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	22
Calcimagnésiques à moyenne charge (cl 2)	3	20	3	0	0	0	0	0	0	0	0	26
Calcimagnésiques à forte charge (cl 3)	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Isohumiques (cl 4)	1	0	1	6	0	0	0	0	0	0	1	9
Fersiallitiques (cl 5)	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3
Fersillitiques ensablés (cl 6)	0	0	0	0	3	10	0	0	0	0	0	13
Sols minéraux bruts (cl 7)	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	0	5
Sols peu évolués (cl 8)	0	1	2	0	0	0	0	11	1	0	0	15
Bâti (cl 9)	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
Végétation (cl 10)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	11	0	12
Eau (cl 11)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Total	18	21	8	14	6	11	4	11	4	11	3	111

L'analyse et le calcul de la densité d'intersection des linéaments (figure 8) nous montre l'existence de deux zones de forte densité qui correspondent à des zones d'alimentation de la nappe souterraine. Ces zones sont situées au SE du Jorf Lasfar et au niveau de Had Ouled Fraj.

L'intégration et la multiplication des différentes couches d'informations obtenues (humidité du sol et densité du réseau de drainage) dans un SIG a permis d'élaborer une carte finale (figure 9) où sont délimitées les zones à fort potentiel hydrogéologique. Ces zones sont en nombre de deux, l'une localisée au SE du Jorf Lasfar et l'autre au NE du Sidi Smail.

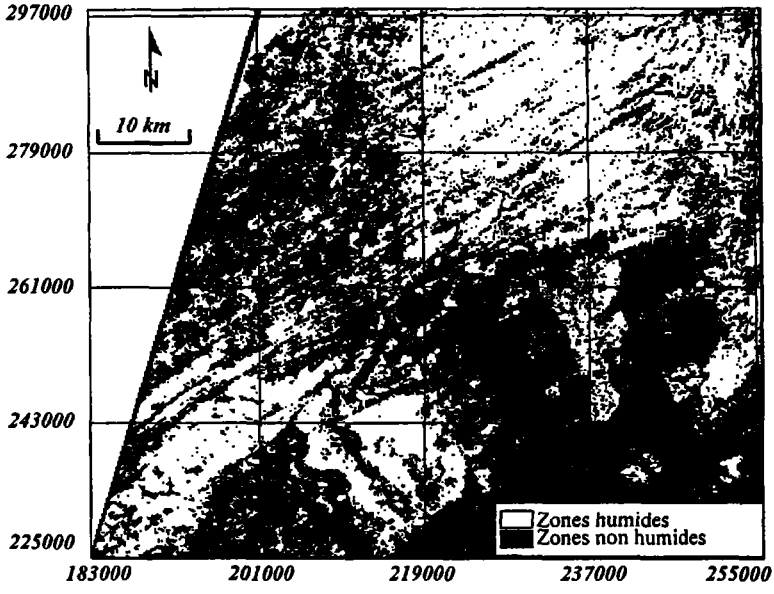


Figure 6. Carte de l'humidité du sol obtenue par application de la transformation du chapeau haut-de-forme

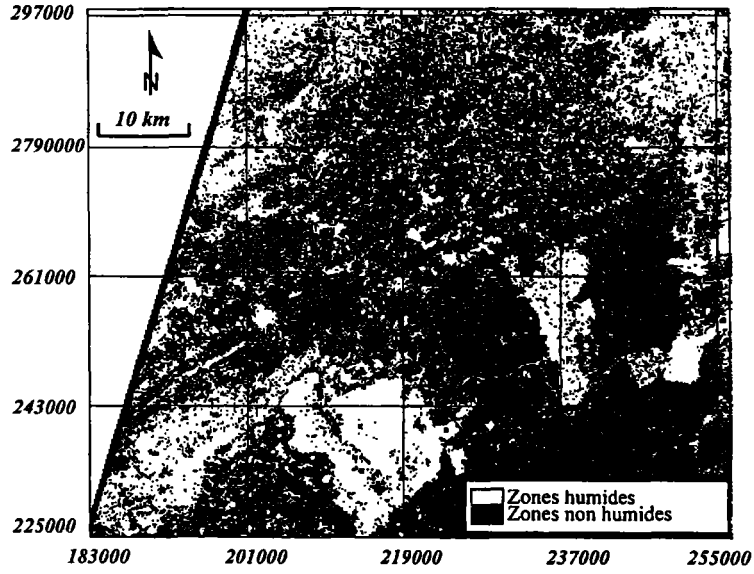


Figure 7. Carte d'humidité du sol issue du rapport des bandes TM5/TM7

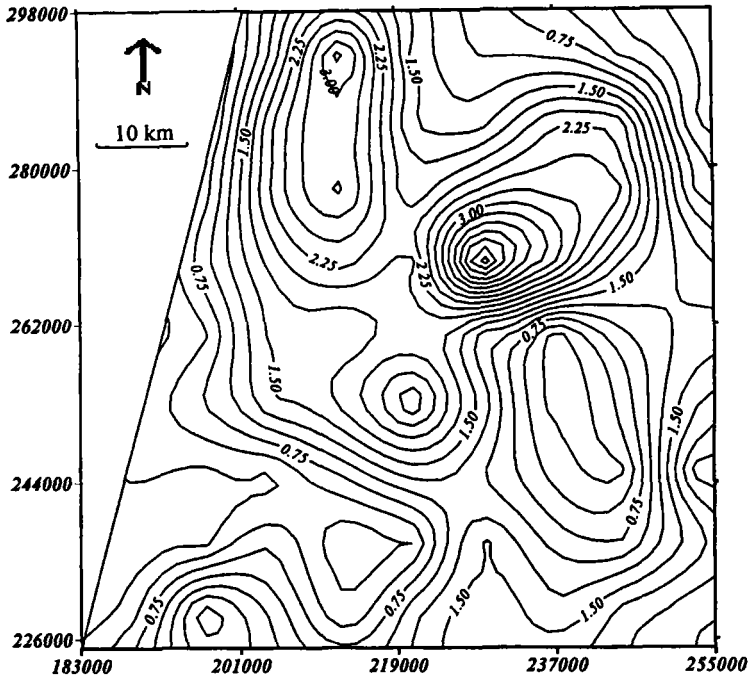


Figure 8. Carte de la densité du réseau de drainage

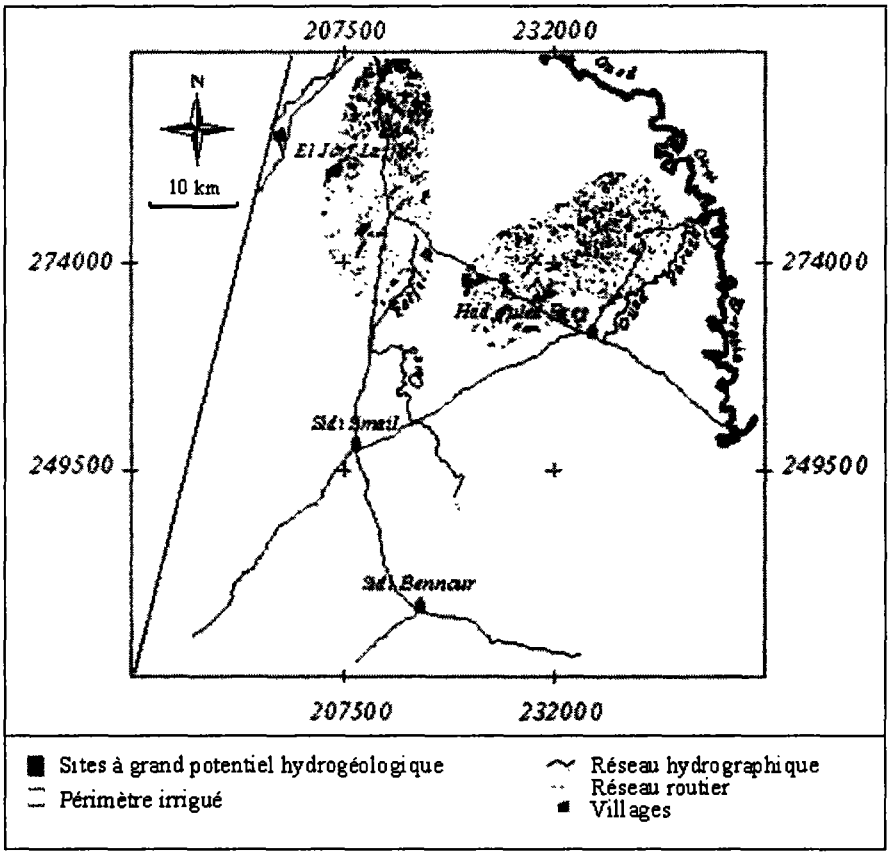


Figure 9. Carte de localisation des sites favorables à l'implantation des forages

4. Discussion des résultats

La carte piézomètrique régionale et les observations continues des piézomètres au niveau de la région d'étude montrent que la nappe souterraine est alimentée au niveau de deux zones, l'une à proximité de Sidi Smail et l'autre au SE du Jorf Lasfar. Au niveau de Sidi Smail, l'alimentation est assurée par les eaux d'irrigation, alors qu'elle est d'origine profonde au SE du Jorf Lasfar (CHTAINI, 1987).

La carte obtenue par notre étude délimite les mêmes zones d'alimentation de la nappe, ce qui confirme que la méthodologie appliquée est efficace pour la recherche hydrogéologique dans cette région.

5. Conclusion

L'utilisation simultanée des techniques de traitement numérique d'images satellitales et d'un SIG a permis de localiser les sites les plus favorables aux implantations futures des forages, ce qui permettra un gain du temps et une réduction du coût d'investigation hydrogéologique. La méthodologie adoptée dans cette étude peut être appliquée à d'autres régions avec quelques adaptations appropriées au site étudié. Cependant l'exploitation des données géophysiques et thermiques au niveau des zones déjà délimitées est souhaitable en vue d'une meilleure précision dans la localisation des sites proposés pour l'implantation des forages.

6. Remerciements

Les auteurs remercient le Centre National de Télédétection Spatial du Ministère de l'Agriculture (Maroc) pour son soutien logistique.

7. Références

ANDERSSON, C., BENABDERRAHMANE, A., BYSTRÖM, J. and ÖBERG, M., 1992. Remote sensing as a tool in groundwater assessment. Hydrogéologie, n° 1-2, p. 93-99.

BATELAAN, O. and DE SMEDT, F., 1994. Use remote sensing in groundwater discharge identification. European GRASS, Users Meeting, Paris, p. 1-19.

BROOK, G. A., 1988. Hydrological factors influencing well productivity in cristalline rock regions of Georgia Southeastern. Geology, vol. 29, p. 65-81.

CHTAINI, A., 1987. Etude hydrogéologique du Sahel des Doukkala (Maroc).Thèse de doctorat, Université scientifique et médicale de Grenoble, 159 p.

CRIST, E.P. and CICONE, R.C., 1984. A physically-based transformation of Thematic Mapper data - The TM tasseled cap. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-22, n° 3, p. 343-352.

FERRE, M. et RUHARD, J. P., 1975. Le bassin des Abda-Doukkala et du Sahel de Azemmour à Safi. Note et Mémoire du Service Géologique du Maroc, n° 231, p. 261-297.

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 of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, Indiana, p. 4B-41-4B-50.

MUSICK, HB. and PELLETIER, R.E., 1986. Response of some Thematic Mapper band ratios to variation in soil water content. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, n° 10, p. 1661-1668.

MOORE, G.K., 1983, Objective procedures for lineament enhancement and extraction. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 49, n° 5, p. 641-647.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 215-223

22

Appréhension de la cinématique paysagère par télédétection spatiale en estuaire de Seine (Normandie, France) : contribution au Programme national de recherche sur les zones humides

ALBAN BOURCIER, JEAN-CÔME BOURCIER et THOMAS POUCHIN

Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales (CIRTAI), Groupe « Environnement & Estuaire », Université du Havre, 25, rue Lebon, 76057 Le Havre Cedex, France; téléphone : + 33 (0) 2-32-74-41-35; télécopieur : + 33 (0) 2-32-74-41-34; courriel : alban.bourcier@univ-lehavre.fr

Résumé

Un secteur important de l'estuaire de la Seine (Normandie, France) est couvert de zones humides. Leur spécificité, leur grande richesse et leur rareté ont déterminé la création d'une équipe scientifique pluridisciplinaire, travaillant dans le cadre du programme national de recherche sur les zones humides (PNRZH). L'équipe « Environnement & Estuaire » du Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales est une des neuf composantes scientifiques retenues dans le cadre du programme et il travaille principalement à l'aide de l'imagerie aérospatiale pour étudier la dynamique paysagère et plus particulièrement les transformations ayant trait aux zones humides. L'image satellitale s'offre comme un moyen efficace d'observation et de caractérisation des entités paysagères, tout en facilitant la reconnaissance et l'identification des principaux changements d'état. Une base de données géographiques a donc été constituée à partir d'une série chronologique comportant des enregistrements répartis sur dix ans. Les différentes procédures utilisées ont permis de mieux décrire les structures spatiales et de transformer les données contenues dans l'image en information géolocalisée directement exploitable par le biais de spatiocartes.

Les meilleurs résultats ont été obtenus par l'intermédiaire de combinaisons multidates sélectionnées en fonction de leur aptitude à mettre en évidence un type d'évolution.

1. Introduction

Un secteur important de l'estuaire de la Seine (Normandie, France) est couvert de zones humides. Leur spécificité, leur grande richesse et leur rareté ont déterminé la création d'une équipe scientifique pluridisciplinaire, travaillant dans le cadre du Programme national de recherche sur les zones humides (PNRZH). L'équipe « Environnement & Estuaire » du Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales (CIRTAI) est une des neuf composantes scientifiques retenues dans le cadre du PNRZH en estuaire de Seine. Cette cellule de recherche œuvre depuis quatre ans à l'élaboration d'un système d'informations territoriales (SIT) centré sur le site estuarien et travaille principalement à l'aide de l'imagerie aérospatiale pour étudier la dynamique paysagère et plus particulièrement les transformations ayant trait aux zones humides (LYON and Mc CARTHY, 1995). Dans cette optique, le paysage est utilisé comme principal support pour opérer une partition méthodique de l'espace puisqu'il semble être un témoin significatif des mutations importantes qui affectent le milieu estuarien. L'observation du paysage sur une durée de 11 ans (1987 à 1998) a permis d'isoler des zones en proie à certains phénomènes particulièrement dynamiques. Le marais du Hode (figure 1), en rive droite de l'estuaire, offre un important domaine composé de prairies humides, de vasières nues (slikke) et de vasières végétalisées (schorre) en fonction d'une organisation spatiale obéissant à une répartition auréolaire à partir de l'axe fluvial. Cette zone a été retenue comme le secteur en mutation le plus significatif des transformations en cours dans l'estuaire de la Seine. En effet, elle se caractérise par la diversité des acteurs de l'aménagement et de la planification régionale qui interviennent régulièrement sur ce territoire. Une variété de conflits d'usages liés à la gestion de l'eau et à l'implantation de nouveaux équipements d'aménagement oppose chasseurs, gestionnaires du port autonome du Havre, écologues, agriculteurs et pêcheurs. Aussi, le développement de la zone industrielle et portuaire du Havre, l'implantation du pont de Normandie, l'extension des dépôts de déchets ou encore le futur

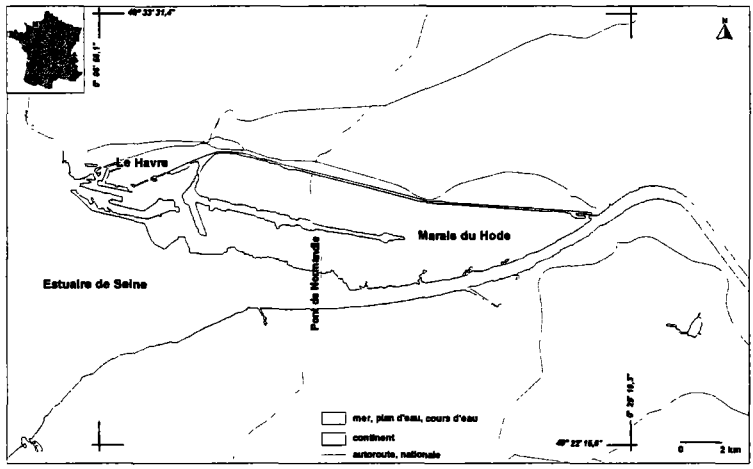


Figure 1. L'estuaire de la Seine

terminal conteneur Port 2000 sont autant d'atteintes à l'intégrité de cette zone humide désormais classée en réserve naturelle. Enfin, les surfaces de vases nues, vitales pour la majeure partie de la faune (oiseaux limicoles, poissons, etc), disparaissent très rapidement au profit de la roselière. Ce phénomène est le témoin d'une sédimentation particulièrement importante et spectaculaire causée notamment par l'endiguement progressif et l'entretien du chenal navigable de la Seine. Les études diachroniques menées grâce à la télédétection aérospatiale nous ont permis de dresser un synopsis des mutations paysagères dans l'estuaire de la Seine. Après avoir isolé les zones particulièrement dynamiques, nous avons quantifié ces mouvements en terme de surface. La quantification régulière (année après année) de la transformation d'un milieu permet de dresser un graphique dont la courbe illustre bien la tendance d'évolution du phénomène. Il est alors possible de prévoir les évolutions futures, mais aussi de régler le pas d'acquisition des données en fonction de la rapidité d'évolution.

2. Objectifs

L'image satellitale s'offre comme un moyen efficace d'observation et de caractérisation des entités paysagères, tout en facilitant la reconnaissance et l'identification des principaux changements d'état. Une base de données géographiques (BDG) en mode image a donc été constituée à partir d'une série chronologique comportant neuf enregistrements répartis sur dix ans. Ainsi, le développement de la zone industrielle et portuaire du Havre, la construction d'un des plus longs franchissements à haubans du monde (le pont de Normandie), l'accentuation de la sédimentation sur l'estran, ou encore les premiers chantiers relatifs à l'extension du port du Havre (Port 2 000) sont autant de phénomènes qui ont pu être observés à intervalles réguliers de manière à mieux cibler les études d'impact et contribuer au diagnostic territorial. Six images multibandes HRV de SPOT (1987, 1990, 1992, 1993, 1994 et 1997), combinées à trois enregistrements en mode panchromatique (1988, 1991 et 1998), ont donc fait l'objet d'un calage dans un système de coordonnées de référence (géoréférencement national) avant d'être importées au sein d'un système d'informations géographiques (SIG) comptant à ce jour 74 strates (BOURCIER *et al.*, 1998). Quelques clichés aériens verticaux panchromatiques et infrarouges ont été également numérisés et intégrés pour les analyses détaillées à grande échelle (1 : 10 000). Au terme de cette phase de prétraitements, des tests d'interprétation analogique (visuelle) ont permis de sélectionner plusieurs composés diachroniques en fonction de leur aptitude à mettre en évidence un type d'évolution, révélé ici par un changement d'occupation du sol. Ces compositions colorées multidates sont ensuite employées pour qualifier, mais aussi quantifier (pourcentages de couverture au sol), les mutations du paysage. Il est plus facile de dégager ensuite les grandes dynamiques évolutives de chaque thème (agriculture, végétation, urbanisation, infrastructures de transports, etc.) et d'identifier les zones de conflit d'usage sur requêtes spatiales au moyen du SIG. L'expérimentation principale vise à étudier l'évolution des vasières du Hode sur la rive nord de l'estuaire de la Seine, à proximité du site d'implantation du pont de Normandie. Il ne s'agit pas d'élaborer ici une cartographie des évolutions, mais de mesurer l'écart entre plusieurs états du paysage.

3. Environnement de travail et protocole méthodologique

Une série chronologique (tableau 1) couvrant un intervalle temporel de 10 ans a été constituée à l'aide de 9 images satellitales HRV de SPOT panchromatiques et multibandes dans le but de mieux appréhender la cinématique paysagère dans l'estuaire de la Seine. Des clichés aériens zénithaux panchromatiques et infrarouges numérisés à 1 m de résolution ont été intégrés dans cette base de données géographiques (BDG) pour optimiser les études à très grande échelle et faciliter le travail de reconnaissance.

La BDG a été géoréférencée selon la projection conique conforme de Lambert et calée selon le système de coordonnées de référence de la zone Lambert 1 (système local du Nord de la France). Ces prétraitements géométriques ont permis l'intégration des images satellitales dans le système d'informations territoriales de l'estuaire de la Seine dans le but d'effectuer plusieurs analyses relevant de la combinatoire de données issues d'environnements distincts. Le logiciel de traitement d'image Multiscope NT version 3.0 béta et les SIG MapInfo et Arc/Info sont utilisés pour gérer et exploiter ces bases de données géographiques.

La cinématique paysagère de l'estuaire de Seine, révélée à court terme par les mutations opérées au sein des zones humides, a été étudiée à l'aide de composés diachroniques. Malgré l'absence de corrections atmosphériques, il est possible d'entreprendre une analyse multidate par différence entre deux ou trois images enregistrées à des dates distinctes (PÉDRON, 1988). Il suffit d'être prudent quant à l'interprétation des nuances colorées les moins marquées. La détection des changements peut être améliorée par une composition colorée formée de trois canaux résultant de la différence ou du rapport entre chacune des bandes spectrales d'une première image sur les mêmes canaux d'une deuxième et d'une troisième image.

Les configurations utilisées pour les études diachroniques font alors appel à des images dont les couleurs ne doivent plus être considérées comme révélatrices d'une thématique particulière. En effet, si le codage coloré est toujours dépendant des radiométries, la

Tableau 1. Série chronologique de l'observatoire du paysage estuarien

Date	Type de données	Mission / KJ	Résolution géométrique (m)	Intervalles radiométriques
31-05-1997	Image HRV de SPOT	35-250	10	P
12-03-1997	Image HRV de SPOT	35-250	20	R, V, PIR
22-07-1994	Image HRV de SPOT	34-250	20	R, V, PIR
1994	Clichés aériens	1 : 30 000	1	P
26-06-1996	Image HRV de SPOT	34-250	20	R, V, PIR
10-10-1992	Image HRV de SPOT	35-250	20	R, V, PIR
29-08-1991	Image HRV de SPOT	34-250	10	P
04-05-1990	Image HRV de SPOT	34-250	20	R, V, PIR
26-11-1988	Image HRV de SPOT	34-250	10	P
24-05-1987	Image HRV de SPOT	34-250	20	R, V, PIR
1985	Clichés aériens	1 : 20 000	1	P, PIR
1979	Clichés aériens	1 : 30 000	1	P

Notes : P = Panchromatique R = Rouge V = Vert PIR = Proche Infrarouge

combinaison d'images enregistrées à des dates différentes impose un autre mode d'appréhension de la couleur : les variations de teintes caractérisent désormais un type d'évolution en cours ou réalisée. Il faut insister sur le fait que ce type d'analyse suppose que les images à comparer aient au moins la même géométrie. Il convient alors de les transformer pour qu'elles deviennent superposables à une image présentant la précision géométrique souhaitée. La combinaison d'images prises à des dates différentes dans la même bande spectrale peut constituer un moyen additionnel pour étudier l'occupation des sols (BONN et ROCHON, 1992).

En utilisant une couleur primaire différente pour afficher trois observations espacées dans le temps d'une série d'images HRV de SPOT, il est possible de générer des compositions colorées offrant au photo-interprète une forme de synthèse de l'information spectrale perçue sur une période donnée. La méthode traditionnelle vise la création d'une composition colorée formée de trois images d'un même territoire espacées dans le temps. Seules sont alors représentées en gris les réflectances du sol qui n'ont pas changé. En outre, les couleurs révèlent les endroits où des changements sont intervenus à l'une ou l'autre des dates considérées. Une tel traitement s'applique bien au repérage des structures, dont le comportement radiométrique est connu et qu'il faut rechercher dans la bande spectrale où elles apparaissent le mieux (BOURCIER, 1993). Il a été démontré qu'une image est d'autant plus intéressante à observer que l'information y est plus contrastée, c'est-à-dire qu'elle s'écarte (statistiquement) de l'information moyenne (l'écart type ou variance) servant de mesure à la richesse de l'information (BOURCIER, 1994). Tout comme pour une analyse sur les bandes spectrales d'une même prise de vue, celle appliquée à partir d'une même bande spectrale, mais enregistrée à des dates différentes, va créer de nouveaux plans image à partir des canaux originaux. Cette opération va permettre une meilleure identification des classes de pixels homogènes révélant une évolution. Les tendances évolutives du paysage sont définies à travers des trajectoires dans un espace factoriel de référence.

En effet, en projetant dans le même espace factoriel les images de 1987, 1990 et 1992 (dates des plus grands changements), chaque axe résultant de l'analyse en composantes principales donne lieu à la création d'un néocanal dont les valeurs correspondent à la distance parcourue par les pixels dans cet espace. Une représentation synthétique de cette évolution peut également être fournie par l'affichage d'images trichromes intégrant les axes principaux de chaque enregistrement qui fournissent les plus fortes variances et ayant donc le plus grand pouvoir explicatif.

4. Mise en évidence de la cinématique des zones humides

Au terme d'une analyse consacrée à la reconnaissance des unités paysagères des zones humides en usant de procédures variées de traitement de l'image satellitaire (BOURCIER *et al.*, 1998), il convient de montrer que le paysage n'est pas une constante, mais qu'une observation sur un laps de temps relativement court de quelques années suffit pour mettre en évidence la dynamique de l'environnement dans un secteur sensible.

La première étape opérationnelle a été d'étudier, entre 1985 et 1990, le recul des vasières nues au profit des vasières végétalisées par confrontation des différentes lignes de partage entre ces deux domaines. La ligne de référence de cette étude est issue d'une interprétation d'un cliché aérien proche-infrarouge au 1 : 20 000 enregistré en 1985 sur lequel il a été possible de repérer les deux unités paysagères d'intérêt (la slikke et le schorre). Cette opération ne pouvait pas être menée sur la carte topographique du Havre (révision 1989)

dans la mesure où la limite cartographiée correspond à la laisse des plus hautes mers et que la dimension paysagère n'apparaît pas sur ce type de document. Ensuite, il a fallu retracer, à partir de l'image multibande HRV de SPOT de 1987, la nouvelle limite séparant les herbus des vases nues. La superposition des deux premières lignes de partage tracées à l'aide de couleurs différentes sur la spatiocarte élaborée a fait d'ores et déjà ressortir quelques évolutions : la plus flagrante est le colmatage du chenal de drainage principal, alors que les travaux d'implantation du pont de Normandie ne sont pas encore commencés.

Ensuite, il a été aisé de repérer la progression des herbus sur les vases nues, en particulier à l'ouest du chenal en cours de colmatage. En revanche, le chevelu de drainage oriental semble s'être développé.

Le deuxième stade de l'évolution a été obtenu par l'interprétation de l'image de 1990. Le tracé matérialisant la nouvelle limite entre les deux secteurs étudiés constitue une troisième information qui a été confrontée à la ligne de partage des eaux de 1987. Le colmatage du chenal de drainage s'est accentué et la progression des herbus apparaît encore plus nettement, au même titre que quelques groupements pionniers localisés sur les vases nues. Il faut également noter, sur cette image, le début des travaux d'aménagement de la petite vasière artificielle dont la réalisation a été décidée dans le cadre des mesures compensatoires du pont de Normandie. La comparaison des limites de 1987 et de 1990 met en évidence l'importance des transformations survenues dans ce secteur de vasières. Le chevelu de drainage oriental s'est effectivement développé aux dépens du chenal principal localisé à l'est du pont de Normandie. Cet axe d'écoulement subit de plein fouet l'accélération de la sédimentation et son colmatage est un phénomène qui prouve l'atterrissement des vasières. L'évacuation des eaux pose moins de problèmes par l'autre artère, ce qui explique sa croissance. À terme, le premier site va se retrouver à l'intérieur des terres émergées et éloigné du fleuve, tandis que le second va conserver sa position actuelle par rapport au chenal de Rouen et assurer le drainage des vasières.

Quelques travaux de diagnostic opérés sur l'image d'octobre 1992 et de mars 1997 permettent de contempler l'ampleur des transformations 10 ans après la première observation. Il faut tout particulièrement retenir l'étendue de la vasière artificielle, identifiable par sa forme en arborescence.

Cette étude ponctuelle permet de confirmer plusieurs diagnostics qui ont été émis quant à l'évolution prochaine de l'estuaire de la Seine. Les digues construites en travers de la progression de la marée et le remblai du pont de Normandie renforcent incontestablement la sédimentation. De plus, le front de végétation, qui colonise ensuite les vases nues stabilisées, progresse d'environ 50 à 100 m par an. Le recul des vasières nues au profit des roselières et celui de ces dernières au profit des prairies humides semblent donc inexorables (BOURCIER et FRUIT, 1995).

5. Analyse des changements à l'aide de composés diachroniques

Il ressort de l'analyse précédente que la plupart des phénomènes paysagers sont spatialement interdépendants. Par conséquent, les aménageurs doivent faire face à des problèmes complexes pour l'étude de systèmes spatio-temporels. L'expérience précédente a permis d'exposer l'intérêt des études d'évolution en privilégiant l'analyse comparative. Cependant, seuls les changements de grande envergure ou ceux intervenus dans une thématique au centre des préoccupations ont pu être identifiés. Un certain nombre de techniques permettant de mieux analyser et gérer les transformations qui surviennent dans les milieux humides ont été validées dans le cadre de cette recherche.

Une étude détaillée des changements intervenus à proximité du pont de Normandie a été menée par l'intermédiaire de plusieurs composés diachroniques autorisant la comparaison du paysage entre deux dates. Les documents sont toujours constitués d'après le même modèle : les deux premiers axes principaux de l'image la plus récente sur les plans rouge et vert, ainsi que le premier facteur de l'image la plus ancienne sur le plan bleu. L'analyse effectuée a porté sur la reconnaissance des mutations détectées dans le marais du Hode entre 1987 et 1997.

Les travaux relatifs à l'implantation du pont de Normandie apparaissent très nettement. L'extension du dépôt de phosphogypses se détache sans difficulté des accumulations antérieures à mai 1987 et l'ensemble apparaît colonisé par les formations herbacées après sa fermeture et sa réhabilitation. Les principales surfaces conquises par la végétation intéressent les secteurs de vase nue colonisés par les herbus. L'analyse des derniers enregistrements multispectraux montre que la progression des formations végétales sur les vases nues est encore très marquée dans le secteur du pont, mais semble ralentir dans la partie est.

6. Le recours à d'autres combinaisons linéaires multidates

L'utilisation combinée des indices de végétation normalisés élaborés pour chaque enregistrement multibande a permis de prendre connaissance des variations temporelles qui s'opèrent au niveau des formations végétales. La configuration visualisée admet respectivement sur les plans rouge, vert, bleu, les indices de 1992, 1990 et 1987 (figure 22-2) (voir cahier couleur). Les vases nues apparaissent en gris foncé (1), l'eau en noir (2) et les formations végétales qui n'ont guère évolué en blanc (3). Toutes les autres couleurs sont révélatrices d'une évolution de la biomasse verte. Il est possible de localiser en bleu foncé les espaces encore végétalisés en mai 1987 (4), qui ont été transformés en surfaces artificialisées. En cyan apparaissent les secteurs dont la mutation est postérieure à mai 1990 (5). En vert interviennent les surfaces qui étaient recouvertes de végétation seulement en 1990 (6) et en rouge (7) celles qui l'ont été en 1992. Les composantes en vert-jaune révèlent des aires artificialisées qui ont été récupérées par le domaine végétal après l'enregistrement de 1987, mais dont la réponse spectrale de 1990 s'affirme sur celle de 1992 compte tenu de la saison (mai pour 1990 et octobre pour 1992). Il faut citer comme exemple certaines parcelles agricoles et les premières terres conquises par les roselières au détriment des vases nues (8). Le magenta est plus difficile à interpréter dans la mesure où il peut traduire une réponse un peu plus forte des données de 1992 par rapport à celles des autres années (rouge clair, rose) ou le dépérissement des formations végétales en 1990. Dans tous les cas, cette couleur signale une reprise de l'activité chlorophyllienne. La seconde proposition s'est vérifiée dans le domaine des roselières avec l'aire de chantier qui a été provisoirement aménagée pour la réalisation de la vasière expérimentale (9).

Il semble donc que les variations temporelles d'indices de végétation révèlent avec une remarquable précision les mutations opérées au niveau de la biomasse verte.

7. Conclusion

L'observatoire paysager aide à mieux comprendre le fonctionnement du territoire estuarien et son évolution. Il convient de rappeler avant tout la pertinence des analyses statiques répétées. En effet, la collecte d'une série d'images satellitaires sur plusieurs années permet donc de dégager la logique de développement d'un site. Par simple analyse de situations différentes, l'organisation temporelle du développement d'une zone est facilement décelable. La comparaison de plusieurs états du paysage permet de vérifier le bilan interprétatif dressé à une date donnée et de confirmer ou non les tendances évolutives dégagées.

Les applications exposées montrent qu'incontestablement l'imagerie HRV de SPOT apporte sa contribution à une meilleure connaissance des milieux, à leur protection et à leur développement. En terme d'aménagement, elle peut intervenir dans la réalisation d'un état initial du milieu récepteur d'un projet d'équipement afin de mettre en évidence les contraintes de l'environnement et d'étudier les impacts prévisibles sur ce milieu. De plus, le bilan sur l'apport des combinaisons temporelles semble convenir aux objectifs de veille environnementale.

L'intérêt de la télédétection diachronique pour le suivi des paysages se résume à sa capacité de mettre en évidence de manière automatique les mutations dans l'occupation des sols. L'interprétation d'une image des changements permet de localiser les secteurs en évolution et de rendre compte, éventuellement, du type de mutations en cours ou réalisées. Une telle démarche pourrait permettre de rationaliser les actions de gestion du territoire de manière plus précise en n'ayant recours aux renseignements nécessaires que sur les seules zones intéressantes (ici les milieux humides). Les images de télédétection aérospatiale ont trouvé une nouvelle dimension lors de leur intégration dans le SIT, notamment grâce à la combinaison avec des informations vectorielles. Les spatiocartes résultantes sont des documents de travail fiables, précis et complètement opérationnels pour orienter les missions sur le terrain (BOURCIER *et al.* 1998).

Au-delà des préoccupations exprimées au sujet de l'embouchure de la Seine, il faut reconnaître que les estuaires constituent des zones de convoitise qui se caractérisent par un dynamisme important perceptible à moyen terme. Forts des tests effectués sur l'estuaire de Seine et de l'expérience acquise, la mise en place d'un programme de recherche sur les estuaires européens de l'Atlantique nord devrait nous permettre de vérifier la répétitivité et la transposabilité de cette méthode d'observation sur d'autres sites estuariens. Les investigations ont déjà débuté sur le Solent (Grande-Bretagne) et l'Elbe (Allemagne). Les secteurs du Tage (Portugal) et de la Gironde (France) sont d'ores et déjà prévus. À terme, il s'agit de mettre à disposition des acteurs de l'aménagement toute une série d'indicateurs physiques (paysage) et fonctionnels (activités) par le biais d'une grille d'analyse comparative.

8. Références

BONN, F. et ROCHON, G. 1992. Précis de télédétection, Volume 1, Principes et méthodes, Presses de l'Université du Québec et AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.

BOURCIER, A. 1993. Une méthode originale pour le suivi des mutations paysagères - Cinématique de l'estuaire de la Seine (Normandie, France). 16ème Symposium canadien sur la télédétection et 8ème Congrès de l'Association québécoise de télédétection, La télédétection : un outil pour la modélisation et la gestion des changements environnementaux, p. 431-436.

BOURCIER, A. 1994. Télédétection & combinaison d'informations géographiques en mode image : application à l'aménagement de l'estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 421 p.

BOURCIER, J.-C., BOURCIER, A. et POUCHIN, Th. 1998, L'Observatoire des zones humides - Zones humides de l'estuaire et des marais de Seine : structure, fonctionnement et gestion. Rapport de l'exercice 1998, Projet pilote n° 48, Programme national de recherche sur les zones humides, Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales, Université du Havre, 234 p.

BOURCIER, A. et FRUIT, J.P. 1995. Développement industrialo-portuaire et qualité de l'environnement dans la vallée de la Seine (Haute-Normandie, France). Conférence régionale de l'Union Géographique Internationale (U.G.I.) sur Environnement et qualité de la vie en Europe Centrale - Problèmes de transition, 22-26 août 1994, Prague (République Tchèque), Support Cédérom.

BOURCIER, A., VAGUET, O. et VAGUET, A. 1998. Les références de terrain dans l'initialisation et la validation des traitements de données aérospatiales : contribution aux études environnementales multicritères. In DUBOIS, J.-M..M., BERNIER, M., FORTIN, J.-P. et BOIVIN, F. La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, p. 271-279.

LYON, J. and McCARTHY, J. 1995. Wetland and environmental applications of GIS. Lewis Publishers, 373 p.

PÉDRON, C. 1988. Intégration de données SPOT dans une banque de données urbaines : la localisation des chantiers. Photo-interprétation, vol. 88-2, p. 47-52.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 225-232

23

Essai méthodologique exploitant les images spatiales dans un SIG pour la protection des ressources en eau de surface au Maroc

ABDELKADER EL GAROUANI[1], RAOUF JABRANE[1] et ABDELAZIZ MERZOUK[2]

[1] *Laboratoire de géologie appliquée, Faculté des sciences et techniques Fès-Saiss, B.P. 2202 ; route d'Imouzzar, Fès-Saiss, Maroc; téléphone : 212 (5) 60 29 53; télécopieur : 212 (5) 60 82 14; courriel : garouani@caramail.com*

[2] *Laboratoire des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, avenue Allal Fassi, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc; téléphone/télécopieur : 212 (7) 77 85 12; courriel : merzouk@mtds.com*

Résumé

Face aux problèmes de la dégradation de la qualité des ressources en eau au Maroc, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes et des actions visant la préservation et la sauvegarde de ces ressources. La création des zones de protection constitue, entre autres, un des moyens les plus préventifs et curatifs pour cette sauvegarde. Le secteur d'étude concerne le barrage 9 Avril 1947, situé au Rif Occidental Marocain. Pour faciliter la gestion, le stockage et l'analyse des données nécessaires pour la délimitation des zones de protection, on a eu recours à un système d'information géographique (SIG). Cet article, fait ressortir l'opportunité de la mise en place d'un SIG pour la définition des zones de protection d'une ressource de surface pour l'alimentation en eau potable, à savoir la retenue d'un barrage. On y a également défini les différentes étapes nécessaires pour la conception d'un prototype intégrant les données de télédétection à un SIG, adapté à la délimitation de ces zones. Les images satellitales ont permis l'obtention d'informations thématiques précises (caractérisation de l'état de surface de bassin versant) pour une extrapolation spatiale des informations à partir de la connaissance de quelques données locales. Grâce

à leur répétitivité temporelle, ces images offrent aussi la possibilité de suivre le changement des caractéristiques du bassin versant.

1. Introduction

Au Maroc, les ressources en eau sont devenues plus vulnérables à la pollution et le problème de la qualité de l'eau s'accroît à terme en raison de l'augmentation des rejets polluants dans les milieux récepteurs sans traitement préalable. À cet effet, il est nécessaire de prendre toutes les mesures susceptibles de garantir la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable (ANONYME, 1992). La réalisation des périmètres de protection des ressources en eau constitue un outil important pour atteindre cet objectif.

La délimitation des zones de protection constitue un travail de grande envergure dans la mesure où, d'une part, elle nécessite beaucoup de temps pour la collecte des données et le suivi de certains paramètres à variation temporelle et, d'autre part, il s'agit d'un travail multidisciplinaire faisant appel à des expertises diverses (KRAUSE et LAMRHARY, 1995).

Les données utilisées sont diversifiées et géoréférencées (image HRV de SPOT, données cartographiques, etc.) et se rapportent à un espace bien défini. Pour leur gestion, leur enregistrement et leur analyse, l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) s'avère nécessaire (BETLAAN *et al.*, 1996). Cependant, la mise en place d'un SIG pour les zones de protection des eaux de surface interpelle des critères tels que l'objectif qu'on lui assigne, le volume, le type et la qualité des données de base, la complexité de l'analyse requise, l'échange d'information avec les organismes cibles pour la définition des zones de protection, etc. (EL GAROUANI, 1995)

Les besoins des services de l'état (Office national de l'eau potable, Direction de l'hydraulique, etc.) dans le domaine de la protection des ressources en eau sont :

- la gestion des bases de données géographiques et alphanumériques des ressources en eau ;
- la cartographie thématique;
- l'intégration de données spatiales provenant de divers formats (Arc/Info, ArcView, Idrisi, Access, Excel, etc.);
- les outils statistiques et d'analyse de données;
- la sélection d'objets, l'interaction et la localisation multicouches.

La région d'étude concerne le barrage 9 Avril 1947, mis en service en 1995, situé au Rif Occidental Marocain à environ 30 km au sud de la ville de Tanger et à 15 km à l'est de la ville d'Asilah. Le bassin versant a une superficie de 220 km^2 et des précipitations moyennes annuelles de 900 mm. La capacité utile de la retenue est de 270 millions de mètres cubes. Ce barrage, en mobilisant 90 millions de m^3/an en année normale, permettra en complément des ouvrages existants de couvrir les besoins en eau potable et d'irrigation de la région comprise entre Tanger et Asilah au-delà de l'horizon 2015. La retenue du barrage reçoit un apport solide de 609 000 tonnes/an à cause de l'érosion des versants favorisée par le déboisement (ANONYME, 1996).

2. Matériel et méthode

2.1. Concepts des zones de protection pour les eaux de surface

Pour faire face aux menaces par la pollution, dont l'importance diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la ressource à protéger de manière appropriée, on partage la région qui alimente la ressource en eau (le bassin versant) en plusieurs zones. Il s'agit de trois zones suivant la législation marocaine : la zone de protection immédiate (zone I), la zone de protection rapprochée (zone II) et la zone de protection éloignée (zone III) (ANONYME, 1995). La délimitation de ces zones fait appel à plusieurs disciplines et à diverses expertises (KRAUSE et LAMRHARY, 1995).

Dans la zone I, il faut assurer la protection contre la pollution de l'eau d'une retenue. La dimension de cette zone doit permettre :

- d'intervenir convenablement en cas d'accident;
- de supprimer chaque influence humaine;
- d'implanter une forêt ou une zone de végétation à vocation protectrice.

Dans la zone II, on doit assurer la protection contre la pollution et d'autres détériorations résultantes des diverses activités et aménagements humains, dont la proximité pourrait mettre particulièrement en danger les eaux de captage. En fin, dans la zone III, on doit assurer la protection des eaux contre les détériorations étendues, en particulier contre les pollutions persistantes ou difficiles à éliminer et contre la pollution chimique ou radioactive (ONEP-GTZ, 1995).

2.2. Préparation des données et choix des méthodes d'acquisition

L'opération d'acquisition de données à intégrer dans le SIG doit d'abord commencer par la délimitation de l'aire de l'étude pour permettre à l'utilisateur du SIG de procéder à la collecte des données qui seront la base des couches d'information et à les préparer convenablement en fonction de leur nature pour permettre leur enregistrement et leur analyse. Ces opérations de préparation concernent particulièrement la numérisation des cartes, la conversion et l'organisation des données (ESRI, 1994a).

L'étude du contexte de la retenue du barrage nous a permis d'identifier les flux d'information, de les analyser et de les rassembler sous forme de couches d'information comportant à la fois des données cartographiques et alphanumériques (tableau 1).

Pour délimiter les zones de protection autour des ressources en eau de surface, on procède à des ajustements et à des analyses multicritères en tenant compte à chaque fois d'un certain nombre de paramètres (tableau 1).

Pour automatiser les différentes opérations informatiques requises, on a établi un organigramme entrée/sortie qui illustre les différentes étapes de la délimitation des zones de protection (figure 1). Cet organigramme est le résultat de :

- l'examen des concepts utilisés pour l'élaboration des périmètres de protection d'une ressource en eau de surface;
- l'analyse des données techniques nécessaires pour la délimitation de ces périmètres.

Tableau 1. Couches d'information identifiées et utilisées pour la délimitation des zones de protection des ressources en eau

Couches thématiques d'entrée	Données alphanumériques correspondantes
- Morphologie et géographie	- Caractéristiques physiques du bassin versant
- Cadre administratif et cadastral	- Données statistiques de la population
- Occupation des sols	- Types des espèces forestières - Type des engrais utilisés, type des pesticides
- Foyers de pollution	- Descriptions des foyers de pollution
- Hydrogéologie	- Fluctuation piézomètrique
- Pédologie	- Caractéristiques des unités pédologiques
- Géologie	- Nature, caractéristiques et âge des roches
- Données sur l'ouvrage	- Caractéristiques générales de l'ouvrage
- Climatologie	- Pluviométrie et températures moyennes mensuelles
- Hydrologie	- Bilans hydrologiques, mesures de jaugeage, paramètres hydrologiques et qualité de l'eau
- Gestion de l'eau	- Besoins et productions en eau potable annuelles - Traitement de l'eau brute, qualité de l'eau
Couches d'informations de sortie	**Données alphanumériques correspondantes**
- Modèle numérique d'altitude	
- Carte des pentes	
- Limites des bassins versants	
- Carte du réseau hydrographique	Données alphanumériques correspondantes
- Carte de l'occupation des sols	à chaque type de carte
- Carte d'aménagements proposés	
- Carte du potentiel des menaces	
- Zone de protection immédiate	
- Zone de protection rapprochée	
- Zone de protection éloignée	
- Cartes thématiques diverses	

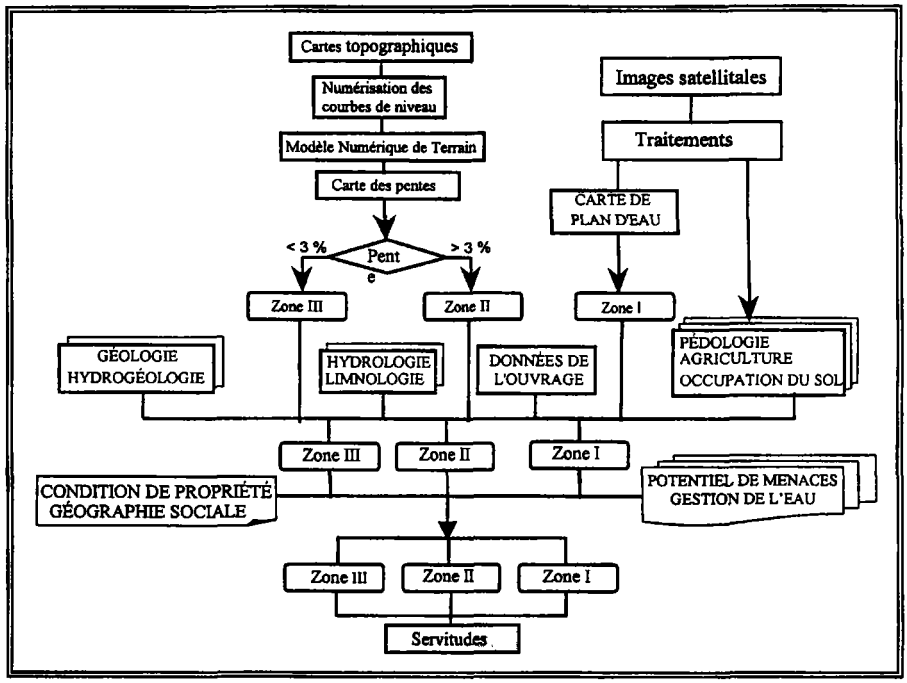


Figure 1. Organigramme pour l'élaboration des zones de protection

2.3. Apport de la télédétection et du SIG pour la délimitation des zones de protection

Les données de télédétection apportent une contribution précieuse aux activités de gestion de ressources en eau pour plusieurs raisons (PUECH, 1993) :

- continuité spatiale et flexibilité géométrique;
- couvertures diachroniques;
- vision synoptique;
- formats numériques permettant l'analyse et le traitement automatique ainsi que la sortie de documents adaptés à des besoins variés.

La télédétection a permis d'accéder à la description du milieu naturel (occupation du sol, types de cultures, infrastructures et aménagements, réseau hydrographie, etc.). L'approche cartographique suivie est celle de l'analyse des signatures spectrales des principaux types d'occupation du sol pour une classification dirigée basée sur la méthode du maximum de vraisemblance (image HRV de 28-04-1998).

Le SIG, lui, peut accomplir plusieurs fonctions essentielles (ESRI, 1994b) :

- acquisition des données spatiales et descriptives;
- stockage, gestion et mise à jour de ces données;
- analyse et croisement de données;
- restitution sous forme de tableaux, de graphiques ou de cartes.

La manipulation du système mis en place est assurée moyennant des utilitaires bien structurés qui offrent à l'utilisateur toutes les possibilités de gestion du SIG depuis l'entrée de données jusqu'aux sorties des résultats (figure 2 et 3).

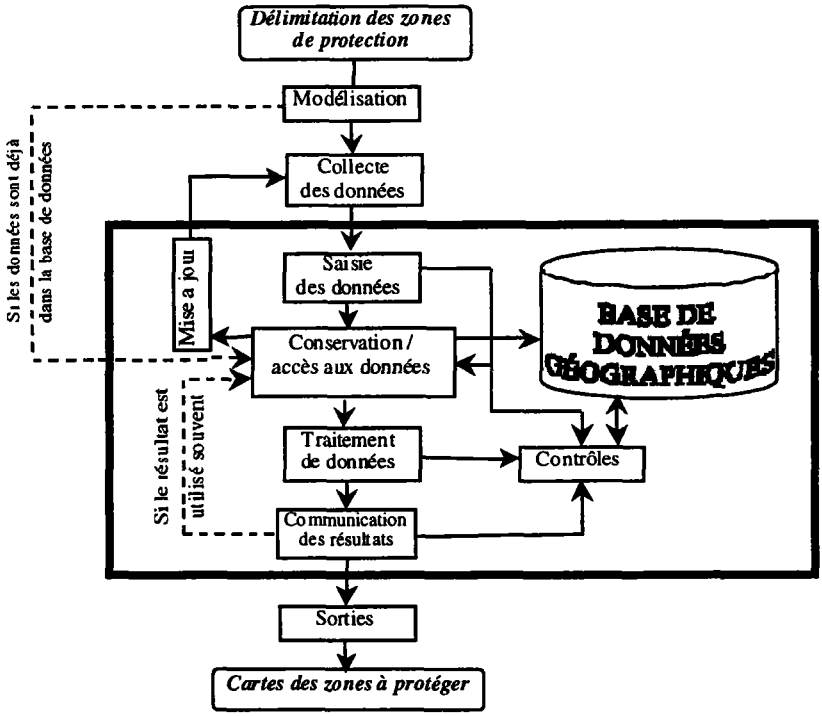


Figure 2. Enchaînement des opérations effectuées par le SIG

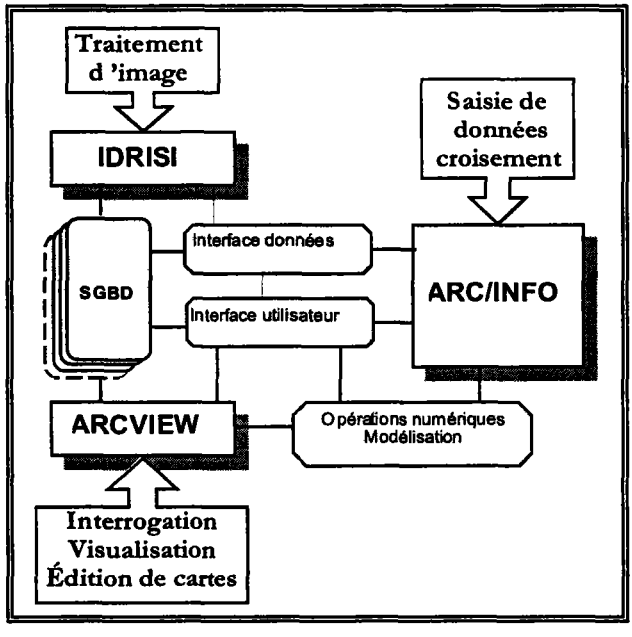


Figure 3. Organisation du SIG

3. Résultats

L'étude de la région concernée à partir des données de télédétection à haute résolution, a permis de distinguer la répartition des différentes classes d'occupation du sol (figure 23-4) (voir cahier couleur). L'interprétation des photographies aériennes et les observations sur le terrain ont permis d'établir la réalité de terrain à laquelle sont confrontés les résultats de traitement d'images.

L'organisation du SIG adopté englobe un ensemble de logiciels et de programmes nécessaires pour la réalisation des différentes tâches requises pour la délimitation des zones de protection (figure 23-5) (voir cahier couleur). Ces logiciels englobent :

- des modules de saisie de données provenant de différentes sources (cartes existantes, images satellitales, photographies aériennes, tableaux, etc.);
- des modules d'enregistrement et de gestion de la base de données qui servent surtout à la structure de l'information géographique;
- des modules pour des opérations numériques et de simulation;
- des modules d'édition des résultats qui ont pour fonction la communication avec les différents périphériques de sortie.

Après l'analyse des paramètres existants dans la base de données, on a constaté que les facteurs géologiques et hydrogéologiques ont un apport négligeable en nutritifs vers la retenue, par contre la morphologie, la dégradation du couvert végétal, le ruissellement et l'agriculture sont des facteurs importants pour la délimitation des zones de protection.

La mise en relation des facteurs précédemment évoqués a permis la délimitation des trois zones de protection telle qu'elle est présentée sur la figure 23-5 (voir cahier couleur). L'installation de ces dernières présente une possibilité de protéger efficacement les ressources en eau et de prolonger la durée de leur exploitation. Ceci entraîne également une plus grande rentabilité des investissements et infrastructures réalisés.

4. Conclusion

Cette étude fait ressortir l'opportunité de la mise en place d'une démarche utilisant un SIG et des données de télédétection pour la délimitation des périmètres de protection d'une ressource de surface pour l'alimentation en eau potable. Les données thématiques obtenues à partir du traitement d'image sont mises en relation avec d'autres données multi-sources (cartographiques, météorologiques et hydrologiques) au sein d'une base de données gérée par un SIG. Elle a également défini les différentes étapes nécessaires pour la conception de la méthodologie SIG adaptée aux zones de protection.

Cette étude apparaît donc encourageante quant au développement futur de l'utilisation de la télédétection spatiale et du SIG pour l'étude des ressources en eau. Elle vise l'objectif fondamental d'amélioration des connaissances nationales sur les ressources en eau et de leurs protection, et fourni une base pour toute étude expérimentale ultérieure en matière de protection des ressources en eau de surface.

5. Références

ANONYME, 1992, Plan Directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins de Bergreg Oum Rbia. Conseil supérieur de l'eau du Maroc, 6ème session, janvier 1992.

ANONYME, 1995. Loi N° 10-95 sur l'eau au Maroc. Bulletin officiel du Maroc, n° 4325, 20 septembre 1995.

ANONYME, 1996. Barrage Hachef (9 Avril). Rapport du Ministère des travaux publics du Maroc, Rabat, 16 p.

BETLAAN, O., WANG, Z.M. et DE SMEDT, F., 1996. An adaptive SIG toolbox for hydrological modelling. In HydroSIG 96 : Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, Proceedings of the Vienna Conference, April 1996, LAHS Publication, n° 235, p. 3-9.

EL GAROUANI, A. 1995. Méthodologie pour l'élaboration du SIG pour la Région Économique du Centre dans le cadre de la monographie de l'environnement. Rapport au Ministère de l'environnement du Maroc, 50 p.

ESRI, 1994a. Inderstanding SIG : The ARC/INFO method. Environmental Systems Research Institute, Longman, Redlands, USA, 500 p.

ESRI, 1994b. PC ARC/INFO User's guide. Environmental Systems Research Institute, Longman, Redlands, USA, 400 p.

KRAUSE, H. et LAMRHARY, A. 1995. Manuel relatif à la délimitation des zones de protection des captages d'eaux des surface. Rapport, Office national de l'eau potable, Rabat, 40 p.

ONEP-GTZ, 1995. Étude en vue de la requête pour l'installation des périmètres de protection pour la retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur l'oued Bou Regreg. Office national de l'eau potable et Gesellschaft fur technische zusammenarbeit, Rapport à l'Office national de l'eau potable du Maroc, 175 p.

PUECH, C. 1993. Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants application à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier- Grenoble 1, 234 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 233-239

24

Suivi des anomalies pluviométriques en Afrique équatoriale et tropicale à l'aide d'images VISSR de Météosat : quelques résultats de recherche sur le bassin du fleuve Congo

KAMUTANDA KALOMBO

Collaborateur scientifique, Département de géographie physique, Université de Liège, B. B11, 2, allée du 6 Août, Sart Tilman, 4100 Liège, Belgique; téléphone: + 32.41.3665754; télécopieur: + 32.41.3665720 ; courriel : aozer@ulg.ac.be

Résumé

Les résultats que nous présentons, font suite à une série de recherches sur la relation qui existe entre la pluie mesurée au sol et les indicateurs VISSR de Météosat, notamment les occurrences des nuages à sommet froid (les cumulo-nimbus : « Cub ») en Afrique équatoriale. Ces résultats montrent que les déficits pluviométriques observés au cours de la saison des pluies 1991-1992 sur la majeure partie de l'Afrique Équatoriale et la pluviométrie contrastée observée au cours des mois de mars 1993 et 1994 dans le sud-est du Congo sont confirmés par l'analyse des « Cub ». Cette analyse est faite en référence avec leur évolution moyenne sur la période 1986-1992 . En outre, l'étude montre que les relations spatiales et temporelles entre les précipitations et l'indice normalisé de la végétation (NDVI) sont globalement bonnes sur le plan qualitatif. Cependant, des améliorations pourraient être apportées sur le plan quantitatif en prenant en compte plusieurs types de nuages et en étoffant le réseau pluviométrique au sol.

1. Introduction

Le suivi de l'évolution de la pluviométrie en Afrique équatoriale s'impose dans la mesure où les travaux récents concernant cette région (KALOMBO, 1994) font état d'une variabilité pluviométrique de plus en plus importante. Malheureusement, leur analyse et leur suivi ont été jusqu'à présent rendus difficiles suite à l'insuffisance du réseau pluviométrique au sol, à l'étendue du bassin versant du fleuve Congo (3,7 millions de km^2) et aux difficultés d'accès. De ce fait, l'intérêt de la méthode de thermographie infrarouge VISSR de Météosat dans le suivi de la pluviométrie de vastes régions comme l'Afrique équatoriale est évident. L'indicateur VISSR retenu « Cub » a déjà été utilisé pour les mêmes objectifs dans plusieurs régions intertropicales, notamment dans les régions sahélo-soudaniennes (CARN *et al.*, 1989). D'autre part, l'analyse combinée des précipitations et de l'indice normalisé de la végétation (NDVI) semble également un bon moyen d'investigation spatio-temporelle.

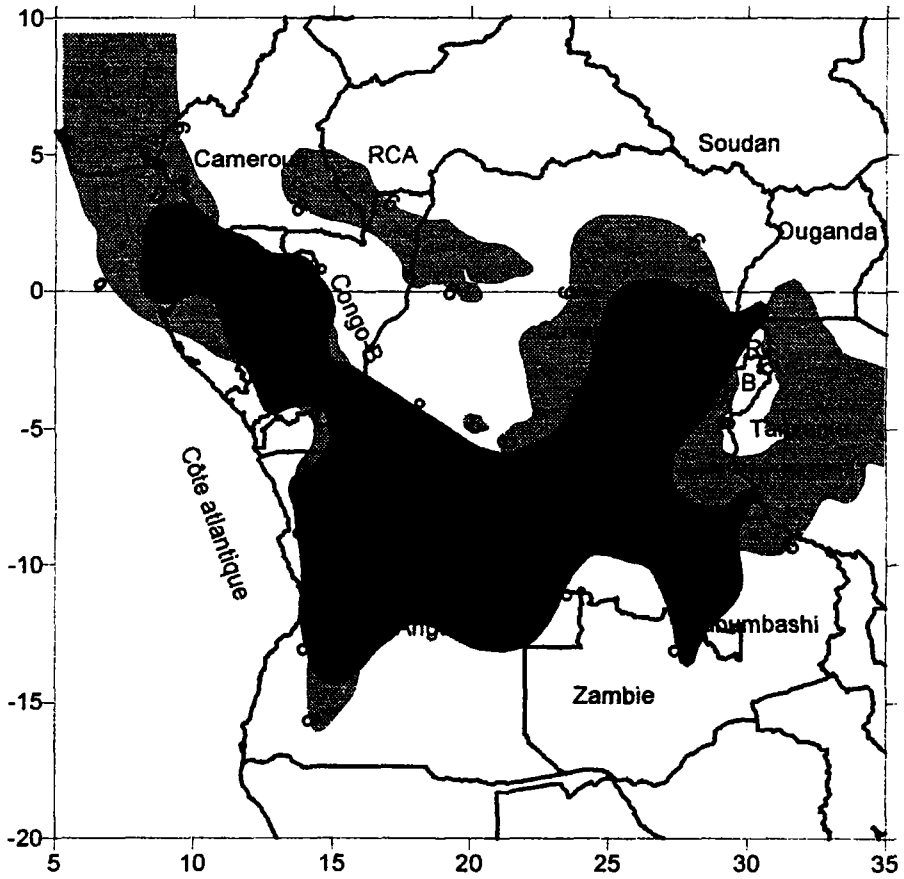
2. Matériel et méthode

Dans le cadre du suivi des pluies au sol à l'aide des « Cub », on compare les occurrences des « Cub » et les précipitations mensuelles de 1991-1992, de mars 1993 (excédentaire) et de mars 1994 (déficitaire) respectivement aux moyennes de la période de 1986-1992. Les « Cub » sont exprimés en pourcentage du nombre d'images infrarouges VISSR traitées et sont comptabilisées en utilisant un seuil discriminatoire de température radiative fixé à – 40 °C (DAGORNE, 1988). D'autre part, on compare la répartition spatio-temporelle des pluies à celle du NDVI. Les données de NDVI sont des maxima enregistrés au pas de temps de 10 jours, soit trois valeurs par mois, et donc 360 données décadaires pour la période de 1981-1990. Le fait de ne retenir que ces valeurs maximales est une précaution généralement prise afin de minimiser le plus possible l'impact sur le NDVI des nuages, des aérosols et des autres particules atmosphériques très fréquents en régions intertropicales. Pour une formation végétale dense (NDVI > 0,6) l'erreur liée à la présence des nuages varie entre 10 et 30 % (ISLSCP, 1996). En outre, les fenêtres spectrales utilisées pour le calcul de NDVI [NDVI = (NIR – VIS)/(NIR + VIS)] où NIR et VIS sont respectivement des valeurs standardisées de la radiation dans les canaux du proche infrarouge et du visible, sont généralement caractérisées par une bonne transmissivité dans l'atmosphère (KIMES *et al.*, 1984). Ces données, qui proviennent des capteurs AVHRR des satellites NOAA ont été fournies par la F.A.O *et al.*,1992).

3. Interprétation des résultats

3.1. Situation en mars 1994 dans le sud-est du Congo

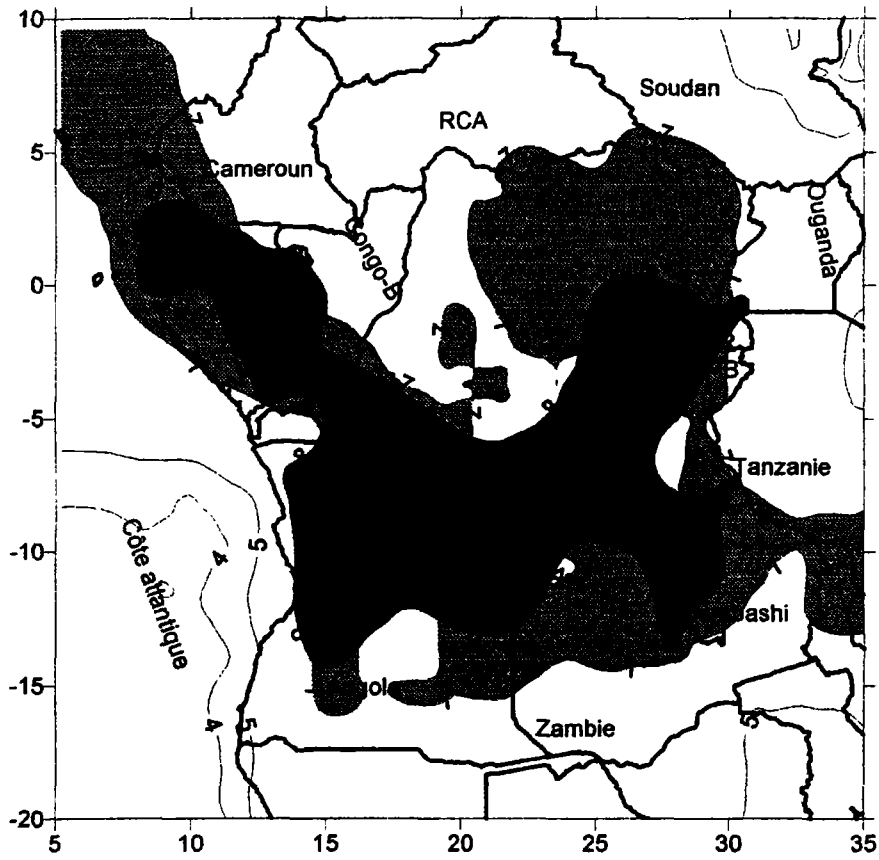
Sur la figure 1, on montre que la désintégration de l'Équateur météorologique (matérialisée par la présence des « Cub ») s'accompagne d'un déficit des « Cub » très important sur le sud-est du Congo : -5 % à –11 % d'écart entre les « Cub » en mars 1994 et la moyenne de 1987-1994. Il faut en effet descendre en latitude (figure 1) jusqu'à la périphérie de la cuvette centrale pour retrouver quelques amas nuageux froids témoins d'une remontée



Pourcentage d'occurrences par rapport au nombre d'images (610) traitées
6 : 15 à 19 %
7 : 20 à 24 %
8 : 25 % et +.

Figure 1. Occurrences de nuages à sommet froid (T<-40 °C) : ▒ : mars 1994 (610 images) déficitaire par rapport à la moyenne de la période 1989-1992 (■) avec comme conséquence, le déficit pluviométrique sur le sud-est du Congo-Kinshasa (44 mm de pluie à Lubumbashi pour 215 mm de normale) suite à la dislocation et à la remontée précoce de la zone de convergence intertropicale.

précoce de la convergence intertropicale (CIT). Sur la même figure, on montre que le reste de la confluence interocéanique (CIO) est complètement décalé vers l'ouest et se localise le long des côtes angolaises alors que sa position moyenne en cette période la situe au centre de la Zambie. La CIT, est décalée vers l'est (figure 1) et est centrée sur un axe d'orientation méridienne allant du sud de l'Ouganda jusqu'au sud de la Tanzanie.



Pourcentage d'occurrences par rapport au nombre d'images (659) traitées
6 : 15 à 19 %
7 : 20 à 24 %
8 : 25 % et +.

Figure 2. Occurrences de nuages à sommet froid (T<-40 °C) : ▒ : mars 1993 (659 images) plus expansive que la moyenne de la période 1989-1992 (■) avec comme conséquence, des précipitations excédentaires notamment sur le sud-est du Congo-Kinshasa (400 mm de pluie à Lubumbashi pour 215 mm de normale) suite à la stagnation de la zone de convergence intertropicale dans la région.

3.2. Situation en mars 1993 dans le sud-est du Congo

Mars 1993 a été exceptionnellement humide sur le sud-est : 400 mm pour 215 mm de moyenne à Lubumbashi. Grâce aux images VISSR (figure 2), on a constaté une stagnation et un étalement de l'Équateur météorologique dans cette région. On voit en effet la présence d'une large bande nuageuse d'orientation zonale (de 8° à 20° S.) allant du nord-est de l'Angola jusque dans le nord et le centre de la Zambie en passant par le sud-est du Congo. Cette bande est caractérisée par des écarts positifs de « Cub » de mars 1993 par rapport à

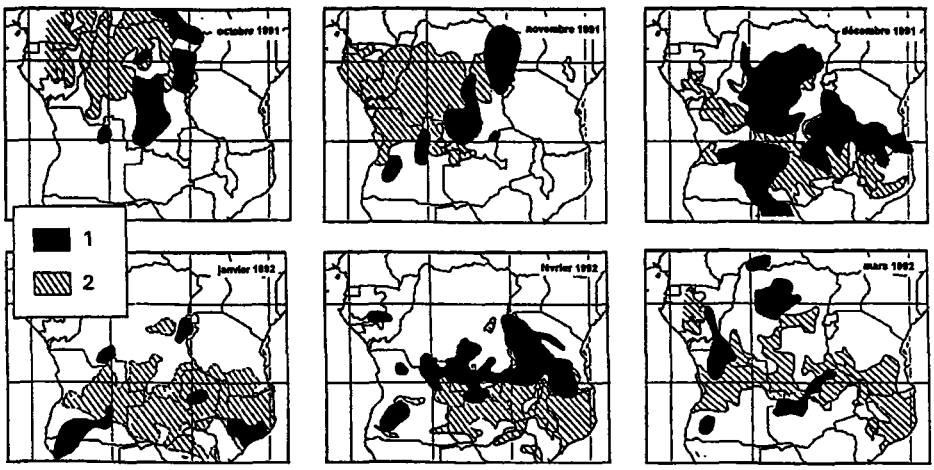


Figure 3. Comparaison pour chaque mois de la saison des pluies 1991-1992, entre la zone d'occurrence des nuages à sommet froid (T<-40 °C) en noir et la zone de forte pluviosité au sol dans une période largement antérieure (plus de 200 mm/mois), en hachuré (KALOMBO, 1995) montrant la désintégration de la zone de convergence intertropicale responsable du déficit pluviométrique en Afrique équatoriale.

la moyenne de 1987-1994 (de 5 % à plus de 11 %), son étalement en latitude et, par conséquent, sa stagnation sur la région par rapport à sa position moyenne. L'examen des images VISSR de la région révèle en effet que la limite la plus au sud de la CIT a été plus au sud que d'habitude (entre 18 et 19° S). Par contre, la limite sud de la CIT en mars 1994 a dépassé à peine 10° S.

3.3. Suivi de la saison des pluies en 1991-1992 à l'aide des « Cub »

La comparaison entre les taux de convection mensuelle au cours de la saison 1991-1992 et la moyenne de 1986-1992 a permis de se rendre compte de l'état déficitaire de la convection au cours de cette saison sur la majeure partie de l'Afrique équatoriale. On a noté notamment les faibles « Cub » au centre de la cuvette centrale (figure 3) : en octobre 1991 (8 % à 14 % contre une moyenne de 13 % à 17 %); en novembre de la même année (9 % à 13 % contre 11 % à 16 % de moyenne) et en janvier 1992 (7 % à 13 % contre 5 % à 15 % de moyenne). Sur le rebord occidental de la cuvette et le long de la côte atlantique, les déficits les plus élevés en taux de convection ont été observés au début de la saison des pluies (octobre: 0 % à 11 % contre 3 % à 14 % de moyenne; novembre: 2 % à 13 % contre 6 % à 14 % de moyenne) et en janvier (figure 3) (4 % à 11 % contre 7 % à 15 % de moyenne). Sur le rebord oriental de la cuvette (région montagneuse), le taux de convection a été déficitaire en octobre 1991 (14 % contre 19 % à 21 % de moyenne), en mars (1992 : 7 % à 9 % contre 14 % à 16 % de moyenne). Enfin, pour ce qui est de la région du sud-est du Congo, le taux de convection a été déficitaire au cours des mois de pleine saison pluvieuse notamment le mois de janvier (KALOMBO *et al.*, 1995$_a$). Ce dernier est parmi les mois de janvier les plus déficitaires en précipitations que le sud-est du Congo ait connu depuis le début des relevés pluviométriques en 1917 à Lubumbashi : 128 mm de pluie seulement pour 280 mm de normale (1951-1980).

Pour ce qui est de la relation entre la pluie et le NDVI, nous avons constaté, qu'au niveau des grands espaces paysagers, il existe globalement des liens entre ces deux paramètres : en janvier, mois de saison des pluies, le NDVI varie entre 0,33 et 0,5 au niveau des forêts et dans la partie sud, et entre 0,17 et 0,33 le long de la côte atlantique, dans des sites sous abri de la région montagneuse ainsi que dans la frange au nord de l'équateur marquée par à la présence de la saison sèche en cette période. En juillet (mois de saison sèche), on a constaté une bonne relation spatiale entre la pluie et le NDVI (R = 0,7) vraisemblablement due à la prédominance de la saison sèche sur le bassin et à son intensification en direction du sud de l'Équateur.

L'évolution temporelle décadaire est marquée par une forte variabilité des pluies par rapport à NDVI, les corrélations sérielles de NDVI varient entre 0,6 et 0,9; alors qu'elles ne dépassent pas 0,5 pour les précipitations. D'autre part, nous avons noté un décalage de trois à quatre décades entre les occurrences des pluies et NDVI notamment sur les hauts plateaux et à la périphérie de la cuvette. Cependant, cette réponse de la végétation aux précipitations peut varier non seulement d'une région à l'autre, mais aussi dans une même région, en fonction de la durée des saisons et de la répartition des pluies pendant la saison humide.

4. Discussion et conclusion

L'évolution à l'échelle mensuelle des nuages à sommet froid, notamment les cumulo-nimbus « Cub » constitue un indicateur important dans le suivi de l'évolution de la pluviométrie au sol en Afrique Equatoriale et Tropicale humide. La saison de 1991-1992 a été déficitaire sur une grande partie du bassin du fleuve Congo : la hauteur du fleuve Congo à la plage de Brazzaville avait atteint son niveau le plus bas depuis 1948 en février 1992 (environ 50 cm de moins). Ce résultat est confirmé par l'analyse comparative entre l'indicateur Météosat « Cub » et les moyennes de 1986-1992. De même l'excédent et le déficit pluviométriques records enregistrés respectivement en mars 1993 et e mars 1994 ont été confirmés par l'analyse des occurrences nuageuses. L'exploitation des valeurs de NDVI, à l'échelle certes, d'une cartographie de base (± 1 : 5 000 000) permet malgré tout, de donner des indications précieuses sur l'évolution spatio-temporelle de cet indice en fonction des précipitations. Le recours à l'approche comparative entre la fréquence des nuages à sommet froid et les précipitations au sol constitue un meilleur moyen de suivi des saisons pluvieuses dans une région aussi vaste, difficile d'accès et mal équipée qu'est l'Afrique Équatoriale. L'avènement de la seconde génération de Météosat avec une image toutes les 15 minutes dans 12 canaux spectraux différents (EUMETSAT, 1999), permettrait une nette amélioration de ces résultats, notamment dans le suivi des dépressions mobiles à la base des manifestations orageuses.

5. Remerciements

Nous remercions très sincèrement Messieurs B. GUILLOT et J.P. LAHUEC de nous avoir accueillis à l'Antenne ORSTOM (IRD)/CMS de Lannnion dans le cadre de ce travail.

6. Références

CARN, M., DAGORNE, D., GUILLOT, B. et LAHUEC, J.P. 1989. Estimation des pluies par satellite en temps réel en Afrique Sahélo-soudanniene. Veille Climatique Satellitaire, n° 28, p. 47-57.

DAGORNE, D. 1988. Traitement des données satellitaires à l'antenne ORSTOM de Lannion. Le logiciel Triskel. Veille Climatique Satellitaire, n° 23, p. 17-22 et n° 24, p. 38-42.

EUMETSAT. 1999. The Meteosat system. Satellites - Ground segment - Missions - Global coordination. EUM TD 05, Darmstadt, 64 p.

F.A.O (Food and Agriculture Organisation) and D.S.E.(Deutsche Stiftung für internationale Entwicklung) 1992. Application of remote sensing and geographic information system in environmental and natural ressources management and monitoring. Training course, Allemagne.

ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project) 1996. Dataset documents. FASIR (Fourrier-Adjustment, Solar zenith angle corrected, Interpolated Reconstructed) NDVI document. FSR-NDVI.html.

KALOMBO, K. 1994. Anomalies pluviométriques dans le sud-est du Zaïre au cours de la période de sécheresse australe (1980-1994). Rapport de bourse d'excellence (AUPELF-UREF), Université de Liège.

KALOMBO, K., LAHUEC, J.P. et ERPICUM, M. 1995. Suivi de la saison des pluies 1991-1992 en Afrique équatoriale à l'aide des indicateurs Météosat : occurrences des nuages à sommet froid et températures de brillance maximum de surface. Publ. de l'A.I.C. (Association Internationale de Climatologie), vol. 8, p. 154-162.

KALOMBO, K. 1995. La pluviométrie pendant la période de sécheresse récente (depuis 1980) dans le sud-est du Zaïre. Geo-Eco-Trop, vol. 19, n° 1-4, p. 17-34.

KIMES, D.S., HOLBEN, B.N., TUCKER, C.J. and NEWCOMB, W.W. 1984. Optimal directional view angles for remote sensing missions. International Journal of Remote Sensing, vol. 15, p. 3493-3518.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 241-249

25

Application de la télédétection et d'un modèle de simulation d'écoulement des fluides pour l'identification de couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines en milieu cristallophyllien dans la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire)

FERNAND KOFFI KOUAMÉ, PIERRE GIOAN, JEAN BIÉMI, KOUADIO AFFIAN et KAPO COULIBALY

Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire; téléphone : (225) 22 44 52 70; télécopie : (225) 22 44 35 00; courriel : kouamef@syfed.ci.refer.org / Kouamef@yahoo.fr

Résumé

L'identification des couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines est indispensable pour mieux appréhender le mode de fonctionnement des systèmes hydrauliques de l'ouest semi-montagneux de la Côte d'Ivoire. Dans cet environnement de roches de nature essentiellement cristallophyllienne, la télédétection permet une bonne approche quantitative des structures cassantes à fonction hydraulique. Les données structurales ont été extraites des images satellitales TM de Landsat et HRV (P) de SPOT, puis analysées selon des méthodes statistique et fractale afin de définir les paramètres géométriques quantitatifs. Le modèle de FRANCISS, conçu pour illustrer l'écoulement des fluides en milieu fissuré, est adapté pour le calcul des perméabilités induites par les fractures à partir des paramètres : nombre total de fractures, longueur et orientation de chaque fracture, ouverture, densité et

conductivité hydraulique des fractures. Une analyse multicritère, associant différentes cartes thématiques : cartes de perméabilités induites, des domaines structuraux, des données lithologiques, hydrographiques et structurales permet de dresser une cartographie des différents couloirs souterrains potentiels à partir des seules données de surface. Deux couloirs à forte perméabilité, associés à des axes secondaires et à des bassins souterrains de concentration des eaux, sont mis en évidence. On constate bien l'existence d'une forte corrélation entre le réseau hydrographique et les nappes d'eau souterraine suspectées. Cependant, l'application du modèle de FRANCISS ne peut être étendue à l'ensemble de la zone de montagne. Dans ce cas, l'emploi du modèle numérique d'altitude est recommandé pour vérifier la pertinence de ces couloirs.

1. Introduction

La région semi-montagneuse de Man-Danané, située à l'ouest de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes 7° 21' et 8° N et les longitudes 7° et 8° 05' O (figure 1) a fait l'objet de nombreuses études sur le plan hydrogéologique. Depuis 1996, une évaluation du potentiel hydrique a été entreprise par le CURAT (BIÉMI *et al.*, 1998; KOUAMÉ, 1999; KOUAMÉ *et al.*, 1999a) pour répondre à un besoin urgent de très forte demande en eau, engendrée par une pression anthropique (taux de natalité élevé, migration de réfugiés libériens, guinéens et sierra leonnais, exode rural, etc.) toujours croissante dans la région. Divers programmes d'aménagements hydrauliques, conduits par le Gouvernement et la Banque africaine de développement (BAD) sont en cours d'exécution et nécessitent une utilisation rationnelle des réserves d'eau disponibles. Pour cela, une bonne compréhension des modes de fonctionnement des systèmes hydrauliques souterrain et de surface s'impose. L'identification de couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines dans un environnement de socle

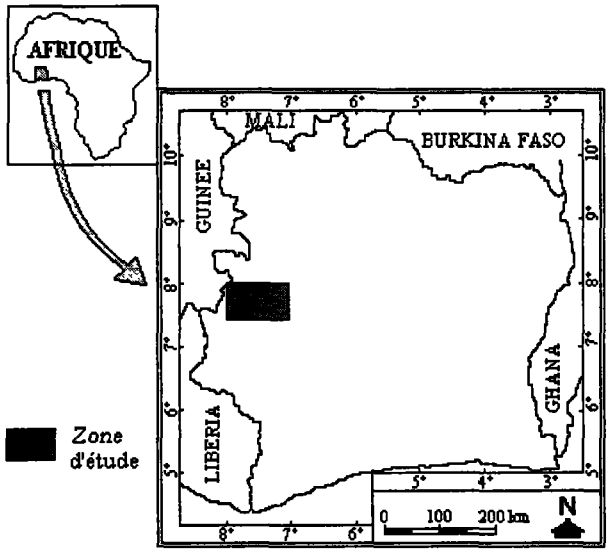


Figure 1. Localisation de la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire)

archéen, constitué essentiellement de roches cristallines et cristallophylliennes (charnockites, gneiss migmatitiques, quartzites ferrugineux, etc.), apparaît comme l'une des voies privilégiées de prospection et d'évaluation du potentiel hydrique. Dans un tel contexte géologique, les roches sont imperméables (aquifuges) dans leur état primaire et ne peuvent constituer de réservoir hydrogéologique que lorsqu'elles sont fracturées et/ou altérées. C'est pourquoi, l'évaluation des ressources en eau des aquifères discontinus comporte toujours une première phase de cartographie des systèmes de fractures affectant les roches (CASTAING *et al.*, 1989; RAZACK, 1986). La télédétection peut parfaitement être intégrée aux différentes étapes de l'évaluation du potentiel hydrique de l'ouest ivoirien. Les travaux de KOUAMÉ *et al.* (1999a), basés sur l'interprétation des images satellitales TM de Landsat et HRV (P) de SPOT ont permis d'élaborer la carte détaillée des linéaments. La caractérisation des paramètres géométriques quantitatifs à partir des approches statistique et fractale (KOUAMÉ *et al.*, 1999b) permet de mieux cerner la géométrie des réservoirs. Mais comment circule l'eau dans ce réseau de fractures très complexe ? C'est à cette problématique que tente de répondre cet article, dans lequel on propose d'exploiter les paramètres géométriques issus de la carte linéamentaire pour simuler l'écoulement de l'eau à travers les réservoirs souterrains. Les nombreux modèles de simulations développés assimilent les réseaux de fractures soit à des milieux continus (LONG *et al.*, 1982) soit à des milieux discontinus (SNOW, 1969). Dans tous ces modèles, la question de l'échelle de représentativité des données pour laquelle le milieu est considéré comme continu ou non doit être aussi examinée. Dans notre cas, la maille élémentaire représentative (DELAY *et al.*, 1992), définie par une maille carrée de 4 km de côté permet de résoudre ce problème. La forte densité linéamentaire permet d'assimiler les aquifères de cette région à des milieux poreux équivalents (KOUAMÉ, 1999). Le modèle de FRANCISS (1970) est bien adapté à ce type de milieu considéré pseudo continu et permet de calculer les perméabilités induites par les fractures.

La combinaison des données multisources (lithologie, hydrogéologie, structural) et l'analyse multicritère aboutit à la cartographie du réseau souterrain se répartissant entre deux couloirs orientés nord-sud à fort potentiel de circulation d'eau souterraine, séparés par des axes au contraire à faible potentiel et des bassins d'accumulation d'eaux.

2. Matériel et méthode

2.1. Matériel

La carte linéamentaire (figure 2) établie par KOUAMÉ *et al.* (1999a) à partir des images satellitales TM de Landsat (scène 198-55, enregistrée le 04-01-1985) et HRV(P) de SPOT (scène 44-335, enregistrée le 17-03-1988) constitue le document de base sur lequel est appliqué le modèle de calcul des perméabilités induites. Les données auxiliaires comprennent les cartes des densités linéamentaires, définissant les domaines structuraux (KOUAMÉ *et al.*, 1999b), les cartes géologiques de CAMIL (1984) au 1 : 500 000, de KOUAMÉLAN (1996) au 1 : 1 000 000, le chevelu hydrographique, extrait de la carte du bilan forestier du CENTRE DE CARTOGRAPHIE ET DE TÉLÉDÉTECTION (1992) au 1 : 200 000, des données issues des fiches techniques de forages, recueillies auprès des services de l'antenne de l'hydraulique villageoise de Man et enfin de quelques mesures structurales effectuées sur le terrain.

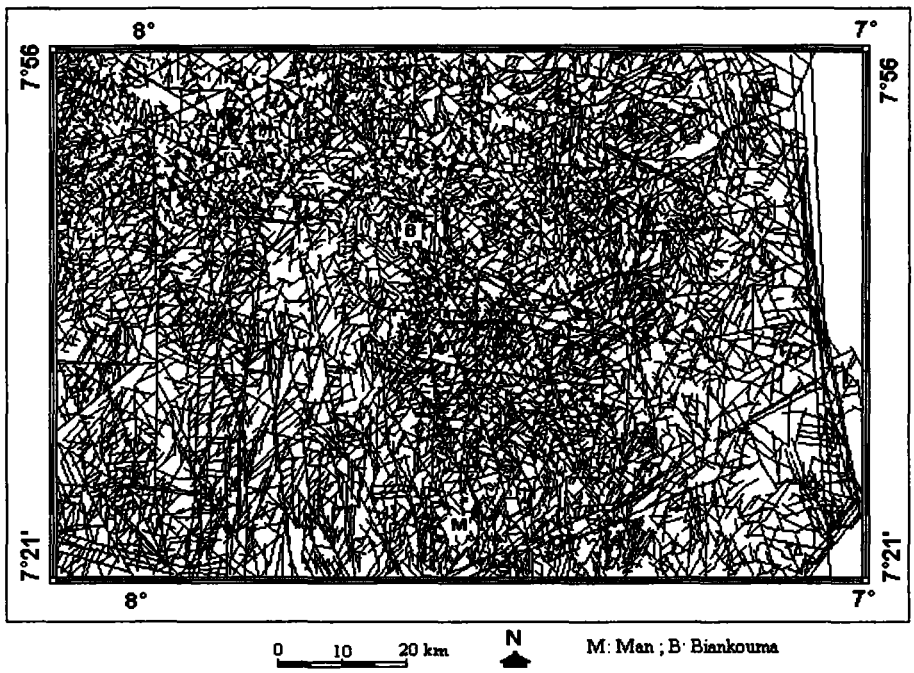


Figure 2. Carte linéamentaire établie à partir des images satellitales TM de Landsat et HRV (P) de SPOT de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Tirée de KOUAMÉ *et al.*, 1999a

2.2. Modèle de simulation des écoulements

2.2.1. Principe du modèle de calcul des perméabilités induites

Pour établir son modèle, en milieu fissuré, FRANCISS (1970) propose d'intégrer des paramètres déterminés à partir des données de terrain, soit la conductivité hydraulique des fractures (K_f) et le coefficient de proportionnalité (C) entre les longueurs et les ouvertures des fractures, d'une part, et des paramètres géométriques extraits de la carte linéamentaire soit le nombre total de fractures, la longueur et l'orientation de chaque fracture, d'autre part.

Certaines hypothèses simplificatrices sont retenues :

- fractures supposées verticales ou sub-verticales;
- fractures supposées continues à l'intérieur du système spatial considéré;
- épaisseur de la zone broyée (e), considérée comme une fonction linéaire empirique de la longueur (L) de la fracture (e = C x L).

En milieu fissuré, la conductivité hydraulique (K_f) d'une fracture est assimilable à la perméabilité moyenne apparente caractérisant cette fracture, et peut être estimée à partir de la relation suivante :

$$K_f = \frac{T_i}{e_i}$$

où K_f représente la conductivité hydraulique en mètres par seconde;
T_i la transmissivité du secteur en mètres carrés par seconde;

e_i l'épaisseur de la zone broyée en mètres, estimée à partir de la différence entre les côtes des premières et dernières arrivées d'eau dans les forages.

Selon FRANCISS (1970), le coefficient de perméabilité K_i d'une fracture plane s'exprime par un tenseur de deuxième ordre et le tenseur K qui exprime l'effet cumulé de plusieurs fractures est obtenu par la somme des tenseurs de chaque fracture contenu dans le système spatial considéré.

Les vecteurs et les valeurs propres de K donnent les valeurs des perméabilités maximale (K_{max}) et minimale (K_{min}) et indiquent les directions de perméabilités maximale (λ_{max}) et minimale (λ_{min}) par les formules ci-dessous :

$$K\left(\begin{smallmatrix}\max\\ \min\end{smallmatrix}\right) = \frac{1}{2}(K_{NN} + K_{OO}) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(K_{NN} - K_{OO})^2 + 4K^2{}_{NO}}$$

$$\text{et } \lambda_{(\max)} = \frac{1}{2} tg^{-1} \frac{2K_{NO}}{K_{NO} - K_{OO}} \quad \text{et } \lambda_{(\min)} = \frac{1}{2} tg^{-1} \frac{K_{NO} - K_{OO}}{2K_{NO}}$$

K_{NN} et K_{OO} sont les perméabilités par rapport à un système d'axes nord-sud et est ouest. K_{max} et K_{min} correspondent respectivement aux modules des vecteurs de K suivant le grand axe et le petit axe de l'ellipse des K et forment entre eux un angle de 90 °.

La perméabilité moyenne (K_{moy}) est déterminée par la relation suivante :

$$K_{moy} = 1/2\,(K_{max} + K_{min})$$

2.2.2. Application du modèle

À partir des données recueillies sur le terrain, les paramètres K_f et C sont déterminés. Les données d'essai de pompage issues des fiches techniques de 54 forages permettent de calculer les transmissivités moyennes des roches grâce aux méthodes d'approximation de GRINGARTEN et BERTRAND (1978) et de THIÉRY (1981). Avec l'épaisseur de la zone broyée au niveau de chaque forage, K_f (rapport entre transmissivité et épaisseur de la zone broyée au niveau de chaque forage) est estimée à $3{,}51 \times 10^{-5}$ m.s^{-1}. À partir des mesures des longueurs et des ouvertures effectuées sur 1 500 fractures observées sur le terrain, la constante C est déterminée en faisant le rapport de ces deux variables. C est sans dimension et est égal à $2{,}8 \times 10^{-3}$.

Concernant les paramètres géométriques, un maillage de la région d'étude en cercles de 4 km de diamètre est effectué. Chaque cercle est inscrit à l'intérieur d'un carré dont le côté est égal au diamètre du cercle correspondant. À l'intérieur de chaque cercle, on détermine le nombre total de fractures, la longueur et l'orientation cas par cas des fractures.

L'application du modèle de FRANCISS permet d'intégrer K_f, C et les paramètres géométriques pour déterminer les valeurs de perméabilités induites par les fractures. Celles-ci sont utilisées pour dresser des cartes d'iso-valeurs de perméabilité, simulant l'écoulement des eaux dans les nappes du socle cristallophyllien fissuré de l'ouest ivoirien.

Différentes cartes thématiques obtenues lors des diverses étapes d'exploitation des données linéamentaires, combinées aux données auxiliaires existantes (lithologie, hydrogéologie, structurale) permettent de constituer une base de données hydrostructurales. Pour définir les différents couloirs, on associe les niveaux d'informations suivants : lithologie, domaines structuraux, perméabilités induites et réseau hydrographique. Une analyse multicritère est effectuée en fixant les contraintes, et les conditions spatiales à partir des tables attributaires associées aux différentes couches thématiques et aboutit à la cartographie des zones de circulation potentielle des eaux souterraines.

3. Résultats

3.1. Cartes de perméabilités induites

Les cartes de perméabilités induites sont formées de courbes d'iso-valeurs de perméabilité. On y distingue des axes à perméabilité relativement élevée, associés à des axes secondaires et des nodules à perméabilités forte et très forte. Sur la carte de la perméabilité induite moyenne (figure 25-3) (voir cahier couleur), s'observe une aire à perméabilité élevée, de forme polygonale et située dans la partie centrale du secteur d'étude. La forte densité de fracturation et les différentes structures particulières (structures circulaires, en sabliers, en étoiles et en damiers) détectées en imagerie satellitale par KOUAMÉ (1999) induisent de fortes variabilités des perméabilités induites par les fractures. Deux axes à forte perméabilité jouxtent cette aire : l'un à l'ouest de direction nord-sud reliant les nodules de Yorodougou et de Dropleu, l'autre à l'est de même direction, débutant dans les environs de Kamahi pour se prolonger jusqu'à Taobli au sud. L'axe occidental est connecté à la zone centrale par le biais d'un axe secondaire de direction est-ouest. La répartition irrégulière des perméabilités le long des principaux axes est, selon SAVADOGO (1984), due à la structure planaire des fractures, mais aussi à l'anisotropie des aquifères discontinus. Une bonne circulation des eaux souterraines sera donc fonction du degré d'interconnexion des accidents.

3.2. Cartes des couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines

Le croisement des cartes thématiques (lithologie, perméabilités induites, domaines structuraux et hydrographie) permet de mieux appréhender le fonctionnement des systèmes hydrauliques. Les axes préférentiels et les principales zones d'alimentation des aquifères se présentent avec des morphologies variées. Dans la partie occidentale de la région étudiée, un premier axe nord-sud relie les bassins de Yorodougou, Bountra et Dropleu. La liaison entre les trois nappes d'eau de fissure est assurée par les accidents majeurs affectant le socle. Le bassin de Yorodougou est vraisemblablement alimenté par le fleuve Bafing, alors que les nodules de Bountra et de Dropleu le sont respectivement par les fleuves N'zo et Gbé (figure 25-4) (voir cahier couleur). À l'extrême est, un second axe nord-sud se superpose parfaitement à l'accident du Sassandra dans lequel coule le fleuve du même nom. Cette zone de broyage intense induit de fortes valeurs de perméabilité et met ainsi en place un important réseau souterrain, confirmant ainsi, le rôle joué par les fractures dans la constitution des nappes souterraines et dans le guidage des cours d'eau de l'ouest ivoirien.

La zone centrale se caractérise par trois bassins de concentration des eaux de forme polygonale. Le premier bassin est celui de Biankouma-Sandougou Soba, qui comporte trois branches et qui mobilise les eaux de surface dont le Koué, des environs de Biankouma, Mangouin et Sandougou Soba. Le deuxième bassin, en forme de fourche, allongé selon la direction N 170°, se développe à proximité de Zérolé. Quant au troisième, celui de Zagoué-Gbonné-Zouandié, il relie les deux précédents. Les diverses zones d'accumulation recensées se superposent à la fois aux accidents majeurs et au réseau de drainage. Il existe donc une relation incontestable de type alimentation-drainage entre réseaux souterrain et de surface, facilitant ainsi la recharge des réservoirs souterrains. Toutefois, l'aspect montagneux du secteur étudié tend à réduire sensiblement les zones à potentiel en eau exploitable. Il convient donc d'utiliser le modèle numérique d'altitude pour vérifier la pertinence ou non des couloirs définis.

4. Discussion

Les valeurs moyennes de perméabilité induite calculées varient de 5,2 10^{-8} à 2,06 10^{-6} m.s^{-1}. Ces valeurs sont inférieures à celles de BIÉMI (1992) qui varient entre 10^{-6} et 10^{-4} m.s^{-1}, mais sont très supérieures à celles de SAVADOGO (1984) et SAVANÉ et BIÉMI (1999), respectivement de l'ordre de 10^{-8} et 10^{-11} m.s^{-1}obtenues en contexte géologique identique. La densité de fracturation est un paramètre majeur qui influe sur le tenseur de perméabilité, preuve que la région semi montagneuse de Man-Danané est plus fracturée que le nord-ouest ivoirien étudié par SAVANÉ et BIÉMI (1999). En procédant à des tests de sensibilité, on constate que la densité en longueur cumulée des linéaments est le principal facteur qui joue sur les résultats. La corrélation existant entre la densité et les directions des linéaments, d'une part, et les perméabilités calculées, d'autre part, confirme l'usage approprié de la méthode de FRANCISS dans ce type d'environnement géologique. En effet, l'anisotropie directionnelle qui règne dans un tel milieu, est prise en compte dans cette méthode de calcul. Les limites de cette méthode sont soulignées par l'ignorance du rôle des joints horizontaux dans la fonction drainante et par les paramètres K_f et C qui demeurent très variables dans l'espace. L'emploi de valeurs moyennes introduit une erreur d'estimation. Enfin, l'obtention de résultats fiables reste conditionnée par la densité de fracturation élevée, qui nécessite un travail de cartographie précis et très détaillé, pas toujours possible sous nos latitudes et soumis également à la subjectivité et à l'expérience de l'opérateur.

5. Conclusion

L'emploi de la télédétection et d'un modèle de simulation des écoulements permet d'établir une cartographie des couloirs et des principales zones d'accumulation d'eau souterraine de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Les différents couloirs souterrains suspectés sont alimentés par les principaux cours d'eau du secteur étudié. La géométrie des réseaux de fractures joue un rôle très important dans la mise en place des réservoirs et dans le guidage structural des cours d'eau. Ces résultats déduits des données linéamentaires extraites de l'imagerie satellitale sont déjà très satisfaisants, mais restent encore partiels pour pouvoir décrire la complexité des aquifères, développés dans un contexte cristallophyllien et en région semi-montagneuse. Il est donc vivement recommandé d'associer aux données auxiliaires existantes (lithologie, hydrogéologie et structurale), celles d'un modèle numérique d'altitude (pente, concavité, convexité, etc.) pour rendre le modèle esquissé, plus représentatif de la zone étudié en prenant en compte le maximum de contraintes et de spécificités morphologiques. Ce travail doit se poursuivre par l'établissement de cartes d'accessibilité, d'exploitabilité et de disponibilité en eau permettant une gestion et une planification efficaces de la répartition des ressources hydriques entre les différents secteurs d'activités.

6. Remerciements

Les auteurs remercient l'AUPELF-UREF d'avoir pu bénéficier du soutien de l'allocation du Fonds francophone de la recherche.

7. Références

BIÉMI, J. 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'État, Université d'Abidjan, 480 p.

BIÉMI, J., GIOAN, P., AFFIAN, K., JOURDA, J. P. et KOUAMÉ, F. 1998. Système d'informations hydrogéologiques pour une évaluation des potentialités hydriques en milieu cristallophyllien fissuré : la région de Biankouma-Man (ouest de la Côte d'Ivoire). *in* J.-M. Dubois, M. Bernier, J. P. Fortin et F. Boivin (dir). La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes, Édition Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, p. 261-270.

CAMIL, J. 1984. Pétrographie, chronologique des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de doctorat d'État, Université de Côte d'Ivoire, 306 p.

CASTAING, C., DUTARTRE, Ph., GOUYET, J.-F., LOISEAU, P., MARTIN, P. et POINTET, T. 1989. Étude pluridisciplinaire d'un réseau de discontinuités images en milieu granitique couvert. Implications en hydrologie des milieux fissurés. Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection, vol. 113, n° 1, p. 13-23.

CENTRE DE CARTOGRAPHIE ET DE TÉLÉDÉTECTION, 1992. Carte du bilan forestier du degré carré de Man, Côte d'Ivoire. Abidjan, 1 : 200 000.

DELAY, F., BRACQ, P. et COLBEAUX, J. P. 1992. Cartographie numérique de linéaments morphostructuraux : exemple d'application à l'hydrogéologie de la craie du Nord de la France. Bulletin de la Société géologique de France, t. 163, n° 3, p. 345-352.

FRANCISS, F. O. 1970. Contribution à l'étude du mouvement de l'eau à travers les milieux fissurés. Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1, 108 p.

GRINGARTEN, A. C. et BERTRAND, L. 1978. Détermination des caractéristiques hydrauliques des aquifères fissurés par pompage d'essai en régime transitoire. Application aux nappes de la craie. Rapport du Bureau de recherches géologiques et minières, n° 78, service géologique national, 669, département aménagement hydrogéologique, 34 p.

KOUAMÉ, K. F. 1999. Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire). Apports des données des images satellitales, des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de doctorat, Université de Cocody, 200 p.

KOUAMÉ, K. F., GIOAN, P., BIÉMI, J. et AFFIAN, K. 1999a. Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitales : exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Télédétection, vol. 1, n° 2, p. 1-18.

KOUAMÉ, K. F., GIOAN, P., BIÉMI, J. et LASM, T. 1999b. Approche de la géométrie des aquifères en milieu cristallophyllien fissuré par les analyses statistique et fractale des données linéamentaires extraites des images satellitales : cas de la région semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. VIII[e] Journées du réseau Télédétection de l'AUF. Lausanne, 21 au 25 novembre 1999.

KOUAMÉLAN, A. N. 1996. Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 277 p.

LONG, J. C. S., REMER, J. S., WILSON, C. R. et WITHERSPOON, P. A. 1982. Porous media equivalents for netwoks of discontinuous fractures. Water Resources Research, vol. 18, n°3, p. 645-658.

RAZACK, M. 1986. Approche probabiliste de l'étude en subsurface de la géométrie des réservoirs fissurés. Effet de l'échelle d'investigation. Hydrogéologie, n° 2, p. 215-230.

SAVADOGO, A. N. 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta. Étude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de doctorat d'État, Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 350 p.

SAVANÉ, I. et BIÉMI, J. 1999. Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (nord-ouest de la Côte d'Ivoire).Télédétection, vol. 1, n° 1, p. 47-64.

SNOW, D. T. 1969. Anisotropic permeability of fractured media. Water Resources Research, vol. 5, n° 6, p. 1273-1289.

THIÉRY, D. 1981. Analyse statistique des conditions de succès des forages réalisés en région de socle fissuré : application au Togo. Rapport Bureau de recherches géologiques et minières, n° 81, Service géologique national, 674, Département Eau, 67 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 251-262

26

Approche de la géométrie des aquifères en milieu cristallophyllien fissuré par les analyses statistique et fractale des données linéamentaires extraites des images satellitales : cas de la région semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire

FERNAND KOFFI KOUAMÉ [1], PIERRE GIOAN [1], JEAN BIÉMI [1] et THÉOPHILE LASM [2]

[1] *Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire; téléphone : (225) 22 44 52 70; télécopie : (225) 22 44 35 00; courriel : kouamef@syfed.ci.refer.org / Kouame.fernand@yahoo.fr*

[2] *Laboratoire d'hydrogéologie, Université de Poitiers, UMR 6532-HydrASA-CNRS, 40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex, France; téléphone : (33) 05 49 45 40 79; télécopie : (33) 05 49 45 42 41; courriel : Theophile.lasm@hydrasa.univ-poitiers.fr*

Résumé

L'évaluation du potentiel hydrique de la région semi-montagneuse de l'ouest de la Côte d'Ivoire passe par une meilleure compréhension de la géométrie des aquifères de socle fissuré. Une approche originale est proposée en combinant méthodes statistiques d'une part (distribution des orientations, des longueurs, des densités et lois statistiques les régissant) et géométrie fractale d'autre part (méthodes de comptage de boîtes et de répartition spatiale de masse), pour caractériser le champ linéamentaire (témoin de la fracturation). La maille de représentativité des données est de 4 km et les paramètres de

taille (longueurs et ouvertures) des fractures sont distribués log-normalement. Les linéaments présentent une quasi-invariance de forme à diverses échelles et correspondent donc à des objets fractals dont les dimensions fractales varient entre 1,6 et 1,8. On constate une anisotropie directionnelle des dimensions fractales, corroborant les pics directionnels relevés sur les rosaces d'orientation. À l'aide des paramètres géométriques obtenus, une carte des domaines structuraux, définissant les secteurs à degré de fracturation identique et constituant un outil indispensable pour l'évaluation du potentiel hydrique est dressée. Les deux méthodes (statistique et fractale) concordent bien et s'avèrent complémentaires pour définir les propriétés géométriques et les lois d'échelles des réservoirs de fissures de l'ouest ivoirien. Cependant, ces résultats restent encore partiels pour décrire toute la complexité de la fracturation du socle et un contrôle sur le terrain de la chronologie linéamentaire, associé à l'analyse de leur comportement hydraulique pourraient faciliter la conception de modèles géométriques mieux ajustés.

1. Introduction

La région d'étude est semi-montagneuse et se situe à l'ouest de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest), entre les latitudes 7° 21' et 8° N et les longitudes 7° et 8° 05' O (figure 1). Le relief se répartit entre une chaîne de montagne de direction NE-SO, encadrée par une zone de plateau. Le secteur montagneux présente des sommets avec des altitudes dépassant généralement les 1 000 m et correspondant au prolongement oriental de la chaîne du Fouta Djalon dont la plus grande partie se trouve en Guinée.

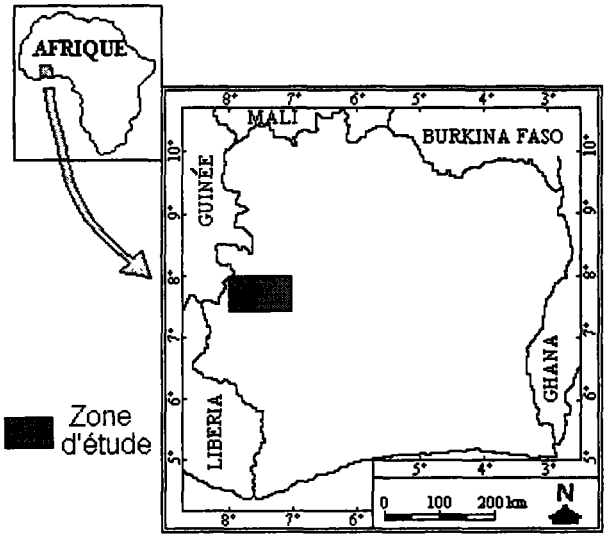


Figure 1. Localisation de la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire)

Depuis 1989, cette région est soumise à une forte pression anthropique liée à un fort taux de natalité associé à un flux migratoire brutal de réfugiés (Libériens, Guinéens et Sierra léonais) et à un exode des jeunes en quête d'emploi vers les centres urbains et de développement minier. Cette situation entraîne une consommation excessive des réserves d'eau qui, sont de plus en plus affectées par une diminution quantitative des précipitations enregistrées depuis trois décennies (PATUREL *et al.*, 1995). Pour faire face à ce surcroît de demande en une période à dominante sèche, une évaluation du potentiel hydrogéologique s'avère indispensable (BIÉMI *et al.*, 1998; KOUAMÉ, 1999). De plus, les programmes d'aménagements hydrauliques (irrigation, pisciculture, approvisionnements urbain, rural et industriel en eau) initiés par le Gouvernement et la Banque africaine de développement (BAD) posent avec acuité le problème de la gestion durable des ressources en eau. Pour ces raisons, une meilleure connaissance de la géométrie des aquifères complexes en contexte cristallin et cristallophyllien s'impose. Dans un tel environnement géologique, les possibilités de formation des réservoirs souterrains sont liées à la nature lithologique et surtout au degré de fracturation et/ou d'altération des roches. Du point de vue lithologique, les travaux de CAMIL (1984) et de KOUAMÉLAN (1996) distinguent deux compartiments séparés par la faille de Man-Danané (figure 2). Le compartiment nord, de nature granulitique,

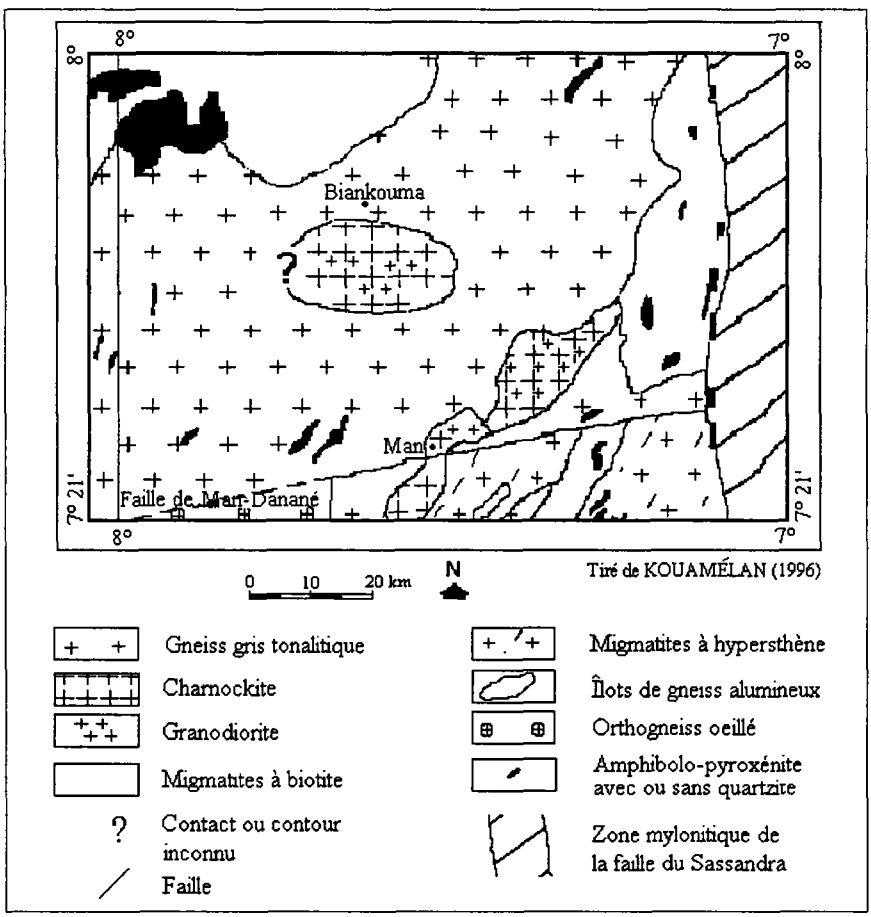


Figure 2. Aperçu géologique de la région d'étude

comporte des gneiss gris tonalitiques, des charnockites, des granodiorites, des migmatites à biotite et des amphibolo-pyroxénites. Le compartiment sud comprend des migmatites, des gneiss alumineux, des orthogneiss œillés et des quartzites à magnétite. L'analyse de la fracturation est opérée sous un double aspect : l'analyse quantitative des grandeurs géométriques et la compréhension des lois d'échelles du réseau linéamentaire 2 D (assimilable au réseau de fracture) extrait d'images satellitales par KOUAMÉ *et al.* (1999). Le traitement des données linéamentaires est proche de celui adopté par BODIN et RAZACK (1999).

2. Méthodologie

2.1. Données utilisées

La carte linéamentaire de KOUAMÉ *et al.* (1999) au 1 : 200 000 (figure 3), élaborée à partir des images satellitales TM de Landsat (scène 198-55, enregistrée le 04-01-1985, en saison sèche) et HRV(P) de SPOT (scène 44-335, enregistrée le 17-03-1988, en saison sèche également) constitue le support de base. Les données auxiliaires proviennent des cartes géologiques de CAMIL (1984) au 1 : 500 000, de KOUAMÉLAN (1996) au 1 : 1 000 000 et, enfin, de quelques mesures structurales effectuées à l'affleurement.

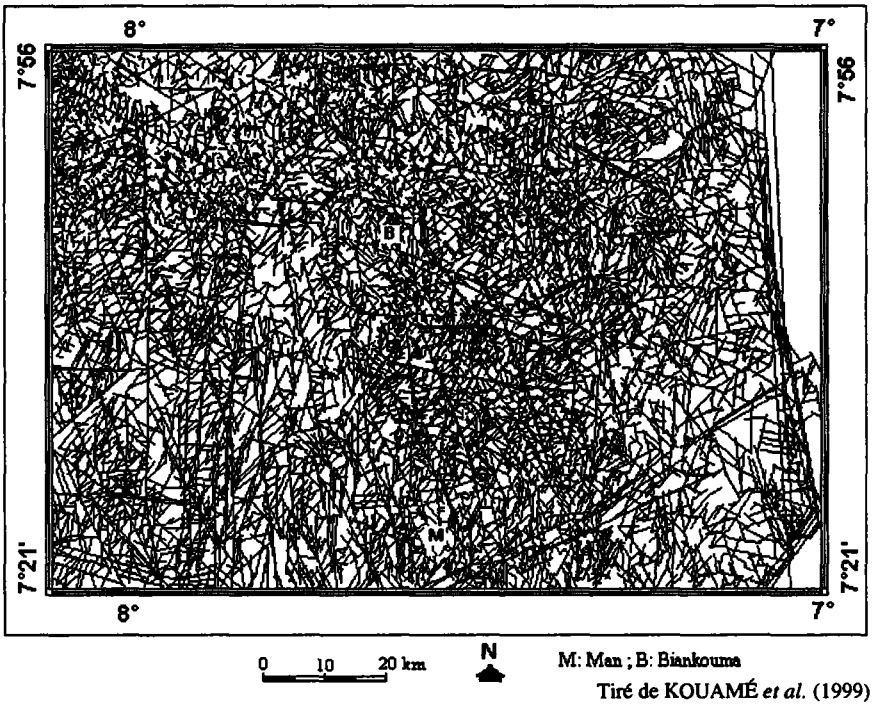


Figure 3. Carte linéamentaire extraite des images satellitales TM de Landsat et HRV (P) de SPOT de l'ouest semi-montagneux ivoirien

2.2. Analyses statistique et fractale

Le traitement statistique des données relatives à la fracturation permet de définir divers paramètres géométriques : orientation, longueurs, ouvertures des fractures, ainsi que leurs lois de distribution. Les discussions sur les modèles d'ajustement de ces paramètres sont encore très controversées (lois log-normale, exponentielle négative pour certains (RAZACK, 1982; ROULEAU and GALE, 1985) ou puissance pour d'autres (BOUR and DAVY, 1997; BODIN et RAZACK, 1999). Les avis sont divergents quant à la signification physique de ces lois et l'on pense que la nature de la loi de distribution est liée aux mécanismes génétiques de la fracturation (SORNETTE *et al.*, 1993).

Par ailleurs, l'échelle de représentativité des données est déterminée par le calcul des surfaces élémentaires représentatives (SER). Cette notion dérivant de celle du volume élémentaire représentatif (VER) est définie par BRACQ (1994) comme étant une surface à deux limites. La limite inférieure correspond à la surface minimale susceptible de contenir le minimum d'informations permettant l'établissement d'une rosace de directions représentatives et la limite supérieure représente la surface pour laquelle la rosace ne donne plus de directions représentatives. L'analyse des SER permet de définir la maille élémentaire représentative dont l'importance a été soulignée dans les travaux de DELAY *et al.* (1992), portant sur la détermination des relations directionnelles entre les linéaments morphostructuraux et les écoulements souterrains de la nappe du Cran d'Escalles. Cette maille de représentativité permet de calculer les densités linéamentaires et de dresser la carte des domaines structuraux.

L'approche fractale (MANDELBROT, 1975) permet d'analyser la répartition des linéaments à diverses échelles. L'intérêt du modèle fractal est de donner la possibilité d'extrapoler à des échelles supérieures, les caractéristiques géométriques des linéaments, mesurées sur des surfaces réduites. Les méthodes utilisées sont celles de comptage de boîtes et de répartition spatiale de masse appliquées par BODIN et RAZACK (1999).

3. Résultats et interprétations

3.1. Distribution des orientations, des longueurs et des ouvertures

Les rosaces directionnelles des linéaments de la région étudiée (figure 4a) présentent une répartition relativement homogène des directions avec certains pics dans les directions N170-180, N40-60 et N20-30. Dans la portion gauche (figure 4b) du territoire étudié, un léger pic dans la direction N80-90 s'ajoute aux directions précédentes. Quant à la portion droite (figure 4c), la même homogénéité, observée sur le secteur entier apparaît. À l'échelle régionale, les accidents de direction est-ouest sont à faible taux fréquentiel et disparaissent même des rosaces alors qu'au niveau de certains secteurs, ces pics directionnels ressortent. Sur les affleurements, les directions mesurées s'accordent aux résultats extraits des données satellitales.

La répartition des longueurs des linéaments dont les dimensions varient entre 91 m et 21 154 m, n'est pas uniforme. Les ajustements aux lois exponentielle négative et log-normale (figure 5a) n'expliquent pas de façon significative cette distribution (khi-2 négatif, au seuil de 10 %). Cependant, au niveau des mailles de 4 km, on observe une dissymétrie positive et un ajustement satisfaisant du modèle log-normale. Les mesures structurales effectuées à l'affleurement (longueurs et ouvertures) montrent aussi une distribution log-

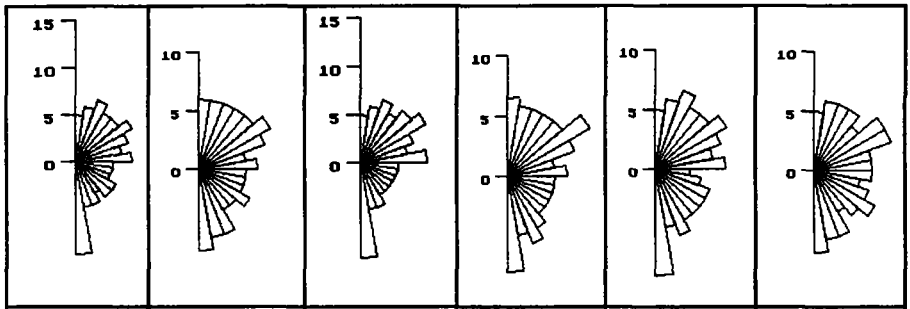


Figure 4. Distribution des orientations des linéaments : a) secteur entier, b) secteur gauche, c) secteur droit (Nb : nombre ; LC : Longueur cumulée)

normale (figures 5b et 5c). Cette loi statistique, vérifiée par le test du Khi-2 traduit la nature très complexe du champ fissuré.

3.2. Maille élémentaire représentative

En se basant sur les critères de représentativité portant sur le nombre critique de linéaments et le poids relatif des classes directionnelles, 200 SER ont pu être définies dans notre région d'étude. Les surfaces inférieures des SER varient entre 4,84 km² (2,2 x 2,2) et 19,36 km² (4,4 x 4,4), alors que les surfaces supérieures varient entre 7,29 km² (2,7 x 2,7) et 228,01 km² (15,1 x 15,1). À l'échelle des SER, 2 à 5 directions préférentielles s'individualisent et varient d'une SER à l'autre. La répartition des directions est cohérente pour la maille de

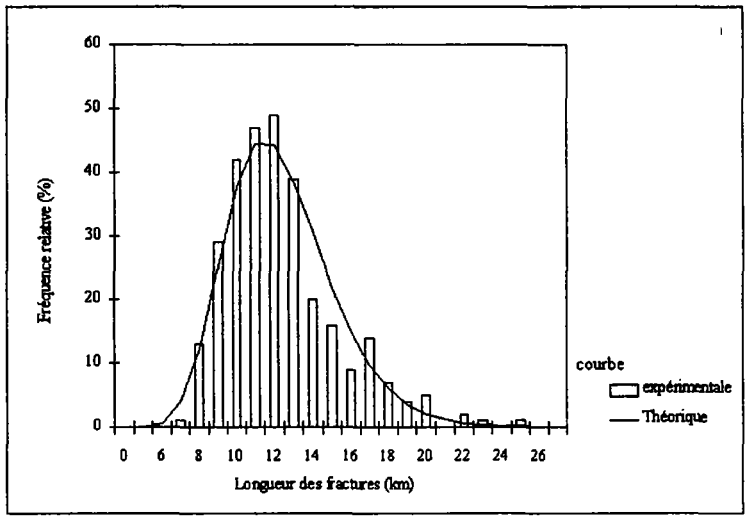


Figure 5a. Ajustement à la loi log-normale : longueurs des linéaments extraits des images satellitales.

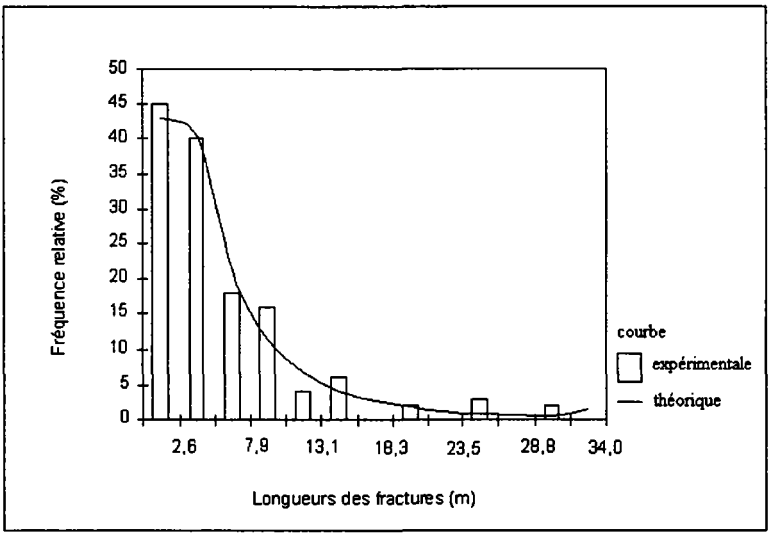


Figure 5b. Ajustement à la loi log-normale : longueurs des fractures relevées à l'affleurement.

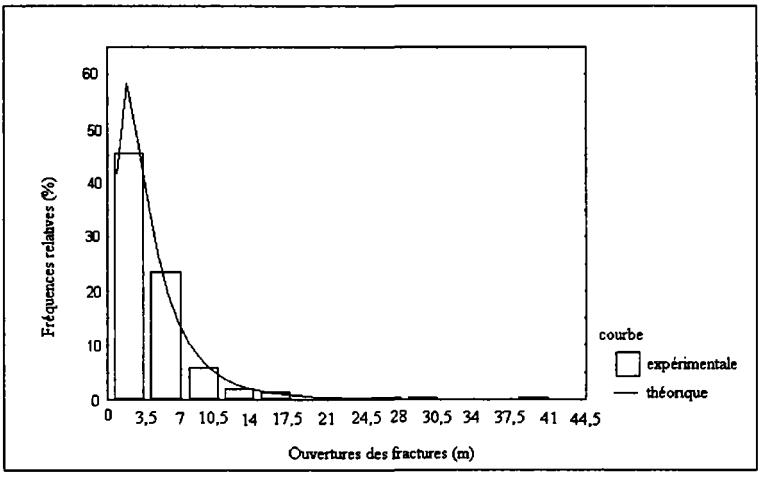


Figure 5c. Ajustement à la loi log-normale : ouvertures des fractures relevées à l'affleurement.

4 km de côté, correspondant à la maille élémentaire représentative, qui est utilisée pour la détermination des densités linéamentaires servant à la cartographie des domaines structuraux. Lorsque la taille de cette maille augmente significativement, de nombreuses données sont intégrées et les pics directionnels s'estompent progressivement, preuve que l'échelle d'investigation joue un rôle primordial dans la définition des paramètres géométriques quantitatifs des réseaux fissurés.

3.3. Répartition spatiale de la densité de fracturation

Deux cartes de densité de fracturation sont établies : l'une est basée sur le nombre de linéaments par maille, l'autre sur la longueur cumulée de linéaments par maille. Quatre classes (faible, moyenne, forte et très forte densités) sont déterminées en fonction du degré d'occurrence des linéaments (tableau 1). La combinaison des ces cartes a l'avantage d'associer les deux paramètres pour définir la carte des principaux domaines structuraux (figure 26-6) (voir cahier couleur). D'un point de vue général, la région semi-montagneuse est très fracturée et les ensembles à forte et très forte densités linéamentaires représentent environ 60 % du secteur étudié. Ils se localisent dans la zone centrale (Biankouma, Gbatodié, Zagoué, Gbonné et Zouandié). Deux axes de direction nord-sud s'ajoutent à cet ensemble. L'un, situé à l'est, est en rapport avec le couloir mylonitique du Sassandra, matérialisé sur la figure 1 et l'autre, à l'ouest, dans les environs de Yorodougou. Deux autres couloirs sub-orthogonaux se recoupant dans les environs de Zagoué sont matérialisés : l'un débutant à Foungouésso (extrême Nord de la carte) et se prolongeant jusqu'à Zagoué selon une direction NO-SE et l'autre commençant à Zouandié et se terminant à Zagoué.

3.4. Analyse fractale

Le caractère fractal du réseau linéamentaire est mis en évidence sur la figure 7a, sur une gamme d'échelle s'étendant sur à peu près 2 ordres de grandeurs (0,2 – 10 km). La dimension fractale est égale à 1,8. Les semis des centres de linéaments (figure 7b) présentent également un caractère fractal (dimension fractale estimée à 1,6) sur plusieurs ordres de grandeurs (0,2 – 50 km). Les linéaments présentent une quasi-invariance de forme à diverses échelles et correspondent à des objets pseudo auto-similaires. La limite inférieure estimée à 0,2 km, est liée à l'effet de troncature des linéaments de petite taille, que l'on attribue à la fois au type de support cartographique utilisé (images sarellitales TM de Landsat et HRV (P) de SPOT) et à la technique d'extraction linéamentaire. L'analyse fractale par classe directionnelle donnent des dimensions fractales variant entre 1,6 et 1,8

Tableau 1. Classification des densités linéamentaires en nombre et en longueur cumulée.

Critères / Classes de densité	Nombre de linéaments par maille	Longueur cumulée de linéament par maille (km)
Très forte	> 40	> 30
Forte	26-40	25-30
Moyenne	19-26	20-25
Faible	< 19	< 20

et qui sont du même ordre que celles définies par HIRATA (1989) au Japon. On constate une anisotropie directionnelle et la dimension fractale est la plus élevée dans les directions N170-180 (1,7) et N120-130 (1,6). Par ailleurs, VELDE *et al.* (1991) soutiennent que l'anisotropie directionnelle peut aussi être utilisée pour définir la chronologie des accidents.

L'intérêt des paramètres de géométrie fractale réside dans leur utilisation pour la modélisation des réseaux linéamentaires. Dans la simulation des écoulements au niveau des chenaux du réseau hydrographique, DEPRAETERE (1996) utilise la dimension fractale de l'arbre hydrographique comme un facteur de modulation des longueurs et des pentes en fonction de la résolution spatiale. Quant aux écoulements souterrains, les modèles déterministe de TAKAYUSU (1985) et stochastique de WATANABE (1986) intègrent également la dimension fractale des fractures pour simuler le transit de l'eau. La dimension fractale apparaît comme un paramètre morphologique indispensable à la connaissance des réseaux de fissure. En effet, sur la gamme d'échelle où le réseau est fractal, on peut extrapoler aisément les paramètres géométriques et générer des réseaux synthétiques, plus proches des réseaux naturels afin de modéliser les processus d'écoulement.

4. Conclusion

L'analyse des données linéamentaires 2D, orientée sur la définition des lois d'échelles caractérisant les longueurs et les ouvertures ainsi que la distribution spatiale des réseaux et centres de fractures constitue un moyen d'investigation adapté pour quantifier les

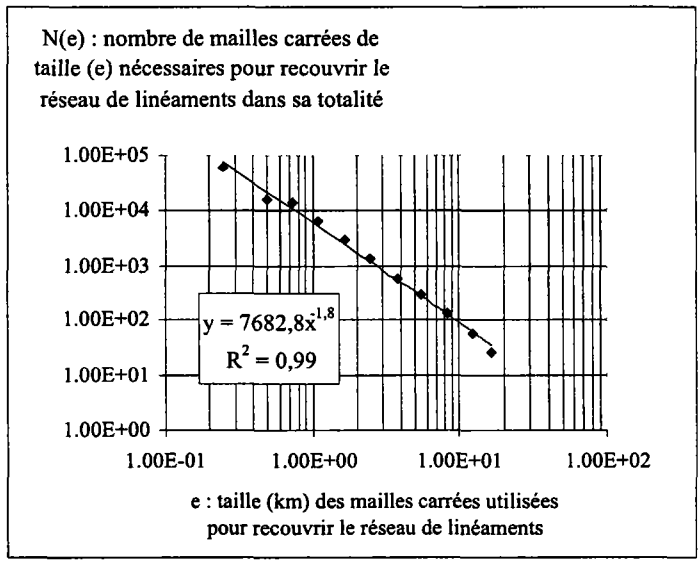


Figure 7a. Résultat de l'analyse fractale : réseau de linéaments par la méthode du « comptage de boîtes ». La régression entre les couples de valeurs [N(e), e] peut être ajustée par une loi de puissance mettant en évidence le caractère fractal du réseau linéamentaire.

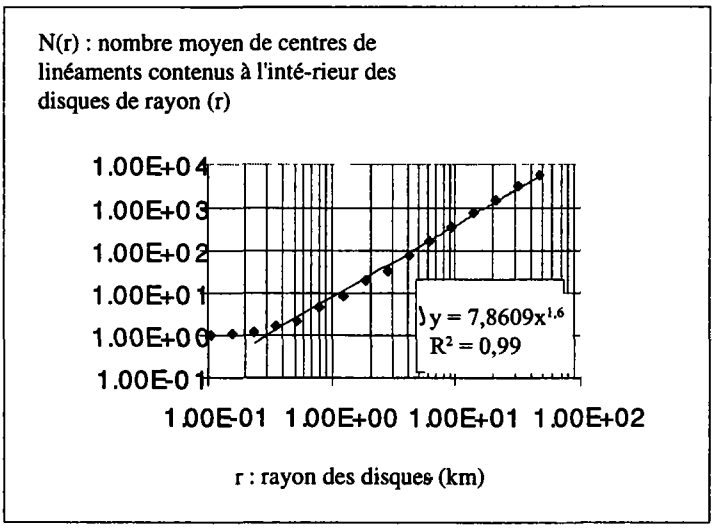


Figure 7b. Résultat de l'analyse fractale : centres de linéaments par la méthode de « répartition des masses ». La régression entre les couples de valeurs [N(r), r] peut être ajustée par une loi de puissance mettant en évidence le caractère fractal des centres de linéaments.

paramètres géométriques des réseaux de fractures. Les longueurs et les ouvertures des fractures sont distribuées log-normalement. Les linéaments présentent une quasi invariance de forme sur plusieurs ordres de grandeurs et correspondent à des objets fractals. La distribution spatiale des linéaments reste donc la même à diverses échelles. En combinant ces deux approches, statistique et fractale, les paramètres géométriques définis permettent de mieux appréhender la géométrie des réseaux linéamentaires de la région. Dans la suite de l'étude, un contrôle de la chronologie des accidents, associé à une analyse de leur comportement hydraulique et la recherche d'éventuelles relations entre les paramètres : longueur, espacement, position spatiale devraient réussir à mieux caractériser les lois d'échelles.

5. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'AUPELF-UREF d'avoir pu bénéficier de l'allocation du Fonds francophone de la recherche qui a financé partiellement cette étude.

6. Références

BIÉMI, J., GIOAN, P., AFFIAN, K., JOURDA, J. P. et KOUAMÉ, F. 1998. Système d'informations hydrogéologiques pour une évaluation des potentialités hydriques en milieu cristallophyllien fissuré : la région de Biankouma-Man (ouest de la Côte d'Ivoire). *in* J.-M. Dubois, M. Bernier, J. -P. Fortin et F. Boivin (dir). La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes, Édition Agence universitaire de la francophonie, Montréal, p. 261-270.

BODIN, J. et RAZACK, M. 1999. L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelles. Bulletin de la Société géologique de France, t. 170, n° 4, p. 579-593.

BOUR, O. and DAVY, P. 1997. Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution. Water Resources Research, vol. 7, p. 1567-1583.

BRACQ, P. 1994. L'effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux : apports de l'analyse morphostructurale. Société géologique du nord, Lille, 244 p.

CAMIL, J. 1984. Pétrographie, chronologique des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de doctorat d'État, Université de Côte d'Ivoire, 306 p.

DELAY, F., BRACQ, P. et COLBEAUX, J. P. 1992. Cartographie numérique de linéaments morphostructuraux : exemple d'application à l'hydrogéologie de la craie du Nord de la France. Bulletin de la société géologique de France, t. 163, n° 3, p. 345-352.

DEPRAETERE, C. 1996. Module de simulation des écoulements : Fonction de Transfert Morphologique (FTM). Annales de l'ORSTOM, n° 56, 44 p.

HIRATA, T. 1989. Fractal dimension of fault systems in Japan : fractal structure in rock fracture geometry at various scales. Pure Application Geophysics, vol. 131, n° 1-2, p. 157-170.

KOUAMÉ, K. F. 1999. Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire). Apports des données des images satellitales, des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de doctorat, Université de Cocody, 200 p.

KOUAMÉ, K. F., GIOAN, P., BIÉMI, J. et AFFIAN, K. 1999. Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitales : exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Télédétection, vol. 1, n° 2, p. 1-18.

KOUAMÉLAN, A. N. 1996. Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 277 p.

MANDELBROT, B. 1975. Les objets fractals : forme, hasard et dimension. Édition Flammarion, Paris, 190 p.

PATUREL, J. E., SERVAT, E., KOUAMÉ, B. et BOYER, J. F. 1995. Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. Sécheresse, vol. 6, n° 1, p. 95-102.

RAZACK, M. 1982. À propos d'une loi de distribution des fractures : intérêt pour l'hydrogéologie des aquifères fissurés. Compte rendu de l'Académie des sciences de Paris, t. 294, série II, p. 1295-1298.

ROULEAU, A. and GALE, J. E. 1985. Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, vol. 22, n° 6, p. 353-367.

SORNETTE, A., DAVY, P., and SORNETTE D. 1993. Fault growth in brittle-ductile experiments and mechanics of continental collisions. Journal of Geophysics Research, vol. 98, n° 12, p. 111-139.

TAKAYUSU, H. 1985. A deterministic model of fracture. Progress of Theoretical Physics, 74, p. 1343-1345.

VELDE, B., DUBOIS, J., MOORE, D. and TOUCHARD, G. 1991. Fractal patterns of fractures in granites. Earth and Planetary Science Letters, n° 104, p. 25-35.

WATANABE, K. 1986. Stochastic evaluation of the two dimensional continuity of fractures in rock mass. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, vol. 23, n° 7, p. 431-437.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 263-270

27

Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso : cas du bassin versant de Bidi (province du Yatenga)

YOUSSOUF KOUSSOUBÉ et ALAIN NINDAOUA SAVADOGO

Laboratoire d'hydrogéologie, Université de Ouagadougou, B.P. 7021, Ouagadougou, Burkina Faso; téléphone : (226) 30 70 20; télécopieur : (226) 30 72 42; courriel : youssouf.koussoube@univ-ouaga.bf

Résumé

Dans la zone Sahélo-soudanienne de Bidi, l'utilisation des données de télédétection et le recalage par des données de terrain a permis de caractériser les fractures. Des images HRV de SPOT en formats numérique et analogique ainsi que des photographies aériennes panchromatiques ont permis l'identification et la caractérisation des linéaments. Ces linéaments ont été confirmés sur le terrain par des dispositifs appropriés de mesures géophysiques (électriques et électromagnétiques) et par des observations de terrain (en hydrogéologie, en microtectonique, en géomorphologie et en botanique). Cette méthodologie de travail a permis de cerner et de différencier trois signatures de fractures enfouies sous des altérites épaisses de 10 à 50 m : 1) les fractures signalées par des alignements de végétation (type A) sont les plus nombreuses dans le massif granitique syntectonique de Bidi (80 % de la surface du bassin versant); certaines espèces végétales hydrophiles soulignent bien ces fractures ouvertes; 2) les fractures signalées par des contrastes de tonalité et de texture (type B) correspondent à des failles qui s'illustrent par des paliers de résistivité apparente; 3) les fractures signalées par des corniches rectilignes de cuirasses latéritiques (type C) correspondent à des failles tardives qui ont imposé leur direction à des zones d'altération privilégiée. En matière d'hydrogéologie de socle cristallin, les chances de succès des forages d'eau sont plus importantes lorsque l'on s'adressera préférentiellement,

par ordre de préférence, aux linéaments de type B, de type A et de type C.

1. Introduction

En hydrogéologie et en géologie minière du socle cristallin, il importe de trouver les signatures permettant de cartographier rapidement des structures de déformations majeures (failles, structures filoniennes, contacts géologiques, zones de cisaillement) qui sont enfouies sous des altérites. En hydrogéologie notamment, des études récentes ont montré des débits importants dans des zones de failles et de filons ainsi qu'au niveau des contacts géologiques (DU BERGER *et al.*, 1996). La détection rapide de ces structures dans les zones cristallines trouve donc son importance et leurs signatures par diverses méthodes d'approche. C'est pourquoi nous allons tenter de reconnaître ces fractures dans la zone granitique du bassin de Bidi situé au nord du Burkina Faso (figure 1).

2. Contexte physique de l'étude

Le bassin de Bidi couvre une superficie de 157 km^2 environ. Il se situe entre les coordonnées 13°25 et 14°00 N et 2°25 et 2°35 O. Le climat est de type sahélo-soudanien selon la définition de AUBRÉVILLE (1949). La région est caractérisée par un recouvrement quasi général du sol par des produits d'altération de sable hydro-éolien, d'épandage gravillonnaire, de cuirasse latéritique et d'altérites argileuses (saprolite, argiles tachetées indurées) dont l'épaisseur peut souvent dépasser 50 m. Le substratum est formé de roches cristallines dont

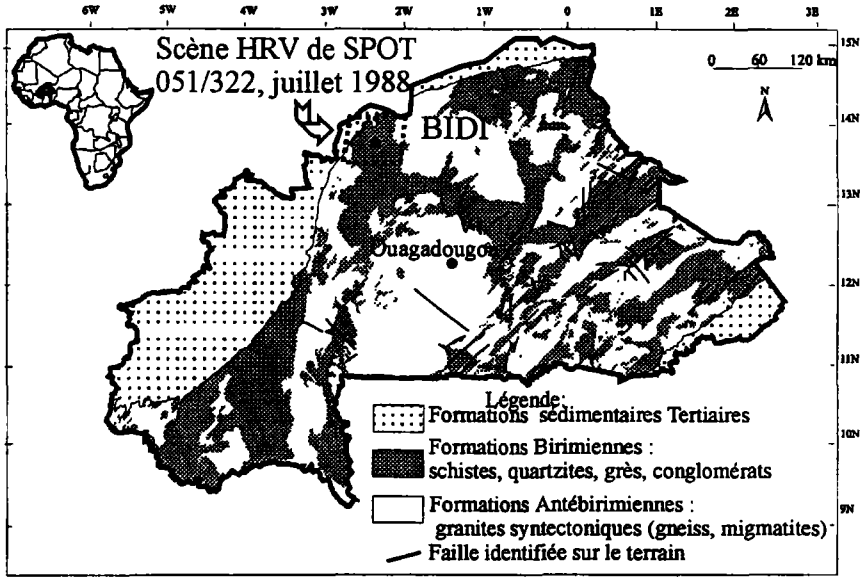
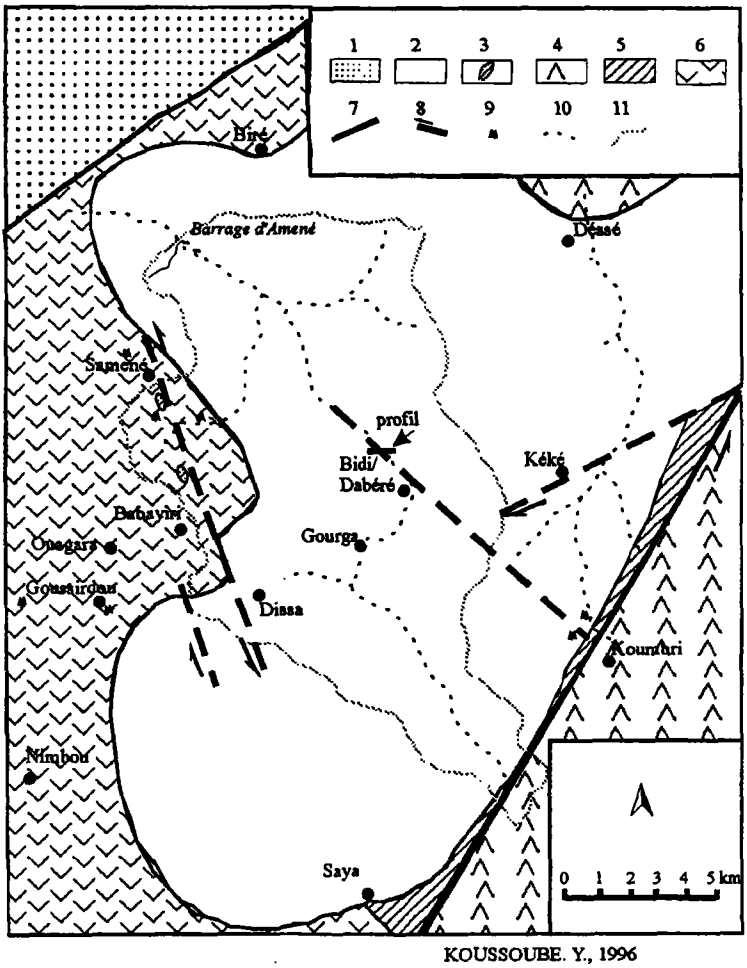


Figure 1. Carte géologique simplifiée du Burkina Faso (d'après HOTTIN et OUÉDRAOGO, 1975) et situation de la zone d'étude

les aires de répartition sont de 91 % pour le granite syntectonique (2,1 milliards d'années d'après BOHER *et al.*, 1992), de 8 % pour l'unité volcano-sédimentaire (gabbros, schistes, etc.) et seulement de 1 % pour les volcanites basiques (figure 2). La végétation est de type steppe arbustive et arborée sur interfluve et de type forêts-galeries dans les bas-fonds. Le relief est peu contrasté avec des altitudes variant entre 280 et 360 m. Les buttes latéritiques en plateau, en croupe ou en cuesta, forment l'essentiel du relief. C'est dans ce contexte physique que plusieurs méthodes ont été utilisées pour bien caractériser les fractures du socle cristallin.



Légende : 1- grès et argiles sableuses du Continental terminal; 2- granitoïdes du massif de Bidi; 3- séries de roches volcaniques et sédimentaires acides et basiques; 4- gabbros (unité volcano-sédimentaire); 5- schistes versicolores (unité volcanique); 6- basalte et andésite (unité volcanique); 7- faille transcurrente de Koumbri; 8- zone de cisaillement; 9- zone d'orpaillage; 10- réseau hydrographique; 11- limite du bassin versant de Bidi

Figure 2. Carte géologique de la région d'étude (Bidi, province du Yatenga)

3. Méthodologie

Une interprétation visuelle de l'imagerie aéroportée et spatiale (figures 27-3 et 27-4) (voir cahier couleur) a permis de distinguer trois types linéamentaires : 1) les alignements de végétation (type A) correspondant à des alignements d'arbres et de hautes herbes bien visibles sur les photographies aériennes (mission 84066B de décembre 1984 dont la prise de vue aérienne eut lieu entre 8 h 00 et 9 h 30 avec des lignes de vols est-ouest) et les compositions colorées d'images satellitaires HRV de SPOT (scène 051/322, juillet 1988); 2) les contrastes de tonalité et de texture (type B) représentant les plages sombres contrastant avec des plages plus claires ou inversement; 3) les alignements de corniches de cuirasses latéritiques (type C).

Plusieurs méthodes ont été déployées pour la vérification sur le terrain des trois types de linéaments identifiés : examen des états de surface du sol (géologie, géomorphologie, microstructures sur affleurement rocheux, faune du sol notamment les termitières en cheminées), prospection géophysique par des profils électriques (méthodes des résistivités, dispositif Schlumberger) et électromagnétiques (Apex MaxMin en bobines horizontales). Ces résultats sont exprimés sous forme de cartes et de courbes.

4. Résultats et interprétations

4.1. États de surface du sol et linéaments

Les alignements de végétation représentent plus de 80 % des linéaments distingués dans le bassin versant de Bidi, dont le substratum est essentiellement granitique (figure 27-4) (voir cahier couleur). Parmi les espèces arborées d'interfluves, on peut citer *Butyrospermum parkii, Ficus gnaphalocarpa, Parkia biglobosa, Lannea microcarpum* des espèces arbustives et sous-arbustives (*Piliostigma reticulatum, Diospyros mespiliformis*) ; des hautes herbes comme *Andropogon guayanus,* qui soulignent bien les zones humides. En plus des espèces végétales, il y a également les édifices de termitières en cheminées (*Macrotermes bellicossus, Macrotermes subhalinus*) qui soulignent bien la fracturation par des alignements souvent remarquables (SAVADOGO, 1984). Le type linéamentaire B (contraste de tonalité et de texture) représente 8 % de l'ensemble des photos-linéaments du bassin de Bidi, avec la nature du substratum rocheux. La plus grande densité de linéament de type B se rencontre dans la zone à substratum volcanique et volcano-sédimentaire. Les signatures sur le terrain sont très diversifiées : il peut s'agir de contact géologique, de limite d'affleurement ou des altérations différentielles des sols. Le type linéamentaire C (corniches rectilignes de cuirasse latéritique) ne représente que 1 % des photos-linéaments du bassin de Bidi. Leur prépondérance est remarquable dans les environnements volcaniques et volcano-sédimentaires à nombreux reliefs cuirassés ou carapacés. Très fréquemment, les trois types de linéaments identifiés sont soulignés par des édifices biologiques de termitières épigées (*Macrotermes*).

4.2. Répondants des linéaments avec les méthodes géophysiques

4.2.1. Le type A

Les courbes des traînés électriques montrent des anomalies conductrices de résistivités apparentes qui présentent des formes variées correspondant à des linéaments de type A. Par ailleurs, ces alignements de végétation sont aussi soulignés par des paliers de hautes valeurs de résistivités apparentes (horst à substratum sub-affleurant) et des basses valeurs de résistivités apparentes (graben à substratum effondré).

4.2.2. Le type B

Dans certains cas, les failles sont soulignées par un contraste de tonalités marqué par des zones de hautes valeurs de résistivités apparentes passant à des zones de basses valeurs. Les cartes de résistivités apparentes illustrent bien ces zones de failles (KOUSSOUBÉ, 1996).

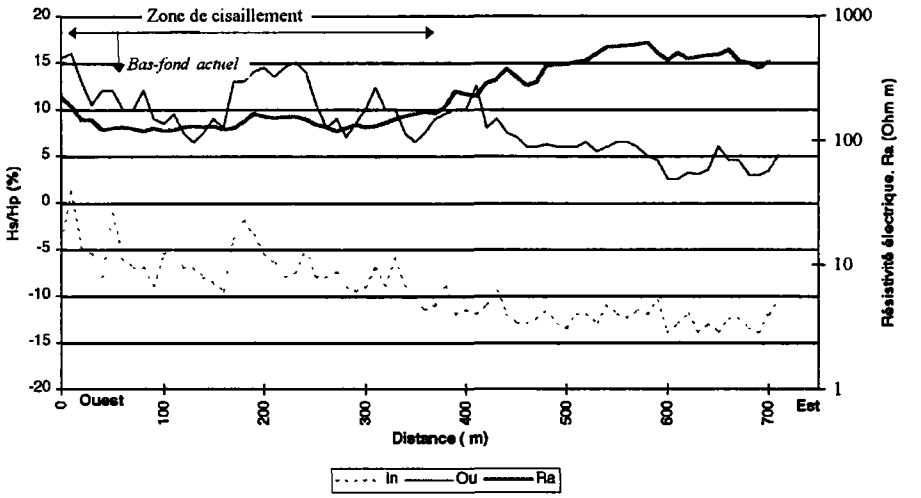
4.2.3. Le type C

Les contacts anormaux entre granite et volcano-sédiments correspondants à des linéaments apparaissent sous forme de contraste de tonalité (type B), d'alignement de cuirasses latéritiques (type C) et de termitières épigées; ils sont bien identifiés par la composante imaginaire (*outphase*).

La zone de cisaillement central du bassin de Bidi montre une large anomalie conductrice en résistivités apparentes avec un sursaut de la composante imaginaire du MaxMin dans la zone axiale de la structure (figure 5). Ce couloir de déformation majeure, long de plusieurs kilomètres, correspond à une association des types linéamentaires A, B et C (figures 1 et 3).

4.3. Mesures structurales et directions de déformation

Les observations et mesures faites sur les affleurements rocheux ont permis de mieux comprendre et de relativiser les directions linéamentaires mises en évidence. Deux directions principales de forte densité (est-ouest) et nord-sud sont observés sur les affleurements rocheux. De plus, ces fractures tardives sont en majorité verticales (KOUSSOUBÉ, 1996). En outre, l'étude structurale de terrain a révélé une faille transcurrente sénestre N50°E passant près de Koumbri (figure 2) se manifestant sur l'image satellitaire sous forme d'un contraste de tonalité diffus (figures 27-3 et 27-4) (voir cahier couleur). Elle est identifiée par télédétection spatiale et par des marqueurs divers de terrain : étirement de minéraux de quartz, paragénèse minérale à chlorite + séricite + calcite + quartz, boudinage de quartz faiblement minéralisé en or, panneaux sigmoïdes d'andésite dans le basalte. Des zones de cisaillements identifiées sur le terrain et correspondant à des laminages affectent aussi bien les roches encaissantes volcano-sédimentaire et volcanique que le massif granitique lui-même. Ces zones sont allongées en couloirs de longueur pluri-kilométrique et de largeur métrique à hectométrique suivant trois directions reconnues : N65°E, N165°E et N130°E (figure 2).



Légende: Ra : Résistivité apparente du sol par la méthode électrique des résistivités (pas de mesure de 10 m, longueur de ligne de 180 m, mesure de la différence de potentiel de 20 m); In, Ou = composantes en phase et en quadrature du MaxMin en bobines horizontales (séparation des bobines de 100 m, fréquence d'émission 3520 hertz); Hs/Hp: rapport du champ secondaire Hs sur le champ primaire Hp (en %).

Figure 5. Signature de la zone de cisaillement central de Bidi (voir situation des profils sur la figure 2 par les méthodes géophysiques électromagnétique (MaxMin) et électrique

5. Discussion

Les photos-linéaments à l'échelle du 1 : 50 000 ne montrent pas les directions des failles décrochantes tardives (failles en relais, faille transcurrente) qui sont pourtant bien observées sur le terrain, malgré l'échelle assez grande des photographies aériennes par rapport à l'imagerie satellitaire. Cette lacune des directions N120 à N140°E serait liée en partie à la position du soleil qui ne permet pas de bonnes réflectances des structures au sol orientées sud-est pour des lignes de vol est-ouest. Par ailleurs, l'image numérique HRV de SPOT (XS) présente également une lacune suivant les directions N15 à N30°E (figure 27-4) (voir cahier couleur) correspondant à la trajectoire du satellite SPOT; les structures linéamentaires qui sont parallèles ou sub-parallèles à la trajectoire du satellite (N25°E) sont ainsi masquées.

6. Conclusion

Le réseau linéamentaire en trois types (alignements de végétation, contraste de tonalité et de texture, corniches de cuirasses) établi à partir d'images satellitaires à haute résolution et de photographies aériennes panchromatiques en période sèche de l'année, permet de bien caractériser le réseau de socle cristallin. Ces linéaments montrent la prépondérance des alignements de végétation dans un contexte granitique de milieu sahélo-soudanien. Ces linéaments de type A représentent donc des couloirs où le stock hydrique important permet

la bonne croissance d'espèces végétales. Mieux, lorsque la structure linéamentaire résulte de l'association des trois types de linéaments (contraste de tonalité et de texture, corniches de cuirasse), l'anomalie conductrice est plus importante comme l'ont confirmé les travaux de géologie de terrain et de géophysique.

De plus, les travaux de terrain ont permis d'identifier des zones de cisaillements sub-méridiennes sénestres et NE-SO dextres ainsi qu'une large zone (plus de 150 m) centrale longeant et prolongeant l'axe majeur du bas-fond de Bidi à la hauteur de Dabéré correspondant à une structure linéamentaire A + B + C. Cette structure centrale contrôlerait les déformations majeures dans le bassin granitique de Bidi. Les fractures, filons et failles tardives en ouverture ou en extension peuvent présenter une conductivité hydraulique plus élevée que la roche cristalline initiale. Ces fractures ouvertes s'expriment dans la géomorphologie par le réseau hydrographique et les alignements de corniches de cuirasse. Les linéaments de type A correspondent à une végétation active et dense qui peut être un indice intéressant de prospection hydrogéologique, surtout en saison sèche. Les linéaments de type contraste de tonalité et de texture sont des failles d'importance hydrogéologique certaine. Aussi, les directions sud-est correspondent-elles à celles des filons de pegmatites sont des structures ouvertes à rechercher dans les investigations géophysiques. Les linéaments de type B sont les expressions de l'ouverture par distension du socle granitique syntectonique de Bidi. Le potentiel hydraulique de ce genre de structures est évident comme le témoigne le seul forage à gros débit de tout le bassin de Bidi. Les fractures de type C sont nombreuses dans la zone sahélo-soudanienne et constituent des zones de circulations préférentielles d'eau et de fluides minéralisateurs. Les anomalies fortement marquées présagent des altérations épaisses qui rendraient difficile le sondage des forages d'eau.

7. Remerciements

Les auteurs remercient le Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie dont la contribution a été déterminante dans notre participation aux VIII^{èmes} journées scientifiques de Lausanne (Suisse).

8. Références

AUBRÉVILLE, F. 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales. Paris, 351 p.

BOHER, M., ABOUCHAMI, W., MICHARD, A., ALBARÈDE, F. and ARNDT, N.T. 1992. Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga. Journal of Geophysical Research, vol. 97, n° B1, p. 345-369.

DU BERGER, R., LEMIEUX, G.H., ROULEAU, A., BÉGIN, R., SAVADOGO, A.N., NAKOLENDOUSSÉ, S., KOUSSOUBÉ, Y. et DIALLO, S. 1996. Etude des facteurs de productivité des aquifères de socle cristallin du Burkina Faso. Rapport final, Centre d'études des ressources minérales de l'Université du Québec à Chicoutimi et Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou, 70 p.

HOTTIN, G. et OUÉDRAOGO, O.F. 1975. Notice explicative de la carte géologique à 1 : 1 000 000 de la république de Haute-Volta. Éditions du Bureau de recherches géologiques et minières, 56 p.

KOUSSOUBÉ, Y. 1996. Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso, cas du bassin versant du bas-fond de Bidi. Thèse de doctorat, Université de Dakar, 210 p.

SAVADOGO, A.N. 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de doctorat, Université Scientifique et médicale de Grenoble, 340 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 271-277

28

Télédétection appliquée à l'étude de l'érosion hydrique et de l'ensablement des rizières dans la région sud du lac Alaotra (Madagascar)

LEA JACQUELINE RAHARIJAONA RAHARISON, TOKINOMENA AIMBELONTSIRY RAMERISON et RAFANOMEZANTSOA MANUEL ANDRIANILAINA

Département de géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, B.P. 1500, Antananarivo, Madagascar; téléphone : 261 20 22 276 96; télécopieur : 261 20 22 248 54; courrier : ljrahari@syfed.refer.mg

Résumé

Les données TM de Landsat de la région sud du lac Alaotra (Madagascar) ont fait l'objet de traitements numériques pour l'évaluation des états de surface face à l'érosion hydrique et à l'ensablement des rizières. L'état de surface a été caractérisé en termes de types de sols, d'hydrologie et de couverture végétale. La carte de couverture du sol obtenue est le résultat de la classification dirigée par maximum de vraisemblance. Deux sites-tests ont été choisis pour évaluer la capacité de l'imagerie TM pour identifier, classer et cartographier. Le premier site retenu est la plaine rizicole de Sasomangana pour l'identification des zones d'ensablement dans les rizières. Pour l'étude de l'érosion hydrique, nous avons utilisé, comme second site, le bassin versant de Sasomangana, en raison de la diversité de ses sols. La classe hydrologique des sols est établie selon la méthode SCS (*Soil Conservation Service*). La combinaison des classes de pente et d'occupation du sol a permis de classer les sols entre quatre groupes hydrologiques A, B, C et D. L'utilisation conjointe du SIG et de la télédétection permet de déterminer les zones sensibles à l'érosion en vue d'une meilleure prévention des risques.

1. Introduction

La région sud du lac Alaotra est particulièrement touchée, ces 30 dernières années, par l'érosion hydrique très importante dans les sols ferrallitiques issus surtout de l'altération des migmatites (RAUNET, 1984). Les conséquences économiques sont importantes au plan des pertes en sols. Les rizières sont constamment menacées par l'ensablement dont on connaît les effets néfastes sur les rendements et les coûts de production (RAHARIJAONA RAHARISON et RANDRIANARISON, 1997).

L'objectif de ce travail vise à tester l'utilisation de l'imagerie TM de Landsat pour estimer la répartition en plaine des zones ensablées et les classer ainsi qu'identifier les zones hydrologiques homogènes des sols du bassin de Sasomangana et les cartographier.

Une longue vallée, dont la superficie agricole couvre 9 350 ha, est occupée principalement par la plaine de Sasomangana. Quant au bassin versant de Sasoamangana (16 450 ha), il repose sur un substratum rocheux migmatitique recouvert d'une savane arborée. Ce bassin est en climat tropical et reçoit en moyenne 1 138,9 mm de pluie par an concentrée entre octobre et mars, d'après les données de la Météorologie nationale.

2. Matériel et méthode

L'étude a été réalisée sur image TM de Landsat 158-072 du 15-09-1993. Les vérifications et les aides à l'interprétation ont été effectuées à partir de cartes topographiques de 1974 au 1 : 50 000 et de photographies aériennes de 1988 au 1 : 20 000. Les logiciels utilisés sont VISTA pour le traitement d'images, IDRISI pour les SIG, ROOTS et TOSCA pour la numérisation des cartes topographiques. Les pentes sont dérivées du MNA. Sur la figure 1 (tableau 1), on résume le schéma de traitement de l'image sur les données du domaine de la plaine. La démarche adoptée doit déboucher sur une statistique et une cartographie des classes identifiées et permet d'apprécier le degré de corrélation entre les réponses spectrales et les paramètres de terrain.

3. Résultats

3.1. Ensablement dans la plaine de Sasomangana

L'élimination du domaine extérieur à la plaine a été réalisée par création d'un masque. Les canaux TM2, TM3 et TM4 ont été retenus pour réaliser la composition colorée sur laquelle a été effectuée la classification dirigée à huit classes (figure 28-2) (voir cahier couleur). Les zones ensablées se répartissent sur l'image en deux classes : les sols nus (classe 6) très réflectants lorsqu'ils sont secs, même s'ils sont très partiellement ponctués par de la végétation éparse, et les sols de marais (classe 8) moins réflectants, car ils sont humides.

La méthode de quantification utilisée a permis de comptabiliser le nombre de pixels à l'intérieur de chaque zone identifiée et de le convertir en hectares de superficie couverte par chaque classe. La superficie totale des zones ensablées a été estimée à 1 796 ha, dont 648 ha de surface à sables secs et 1 147 ha occupés par des sables humides de marais (tableau 2). Les rizières intactes couvrent une superficie de 4 815 ha, soit 52 % de celle de la plaine. Les types d'états de surface rencontrés dans la région sont décrits sur le tableau

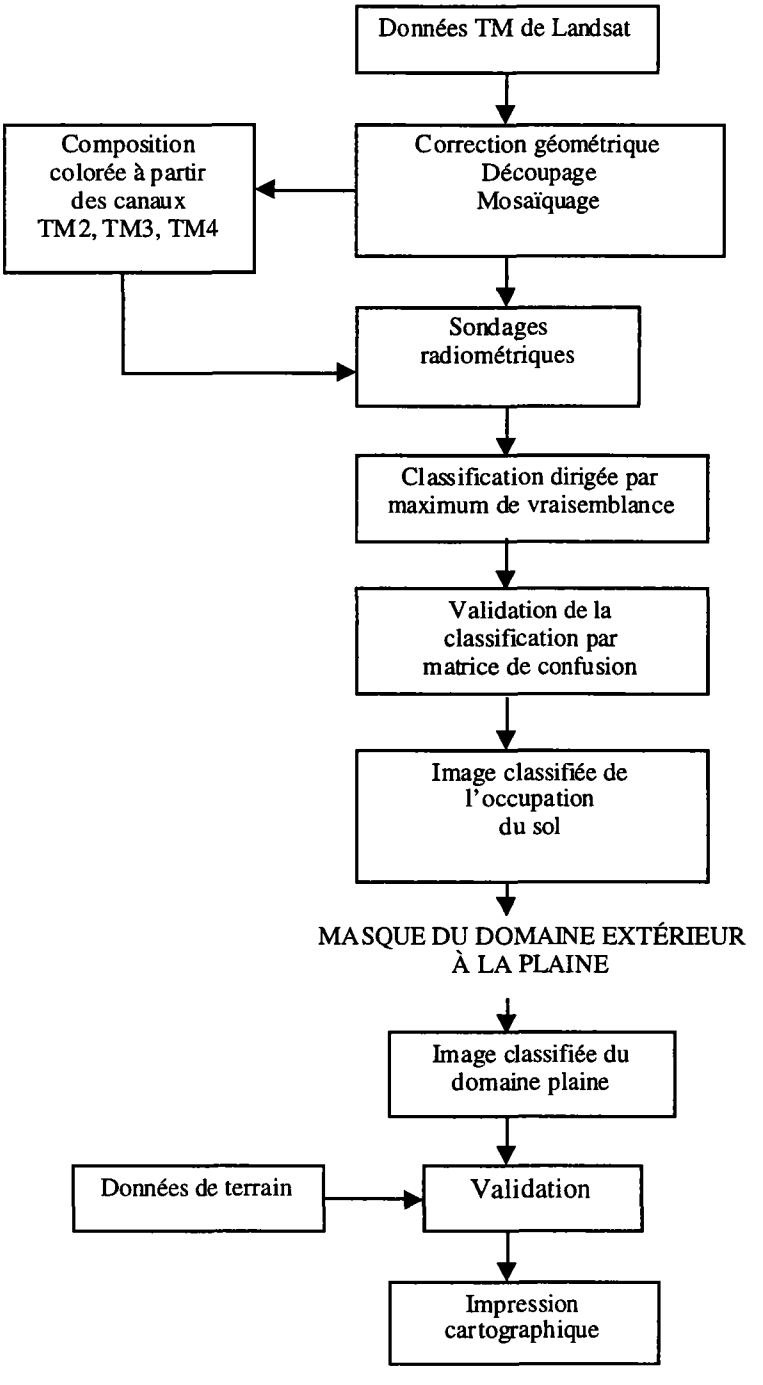


Figure 1. Organigramme des traitements numériques des données TM de Landsat de la plaine rizicole de Sasomangana

Tableau 1. Statistiques d'occupation du sol dont la cartographie a été établie par télédétection pour la plaine rizicole de Sasomangana (figure 1).

Numéro et nom de classe (sous-classe)	% de surface couverte	Superficie en ha
1 Plans d'eau	0,8	78,1
2 Rizières	51,5	4814,9
3 Forêt ripicole	7,1	666, 9
4 Prairie à *Cynodon dactylon*	1,8	168,0
5 Prairie à *Digitaria humberti*	17,4	1622,4
6 Sols nus (sable sec)	9,9	648,4
7 Forêts primaire	2,1	199,2
8 Marais (sable mouillé)	12,3	1147,4
Total	102,9	9345,3

2, ce qui représente 88,3 % de la superficie totale des rizières.

3.2. Cartographie hydrologique des sols

À l'échelle du bassin de Sasomangana, la carte de l'occupation du sol et celle des groupes hydrologiques de sols ont été établies. Le résultat de la classification a permis d'identifier cinq grands ensembles (figure 28-3) (voir cahier couleur). La statistique a montré qu'il s'agit d'un bassin versant dont 43 % de la surface est occupée par ce type de couverture.

Tableau 2. Description des états de surface de chaque catégorie d'occupation du sol identifiée dans la plaine de Sasomangana en tenant compte des critères du mode d'utilisation et du type de sol selon sa répartition et son état d'humidification.

Occupation sol	Utilisation sol	Description des états de surface
Sols nus (n° 6)	Jachère	Surfaces à sables grossiers, sans couvert herbacé, sols secs réflectants
Rizière (n° 2)	Jachère	Surfaces à limons argileux sur champ labouré
Marais (n° 8)	Riziculture avec travaux de drainage	Surfaces à sables fins sur sols hydromorphes, semi-tourbeux, sables mouillés à Cypracées, peu réflectants
Forêt primaire (n° 7)	Réboisement et arboriculture frutière	Surfaces à sols humifères portant des vestiges de forêt naturelle.
Forêt ripicole (n° 3)		Surfaces à sols argilo-sableux sur bas-fonds humides
Prairie à *Cynodon dactylon* (n° 4)	Pâtures	Surfaces à sols hydromorphes tourbeux sur marécages
Prairie à *Digitaria humberti* (n° 5)	Pâtures	Surfaces à sols hydromorphes argileux sur bourrelets alluviaux.

La précision globale de la classification, calculée à partir de la matrice de confusion, est de 95 %.

Sur la carte de la figure 28-4 (voir cahier couleur), on présente les interactions entre l'occupation du sol et les états de surface du sol face à l'érosion : texture du sol, son état de dénudation et son état hydrologique. Les valeurs de coefficient de ruissellement utilisées (tableau 3) sont celles proposées par COLOMBET (1977). Pour notre zone, les valeurs de potentiel de ruissellement CN s'échelonnent entre 36 et 94, connaissant les paramètres : occupation du sol, pente et type de sols. Pour les types de sols, chaque unité pédologie identifiée est traduite dans le groupe hydrologique correspondant dans le modèle SCS (tableau 3). BOUSSEMA et CHAIRAT BEN ABDALLAH (1995) ont évalué CN en appliquant la méthode de pondération.

Tableau 3. Description des catégories d'utilisation du sol suivant la méthode SCS permettant de classer les sols en groupes hydrologiques identifiés par les lettres A, B et C pour une situation de fin de saison sèche/début de saison de pluies. Les états de surface sont caractérisés en termes de sol selon sa texture, son état de dénudation et son état hydrologique. Les rizicultures se comportent hydrologiquement comme une jachère à cette période de l'année.

Occupation	Catégories	Classes des sols par groupe hydrologique et description de leurs états de surface	Etat hydrologique	Potentiel de ruissellement CN par groupe hydrologique de sols			
				A	B	C	D
Forêt	Végétation arbores-cente	Sols du groupe A : Surface humifère très faiblement érodée, sols forestiers, légère érosion en nappe, c=0,20	Moyen	36	60	73	79
Savane	Pâtures	Sols du groupe C : Surface légèrement perméable et durcie, à couvert arboré clair et à sols fins à moyens ferrallitiques sableux sur migmatites, sols dénudés par suite d'érosion en nappe, en ravin et en la lavaka, c=0,60 - 0,80	Moyen si non brûlée	49	69	79	84
			Mauvais si brûlée	44	66	77	83
Sols nus	Jachère	Sols du groupe B : Surface dénudée ponc-tuée de végétation éparse, à sols absor-bants sableux, érosion faible ou nulle, plutôt ensablement, c=0,30	Mauvais	68	79	86	89
Rizières	Jachère	Sols du groupe D : Surface peu soumise à l'érosion, sols limono-sableux, absorbants c=0,40	Mauvais	77	86	91	94

4. Discussion

L'image du 15 septembre 1993 traduit une situation de fin de saison sèche où le riz a été récolté et les champs récemment labourés, d'où l'intérêt de travailler sur des données acquises en période sèche pour la mise en évidence des surfaces rizicoles ensablées. C'est en cette période de l'année (septembre à mi-octobre) que les sols dénudés sont le plus étendus. Au cours du temps, l'évolution de dégradation des sols de savane à la suite de feux de défrichement répétitifs, va modifier l'état de surface du sol, donc sa réflectance. Cette évolution va être fonction des paramètres géologiques, topographiques et climatiques qui conditionnent l'érosion hydrique et le recouvrement végétal de la surface (RAHARIJAONA RAHARISON et RANDRIANARISON, 1997). L'influence du brûlis sur les propriétés physiques du sol et son comportement hydrologique se manifestent de façon évidente en modifiant ses caractéristiques radiométriques. Par rapport aux sols forestiers, les sols de savane sont moins perméables par durcissement superficiel dû aux feux. Du point de vue texture, ils sont moins sableux mais plus argileux, entraînant une réduction de la porosité et une mauvaise capacité d'infiltration (BRAND et RAKOTONDRANALY, 1997), créant ainsi les conditions favorables au développement de l'érosion. Superposée au SIG avec les cartes de pentes et d'occupation du sol, cette carte des sols montre la sensibilité des sols du groupe hydrologique C à l'érosion en lavaka pour des valeurs de c comprises entre 0,7 et 0,8 et à partir de 25 % de pente.

5. Conclusion

L'imagerie TM de Landsat offre les possibilités d'identifier, de localiser et de classer sans ambiguïté notable les grands ensembles d'occupation du sol et de groupe hydrologique de sols, et de les cartographier. Cette précision dans la localisation des objets a facilité les contrôles sur le terrain.

Le pouvoir de résolution de cette imagerie est suffisant pour la reconnaissance des zones d'ensablement et des zones hydrologiques homogènes, mais insuffisant pour identifier et évaluer les surfaces affectées par les lavaka en raison de la grande dispersion de la répartition des pixels appartenant à des zones qui ne sont pas parfaitement homogènes.

Les résultats obtenus sont susceptibles d'être intégrés dans les modèles de prévision de statistiques agricoles pour étudier les rendements à la parcelle. Pour la répartition des lavaka, il sera souhaitable de disposer d'autres images satellitaires de plus grande résolution spatiale, acquises à différentes dates et saisons.

6. Remerciements

Cet article a pu être réalisé grâce à l'appui matériel du FTM : M. Andrianjafimbelo RAZAFINAKANGA, Directeur Général et M. Joseph RAMBOAZANAKOLONA, Ingénieur géographe et à la collaboration de l'Institut d'Observatoire géophysique d'Ambohidempona : M. Jean Bruno RATSIMBAZAFY et Dr Solofo RAKOTONDRAOMPIANA, géophysicien.

7. Références

BOUSSEMA, M.R. et CHAIRAT BEN ABDALLAH, S. 1995. Modélisation hydrologique et de l'érosion à l'aide d'un SIG : Systèmes d'information géographique utilisant des données de télédétection. Actes du colloque scientifique international, Hammamet, 1-2 novembre 1995, Centre de recherche pour le développement international (CRDI), Hammamet, p. 63-75.

COLOMBET, L. 1977. Assainissement des agglomérations. Techniques de l'ingénieur, 11, 91 p.

BRAND, J. et RAKOTONDRANALY, N. 1997. Les caractéristiques et la fertilité des sols. Cahiers Terre-Tany, n°6 : un système agro-écologique dominé par le tavy : la région de Beforona, Falaise de Madagascar. Projet Terre-Tany/BEMA, Centre pour le développement et l'environnement, CDE/GIUB, FOFIFA/Madagascar, p. 34-48.

RAHARIJAONA RAHARISON, L. J. et RANDRIANARISON, J. 1997. Facteurs géologiques et climatiques influençant l'érosion en lavaka et ensablement des rizières : le cas du massif d'Ambohitrandriampotsy du sud du lac Alaotra. 4ᵉ Conférence internationale de l'Association pour les montagnes africaines (AMA), 26 mai–1 juin 1997, Antananarivo, 15 p.

RAUNET, M. 1984. Le milieu physique : aptitude à la mise en valeur agricole – Système et structure, région du lac Alaotra, Madagascar. Institut de recherches agronomiques tropicales (IRAT), Montpellier, 325p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 279-288

29

Cartographie des aquifères de fissures en milieu cristallin du nord-ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection

ISSIAKA SAVANÉ [1] et JEAN BIÉMI [2]

[1] *Centre de recherche en écologie (CRE), 08 B.P. 109 Abidjan 08, Côte d'Ivoire; téléphone: (225) 25 73 36; télécopieur (225) 25 73 36; courriel : savanei@hotmail.com*

[2] *Université de Cocody, Centre Université de recherche et d'application en télédétection (C.U.R.A.T.), 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire. Laboratoire Associé Francophone LAF 401; téléphone (225) 44 52 70; télécopieur (225) 44 57 39*

Résumé

Dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire, l'emploi des techniques de télédétection pour l'étude des aquifères de fissures et l'interprétation, dans un système d'information géographique (SIG), des perméabilités induites par les fractures montre que 36 % des linéaments sont orientés N60° et 32 % N130°. Les forages à gros débit sont implantés dans 29 % des cas en relation avec les fractures NE-SO, contre 22 % en relation avec les fractures N-S, les moins sollicitées en hydraulique villageoise. À l'intérieur du SIG, les principales mégafractures correspondant aux couloirs souterrains de circulation des eaux dans les fissures ont été identifiées. La superposition de la carte des perméabilités induites à celle de la densité de drainage met en évidence la relation qui existe entre les eaux de surface et les eaux souterraines au droit des mégafractures. Les cartes d'accessibilité, d'exploitabilité et d'indices de productivité des aquifères de la région, établies à partir de la combinaison de plusieurs facteurs (probabilité de succès des puits, profondeur d'extraction, niveau piézométrique et débit d'exploitation) mettent en évidence les zones favorables à l'implication des forages d'eau dans le socle grâce à l'introduction de la prospection

géophysique. Des campagnes géophysiques, visant certaines mégafractures décelées par la télédétection, ont permis d'implanter quelques forages dont les débits varient de 3 à 10 m^3/h; c'est le cas des localités comme Neniesso (12 m^3/h), Tougousso (6 m^3/h) et Kabala (3 m^3/h)

1. Introduction

Située au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, la région d'Odienné couvre 13 340 km^2, entre les longitudes 7° et 8°15 O et les latitudes 9° et 10°25 N (figure 1). Dans ce secteur, notre recherche vise à étudier l'hydraulicité des fractures affectant le socle cristallin ainsi que les indices de productivité des formations géologiques en vue de déterminer le potentiel en eau, les conditions d'accessibilité et d'exploitabilité des aquifères, tout en précisant la relation entre eaux de surface et eaux souterraines et en décrivant la géométrie des réservoirs.

La découverte de bonnes quantités d'eau exploitables dans le socle cristallin nécessite de plus en plus l'utilisation de technologies modernes variées et performantes, surtout dans les zones semi-arides et arides d'Afrique où les problèmes d'eau se présentent avec acuité. En effet, si l'eau souterraine doit de plus en plus occuper une place importante dans les activités quotidiennes de ces zones (domestiques, industrielles et agricoles), des informations exactes sont indispensables sur les facteurs qui influencent la productivité des puits, l'accessibilité et l'exploitabilité des aquifères dans ces régions.

En milieu cristallin, la cartographie et l'analyse des fractures ainsi que du profil d'altération qui leur est associé permettent de guider l'implantation au sol des forages capables de fournir un gros débit suffisant. L'importance du couple fracturation-altération est incontestable dans les roches cristallines parce que l'eau souterraine est limitée aux structures secondaires où les vides ont été produits par l'action conjuguée de la tectonique et de l'altération. Les parties massives de la roche ne peuvent contenir d'eau que si les ouvertures secondaires sont présentes parce que la porosité matricielle et la perméabilité primaire induite de la plupart des roches cristallines sont extrêmement faibles.

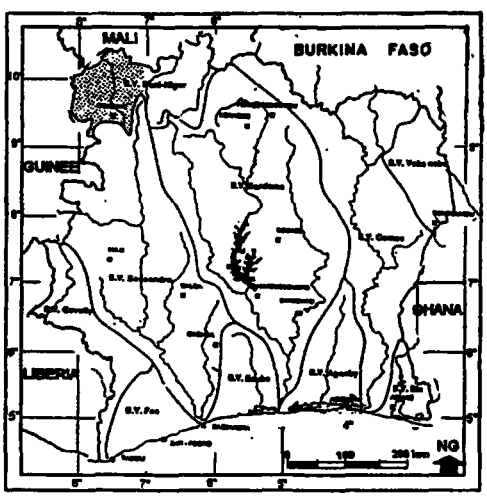


Figure 1. Localisation de la région étudiée (Odienné)

2. Méthodologie

Les études géomorphologiques et celles d'une grande partie des linéaments régionaux ont été faites au départ à l'aide de plus de 200 photographies aériennes noir et blanc, à l'échelle du 1 : 50 000, obtenues en 1979 par la mission NC-29 XI-XII, de l'Institut géographique de Côte d'Ivoire (IGCI). La densité de drainage a été calculée à partir d'images TM de Landsat à l'échelle du 1 : 100 000. Un maillage de dimension 1 km x 1 km de côté a été adopté pour chaque carré au centre duquel est portée la longueur totale des cours d'eau mesurés à l'intérieur du carré (SAVANÉ *et al.*, 1997). La carte d'isovaleurs qui en découle donne des indications sur la densité de drainage dans le bassin.

Le secteur est couvert par trois images TM de Landsat prises le 6 janvier 1986 : 198-53 (quadrants 1 et 3), 198-54 (quadrants 1 et 2) et 199-53 (quadrants 2 et 4). Le traitement d'image a porté sur la recherche des combinaisons d'images rehaussées favorisant la discrimination des ensembles lithologiques et l'identification des linéaments. L'étude a été menée à partir des filtres directionnels de Sobel utilisant une matrice 3 x 3 ou 7 x 7 (figure 2). Les linéaments sont relevés sur une image au 1 : 200 000 au moyen du logiciel ArcInfo.

Pour établir les cartes d'accessibilité, d'indices de productivité et d'exploitabilité des aquifères de la région, nous avons fait appel à plusieurs groupes de facteurs : probabilité de succès dans les formations géologiques, profondeur d'extraction, niveau piézométrique, débit, etc. (tableau 1).

3. Résultats et interprétation

3.1. Discontinuités images

Dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire, la carte détaillée des linéaments à l'échelle du 1 : 200 000, basée sur l'interprétation des images TM, comporte 2 740 segments assimilables à des discontinuités-images réparties dans les quatre directions tectoniques d'Afrique (E-O, NE-SO, N-S et NO-SE) dont 36 % sont orientés N60°E et 32 % N130°E (figure 3).

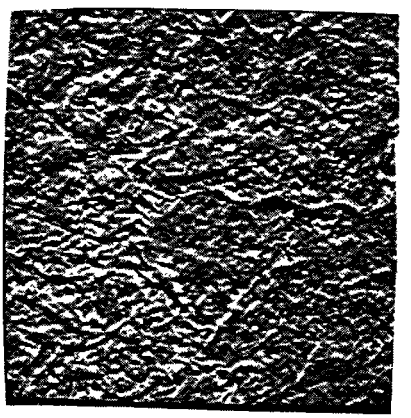


Figure 2. Filtrage directionnel de Sobel matrice 3 x 3 permettant de rehausser les discontinuités images dans la diorection NE.

Tableau 1. Facteurs utilisés dans la conception du système d'information géographique

Critère	Prob. succès (%)	Prof. Extract (m)	Niveau piézo (m)	Débit m3/h
Excellent	> 80	< 15 m	< 10 m	> 6
Bon	50-80	15-40 m	10-25 m	2 - 6
Médiocre	30-50	40-60 m	25-40 m	1 - 2
Mauvais	< 30	> 60 m	> 40 m	< 1

À échelle réduite (1 : 500 000), la carte détaillée des linéaments fait ressortir plus de 1 160 mégafractures d'intérêt régional (SAVANÉ et BIÉMI, 1999).

3.2. Relation entre fractures, positionnement et productivité des forages

Si l'on tient compte des critères d'implantation des forages dans le socle qui sont les suivantes (BIÉMI, 1992) :
- être au croisement de fractures les plus longues, les plus nettes et si possible les plus nombreuses,
- être en un point topographiquement bas,
- être en aval d'un bassin versant le plus large possible,
- être à proximité d'un marigot permanent.

On doit admettre que chaque forage réalisé dans le socle se trouve plus ou moins près d'un accident appartenant à une direction tectonique déterminée. Par conséquent, l'étude des relations entre forages et fractures peut s'avérer intéressante pour expliquer le rôle hydraulique de certaines directions d'accidents.

La carte de linéaments réalisée à partir des images satellitaires a été introduite dans le logiciel ArcInfo. Nous avons classé les fractures en fonction des directions N-S, NE-SO, E-O et NO-SE, puis nous avons superposé la base des données sur les ouvrages à la carte de linéaments, après avoir produit une carte thématique représentant la distance de tout point de la zone d'étude par rapport au linéament le plus rapproché. Enfin on a déterminé la distance séparant chacun des 134 ouvrages de la fracture la plus proche dans chacune des quatre directions précitées.

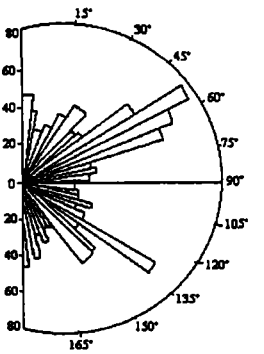


Figure 3. Diagramme de répartition de l'orientation des fractures dans le nord ou nord-ouest de la Côte d'Ivoire .

3.2.1. Influence des accidents sur le positionnement des forages dans le socle

La répartition des débits suivant les quatre directions est consignée sur le tableau 2. L'influence des accidents N-S et NE-SO n'est remarquable que sur des débits moyens. En effet dans ce cas, 55 % des ouvrages à débits moyens sont liés à ces directions de fracture.

3.2.2. Relation entre les pourcentages de forages et l'éloignement par rapport aux fractures

Nous avons superposé la carte des linéaments conçue à partir des images TM à celle des ouvrages réalisés sur le terrain lors des campagnes d'hydraulique villageoise dans le système ArcInfo et nous avons étudié la distribution des ouvrages à l'intérieur des classes d'éloignement de 200 en 200 m par rapport aux fractures.

La figure 4 permet de distinguer trois domaines :

- une droite des implantations idéales localisées sur l'axe des ordonnées, évaluée à 9,5% et représentant le nombre de puits implantés directement sur les fractures;
- une courbe de croissance entre 0 et 1 000 m, avec un pic à 400 m; cette croissance correspond à 69,2 % du nombre de forages; ce sont des ouvrages à la fois les plus proches des accidents et les plus sollicités par les campagnes de forage;
- une courbe de décroissance faible entre 1 200 m et 3 000 m représentant 30,8 % du nombre de forages; ce sont les ouvrages les plus éloignés des fractures.

En général, les ouvrages issus des campagnes d'hydraulique villageoise, réalisés dans les années 1976, ont été implantés de façon aléatoire :

- 9,5 % des ouvrages captent directement un bon nombre des fractures correspondant à ceux qui offrent des débits forts, supérieurs ou égaux à 6 m^3/h; parmi eux, on peut citer Doumbala (20 m^3/h), Kadiola (17,6 m^3/h), Gueuisso (12 m^3/h), Nienesso (10 m^3/h), etc.;
- 59,7 % des ouvrages sont plus ou moins proches d'une fracture, offrent des débits intermédiaires compris entre 2 et 4 m^3/h; ce sont des ouvrages tels que Sélé et N'goloblasso (2,9 m^3/h), Bougousso (3,3 m^3/h), Nabagala (4,5 m^3/h), etc.;
- 30,8 % des ouvrages offrent des débits inférieurs ou égaux à 2 m^3/h.

Tableau 2. Pourcentages de forts et moyens débits pour les forages les plus proches des quatre directions de fractures

Pourcentage des débits supérieurs à 6 m^3/h	
N - S	2,73 %
NE - SO	29,80 %
NO - SE	32,36 %
E - O	35,12 %

Pourcentage des débits compris entre 3 et 6 m^3/h	
N - S	23,83 %
NE - SO	31,74 %
NO - SE	26,93 %
E - O	17,50 %

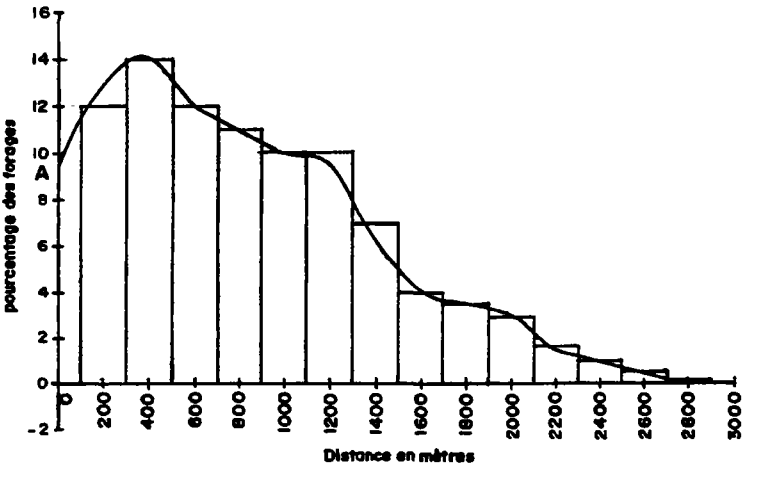


Figure 4. Histogramme montrant la relation entre le pourcentage et la distance d'éloignement par rapport aux fractures. A: implantations idéales (9,5%)

Dans la recherche hydrogéologique en milieu de socle, l'idéal serait de rencontrer une fracture ouverte susceptible d'offrir un débit maximum. Si un ouvrage est placé sur des fractures profondes ou, mieux, sur l'intersection de deux ou plusieurs fractures, il est possible d'obtenir un grand débit d'eau souterraine. La cartographie des fractures est donc recommandée dans les zones de socle parce que l'eau souterraine se trouve dans les structures secondaires où les vides sont développés par l'action tectonique et l'altération.

Le nombre de fractures et le nombre d'intersections de fractures sont donc des mesures de la perméabilité secondaire moyenne de l'aquifère de roche cristalline et, par conséquent, de l'importance d'écoulement d'eau souterraine autour du puits (BROOK, 1988). Ainsi, l'on constate qu'un forage réalisé dans ces zones, sur la base des photographies aériennes ou de la géophysique, doit être au plus distant de 1 km d'un accident pour être productif. Par conséquent, chaque forage doit se situer à proximité d'au moins une fracture dont il est censé capter les eaux souterraines.

3.3. Cartes d'accessibilité et d'exploitabilité

Sur la carte d'accessibilité, le centre de la zone d'étude offre de meilleures conditions d'accessibilité des nappes (figure 29-5) (voir cahier couleur). C'est le domaine qui se caractérise par plus de 80 % de succès sur forage, une profondeur d'extraction de l'eau inférieure à 15 m et un niveau piézométrique proche du sol de moins de 10 m. Cette zone occupe une position méridionale sur la carte avec une bifurcation vers le nord-ouest. Les zones à conditions d'accessibilité médiocres se rencontrent sur la bordure orientale (depuis Tienko au nord jusqu'à Tiémé au sud), la bordure sud-ouest aux environs de Ouéléban et au nord-ouest de la région à Maninian.

La carte d'exploitabilité des nappes s'apparente assez bien à la précédente (figure 29-6) (voir cahier couleur). En effet, les nappes les plus accessibles sont, de ce fait, les plus exploitables hydrauliquement. Les zones de bonne exploitabilité se superposent presque entièrement à leurs homologues de bonne accessibilité.

Les cartes thématiques ainsi établies ont ét utilisées pour l'implantation des puits d'une nouvelle campagne d'hydraulique villageoise. Les implantations des puits ont été orientées en fonction des critères d'exploitabilité et d'accessibilité favorables sur les différentes cartes. Des activités de sondages électriques ont menées sur ces zones afin de tester la fiabilité des cartes thématiques.

3.4. Sondage électrique

Une campagne d'hydraulique villageoise a été menée en 1995 par la coopération japonaise. Nous avons participé à cette campagne en proposant nos cartes d'accessibilité et d'exploitabilité qui sont les résultats du système d'information hydrogéologique à référence spatiale réalisé dans cette région. Ces cartes ont été exploitées conjointement avec une étude de sondages électriques. L'objectif de cette approche était de cerner les fractures sur la carte à partir de la géophysique et, d'implanter les forages sur ces fractures s'ils étaient situés dans une zone favorable en fonction de la carte d'accessibilté ou de la carte d'exploitabilité.

La représentation des résultats enregistrés sur le résistivimètre permet d'obtenir une courbe de sondage électrique qu'on trace habituellement sur du papier bilogarithmique ou qu'on obtient automatiquement par le biais d'un logiciel. En abscisse, on représente le demi écartement de AB, c'est-à-dire AB/2, en fonction du déplacement des électrodes. En ordonnée, on représente la résistivité apparente ra calculée à partir du courant et de la différence de potentiel (d.d.p) relevés sur le terrain. Plusieurs sondages ont été menés. Les résultats de l'interprétation des courbes de sondages électriques sont, pour la plupart, des courbes en fond de bateau, caractéristiques des sondages trois terrains (figure 7). On distingue ici cinq couches en fonction de la valeur de la résistivité apparente ra des formations géologiques traversées :

- la première couche est constituée deterre latéritique mélangée de graviers humides; l'épaisseur est évaluée à 1,30 m;
- la deuxième couche est constituée d'argile et de graviers, avec une épaisseur de 0,70 m;
- la troisième couche est formée de sables et de graviers secs; l'épaisseur est de 2,9 m;
- la quatrième couche est constituée d'argile sableuse de 8,10 m d'épaisseur;
- la cinquième couche enfin est constituée d'arènes granitiques, faisant 4 m d'épaisseur.

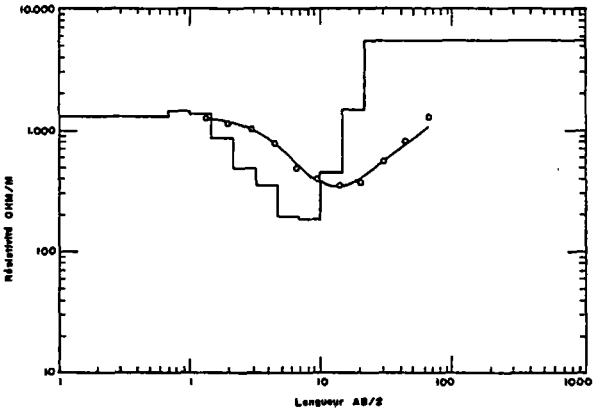


Figure 7. Courbe d'interpretation des sondages électriques dans une localité d'Odienné

Il faut noter qu'une anomalie conductrice peut produire un forage négatif en ce sens que la fracture peut contenir de la boue ou, dans d'autres cas, l'eau qui a circulé dans cette fracture a migré vers une autre zone.

Les forages réalisés sur les anomalies conductrices des fractures dans les zones favorables ont donné les résultats suivants (tableau 3) : ces resultats representent 88 % des ouvrages réalisés dans le cadre de ce projet. Environ 12 % des ouvrages ont connu des débits inférieurs à 2 m^3/h. C'est un résultat assez intéressant que nous allons continuer à vérifier sur le terrain.

Tableau 3. Quelques résultats de forages réalisés sur les anomalies conductrices des fractures

Localités	Profondeur du socle (m)	Arrivée d'eau (m)	Débit (m^3/h)	Géologie
Mamougoula	18,24	30	10	granite à biotite
Zebenin	33,60	41,1	24	granite rose
Kodougou	27,50	46,8	2,25	gneiss
Tiemba	22,50	35	3,9	arène grenue
Karabiri	31,25	45	3,2	granite
Farakoro	7,40	36	15	granite
Tiesserila	24,22	27	6	gneiss
Nanguina	38,70	35	10,8	granite
Kongohila II	32,85	53	2,54	granite
Kongohila	25,10	35	7,2	granite à amphibole
Kimbirila-nord	48,50	50	5,4	granite
Sandjougouna	26,85	30	13,5	gneiss
N'doniegue	14,85	20	3,7	granite
Foula	30,55	32	3,4	gneiss altéré
Bohisso	27,60	37	16,2	granite
Niarala	27,10	25	2,27	granite rose
Banakoro	30,35	35	3,6	geiss
Bougoudala	30,46	40	2	gneiss
Tchigbela	47,61	55,1	4,99	gneiss
Sokorodougou	54,88	60	20	granite rose
Korondougou	24,26	30,7	6,75	gneiss
korondougou	22,31	30	5,4	gneiss
Kessedougou	20,95	30	2	gneiss gris
Kanlo	30,69	35	3	granite rose altéré
Gouya	34?30	45	3,6	granite altéré
Koba	45,24	48	4,3	granite à biotite
Gouando	27,90	30	10	granite
Missila	11	40	10,8	granite
Madiana-sokurani	17,30	40	2,16	arène grénue
Tahara	3,82	23,2	8	granite rose

4. Conclusion

Au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, l'étude d'hydraulicité des fractures par la télédétection et le SIG met en évidence que 36 % des linéaments qui affectent le socle cristallin sont orientés N60°E contre 32 % dans la direction N130°E. Les forages à gros débit sont implantés, dans 29 % des cas, par rapport aux fractures NE-SO, contre 22 % pour les fractures N-S, moins sollicitées en hydraulique villageoise.

Les principales mégafractures de la région constituent en même temps les couloirs souterrains de circulation d'eau dans les nappes de fissures. La superposition de la carte des perméabilités induites à celle de densité de drainage laisse entrevoir une possibilité d'échange vertical entre eaux de surface et eaux souterraines au droit des mégafractures. Les cartes d'accessibilité des aquifères de la région, établies à partir de la combinaison de critères adéquats mettent en évidence les zones favorables à l'implantation des forages d'eau dans le socle.

Des travaux de vérification sur le terrain à partir des études de géophysiques menées sur les zones favorables des cartes d'accessibilité et d'exploitabilité ont permis d'avoir un résultat de 88 % de succès de forage lors d'une campagne d'hydraulique villageoise. Ce résultat montre la fiabilité des cartes thématiques élaborées à partir du système d'information hydrogéologique à référence spatiale.

Cette expérience bien que prometteuse doit être poursuivie dans plusieurs directions de recherche telles que l'impact de la nature de la formation géologique et de la variabilité climatique dans la productivité des puits. Il serait intéressant d'envisager des activités de recherche associant les techniques de télédétection, de GPS et les résultats du SIG afin d'évaluer les pécisions de la méthode d'implantation des puits à partir des critères d'accessibilité et d'exploitabilité ainsi que les orientations des fractures. Cette démarche permettra de corriger les marges d'erreur qui peuvent survenir pendant les collectes et les saisies des données.

5. Remerciements

Nous tenons à remercier l'UREF (Université des réseaux d'expression française) pour nous avoir permis de réaliser ce travail grâce à une subvention de recherche partagée.

6. Références

BIÉMI, J. 1992. Contribution géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'état, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 432 p.

BROOK, G. 1988. Hydrological factors influencing well productivity in the cristalline rock regions of southeastern Georgia. Geology, vol. 29, p. 65-89.

SAVANÉ, I., GOZE, B.B. et GWYN, Q.H.J., 1997. Évaluation de la productivité des ouvrages dans le socle par l'étude des fractures et le SIG dans la région nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Hard Rock Hydrosystems (Proceedings of Rabat Symposium S2, May 1997). IAHS Publ. n° 241, p. 103-111.

SAVANÉ, I. et BIÉMI, J., 1999. Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol. 1, n° 1, p. 47-64.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 289-296

30

Utilisation d'une image HRV(P) de SPOT pour l'étude de courants côtiers et de mouvements tourbillonnaires près des côtes du Liban

JANINE SOMMA et NADA BADARO-SALIBA

Département de géographie, Faculté des lettres et des sciences humaines, Université Saint-Joseph, B.P. 175-208, Beyrouth, Liban; téléphone: 961-1-200625; télécopie: 961-1-200631; courriel : jsomma@syfed.lb.refer.org; nsaliba@syfed.lb.refer.org

Résumé

De grands courants côtiers et des mouvements tourbillonnaires apparaissent très clairement sur une image HRV(P) de SPOT du 14 juin 1994 de la zone côtière du Liban. Dans un pays où les déchets ménagers sont entassés dans des décharges côtières et où les égouts sont évacués à même le rivage sans procédure d'assainissement, leur étude permettrait de savoir quels sont les sites les plus vulnérables à la dérive littorale des déchets et des eaux usées. L'image est d'un niveau 1A pour éviter au maximum tout lissage qui pourrait nuire à la distinction des moindres effets. Sa segmentation par seuils de comptes numériques permet de distinguer l'imbrication de deux grandes masses d'eau à mouvements inverses : nord-sud et sud-nord. Des transformées de Fourrier appliquées dans différents secteurs des courants apparents indiquent que la dérive littorale est liée aux vents du jour et de la veille. Les vents dominants étant généralement sud-ouest nord-est les déchets sont entrainés vers le nord.

1. Introduction

Au Liban, l'utilisation de la mer comme site de décharge et de déversement d'égouts ou de rejets d'usines ne date pas d'hier (SANLAVILLE, 1977). Elle s'est accrue au fil des années de guerre et, bien que celle-ci soit terminée depuis près d'une dizaine d'années, les aménagements adéquats d'assainissement des eaux usées ou d'incinération des déchets n'ont pas suivi. La dérive littorale, généralement sud-nord (KAREH, 1981; SANLAVILLE,

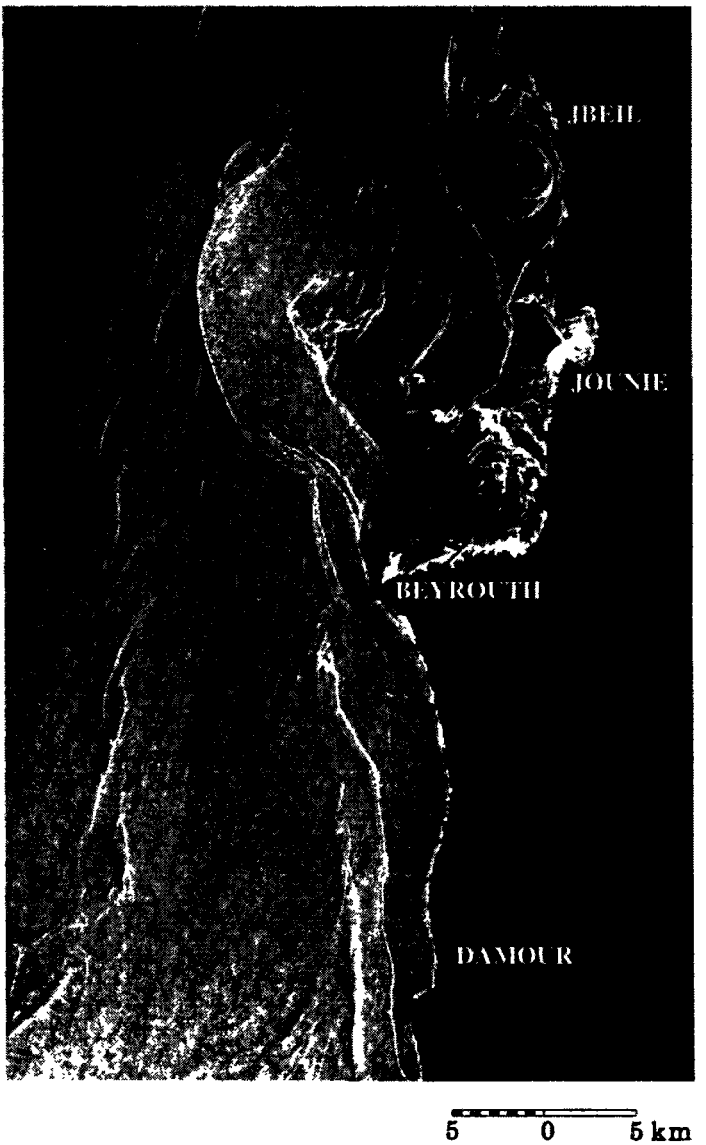
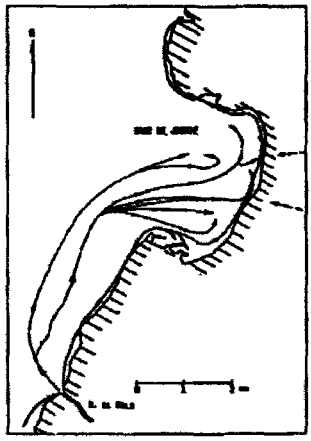


Figure 1. HRV(P) du 14 juin 1994 ; courants marins visibles; et zone (1,2,3,4) où ont été calculées les transformées de Fourier.



(Kareh 1984)

Figure 2. Courants marins.

1977), entraîne les déchets et la pollution jusqu'aux côtes turques, 600 km plus au nord. Point n'est besoin d'outils scientifiques pour s'en rendre compte : il suffit de se promener sur les plages. Cependant, certaines zones semblent plus atteintes au point que le promeneur n'ose marcher pieds nus sur le sable tant les rejets (seringues, couches, plastiques, etc.) sont abondants. Dans quelle mesure la forme de la côte, les vents et la houle interagissent-ils pour favoriser la vulnérabilité de zones plus que d'autres ? Déjà une petite recherche sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour des études environnementales (SOMMA, 1998) avait alerté sur des directions de courant importantes vers la baie de Jounié et le large (figure 1). Des études réalisées par KAREH (1984, 1985) concordaient avec l'une des directions (figure 2). Enfin, une image HRV(P) de SPOT du 14 juin 1994 mettait si bien en valeur des courants et des mouvements tourbillonnaires qu'une observation de ceux-ci s'imposait pour vérifier les premières ou leur apporter de nouveaux éléments (figure 1).

2. Zone d'étude

La zone côtière visible sur l'image HRV de juin 1994 s'étend de la région de Damour au sud jusqu'à la région de Jbeil au nord (figure 1). L'étendue marine qu'elle couvre varie selon la forme de la côte entre 20 et 30 km. Nous ne disposons malheureusement pas pour ce pays de cartes bathymétriques suffisamment détaillées pour permettre une compréhension certaine de l'influence des fonds sur le mouvement de la houle.

3. Objectifs

Dans cette étude nous tentons de répondre à un certain nombre de questions soulevées par l'observation de l'image : les différences apparentes de radiances expriment-elles des courants inverses ? Si oui, ces mouvements opposés génèrent-ils le tourbillon visible au

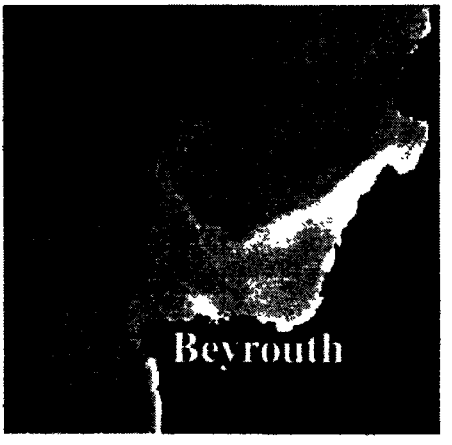
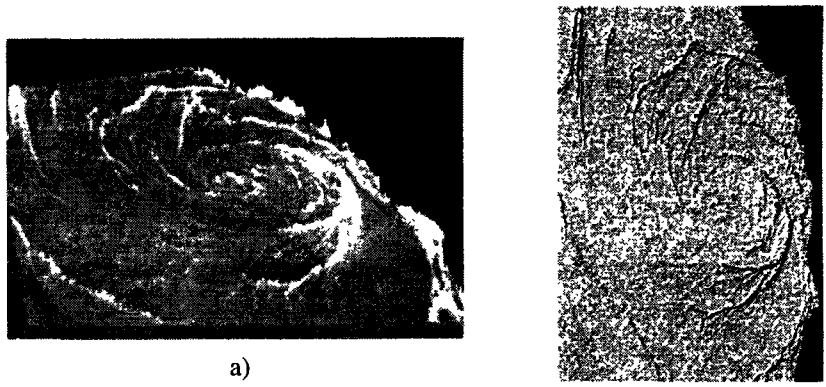


Figure 3. Courants marins sur l'image HRV(P+XS) de 1996.

large de la baie de Jbeil ? Le sens de la dérive littorale est-il tributaire des vents locaux ? Peut-on calculer l'incidence de la houle sur le rivage ? Les résultats permettront-ils de déduire des sites plus vulnérables à la dérive des déchets ? Les observations satellitaires concordent-elles avec certains résultats obtenus sur le terrain par les chercheurs précédents et suggèrent-elles des voies nouvelles d'investigation ?

4. Matériel et méthode

Si une combinaison linéaire de HRV(P + XS) de SPOT d'avril 1996 (figure 3) avait permis de mettre en évidence un courant important issu ou en direction de la baie de Jounié (SOMMA, 1998), l'essentiel des observations satellitaires de la présente étude a été effectué sur une image HRV(P) du 14 juin 1994 de la partie centrale de la zone côtière du Liban (figure 1). L'image est d'un niveau 1A pour éviter au maximum tout lissage qui pourrait nuire à la distinction des moindres effets. Les traitements ont été réalisés dans l'environnement logiciel PCI. Un des procédés utilisés pour mieux visualiser les zones d'énergie maximale et les divers mouvements de la mer a été de traiter l'image brute comme une image d'altitude et d'en dériver des images de pente et d'orientation pour, ensuite, produire des vues en perspective ou des images d'éclairement artificiel (figure 4 : a et b). Des transformées de Fourier ont été appliquées dans des secteurs-clés des zones marines homogènes de l'image (figure 1) pour déterminer les directions des houles et des trains de vagues (MOIK, 1980; ROBIN, 1998). Afin d'évaluer les longueurs d'onde de ces divers mouvements, nous avons conservé les composantes dominantes du spectre de Fourier. Sur chacune de celles-ci, la transformée inverse a été effectuée. Il en résulte une image d'ondulations sur laquelle une moyenne de distance entre chaque crête a pu être calculée. Cette distance correspond à la longueur d'onde moyenne. Nous disposions également d'une image TM de Landsat d'avril 1984. La HRV(P) de 1994 a été accordée géométriquement au canal 6 (IRT) de cette dernière. Pour ce qui est des données relatives au vent, il ressort, que le 14 juin, le vent avait une vitesse moyenne de 3,9 m/s et une direction de 237°. La veille, la vitesse moyenne était de 4,4 m/s et la direction de 214,7° (observatoire de l'Université américaine de Beyrouth).



a) b)

Figure 4. Tourbillon de la baie de Jbeil (HRV(P), juin 1994; a) vue en perspective; b) éclairement artificiel.

5. Résultats

Une première observation de la houle a été faite sur une zone (1 sur figure 1) à 13 km au large, distance où la bathymétrie n'engendre pas encore la réfraction des trains de vagues. La transformée de Fourier, effectuée sur un extrait de 512 x 512 pixels, montre l'existence de 4 pics correspondant chacun à une composante de houle (figure 5). Les deux premières composantes (figure 5 : b, c) sont les plus énergétiques et viennent probablement de loin car elles ne coincident pas avec la direction des vents tandis que les deux dernières (figure 5 : d, e), plus faibles, sont, elles, probablement générées par les vents locaux. En effet, elles ont des directions correspondant aux vents du jour et de la veille (tableau 1). Un autre extrait de la houle plus proche du rivage (2 sur figure 1) montre que les orthogonales de houle se réfractent et ont tendance à se positionner perpendiculairement aux isobathes telles que cartographiées sur la carte topographique au 1 : 50 000. Les résultats des calculs effectués sont exprimés dans le tableau 2. Les zones 3 et 4 de la figure 3 se situent dans des plages de radiances différentes. Leurs transformées de Fourier (figure 6 : a et b) indiquent respectivement une direction générale de courant de 314° et 214°.

6. Discussion

L'angle d'incidence de la houle pour la zone 2 engendre une dérive littorale sud-nord. En effet, on constate que trois de ses composantes (2, 3, 4) se situent dans le quadrant sud-ouest et que leur angle d'incidence avec la plage génère un courant de dérive vers le nord plus important que le courant de dérive vers le sud qu'engendrerait la première composante. Le courant (4) pourrait être causé par cette dérive sud-nord tandis que le courant (3) semble s'imbriquer dans ce dernier. En effet, la transformée de Fourier de la zone (3) montre que la composante du vent de la veille a disparu. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que cette zone est protégée du vent par le cap de Beyrouth. L'absence de l'influence du vent de la veille pourrait expliquer l'inversion du courant (3) par rapport au courant (4). SANLAVILLE

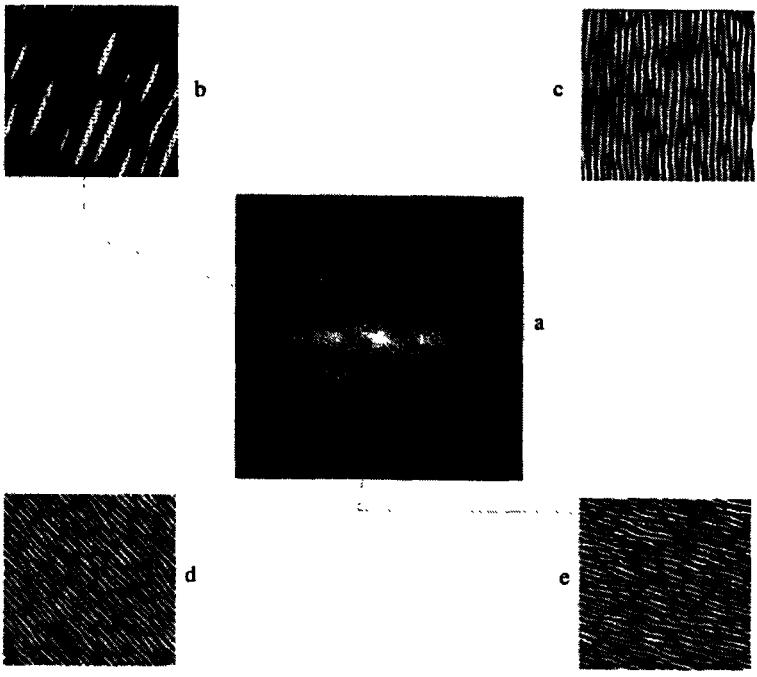


Figure 5. Transformée de Fourier de la zone 1; composantes 1 (b), 2 (c), 3 (d) 4 (e).

Tableau 1. Composantes de la transformée de Fourier de la zone 1

Composante	Longueur d'onde (m)	Direction	Angle avec la plage
1	140	314°	45°
2	60	284°	15°
3	36	237°	32°
4	40	214°	55°

Tableau 2. Composantes de la transformée de Fourier de la zone 2

Composante	Longueur d'onde (m)	Direction	Angle avec la plage
1	100	306°	37°
2	60	264°	5°
3	36	244°	15°
4	40	219°	50°

(1977) notait la présence de courants de sens opposés au niveau de Chekka (hors image) à quelques kilomètres au nord de Jbeil. De plus, le canal infrarouge thermique de la TM de 1984 montre, dans l'eau, deux grandes zones de températures différentes dont la limite ressemble étrangement à celles des deux masses d'eau de sens opposés citées ci-dessus (figure 7 : a et b) bien que décalée par rapport à celles-ci. Le tourbillon visible sur les côtes de Jbeil est vraisemblablement entraîné par l'opposition entre le courant (3) et la dérive

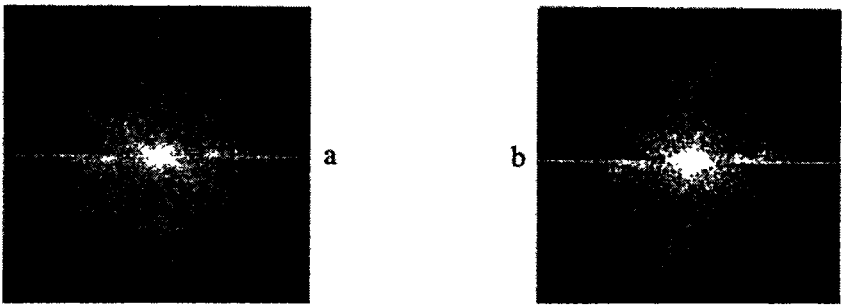


Figure 6. Transformées de Fourier des zones 3 (a) et 4 (b).

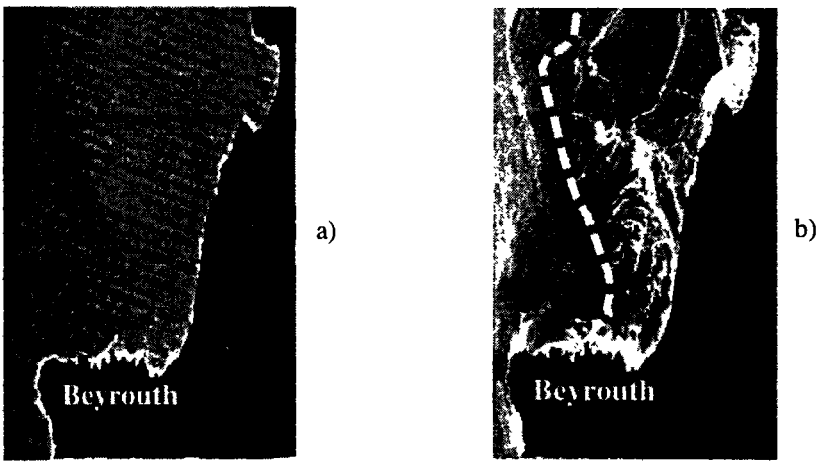


Figure 7. a) TM (avril 1994), canal 6 : zone de T° différentes; b) report de la limite de T° sur un extrait de la HRV(P) de juin 1994

littorale de la région de Jounié cartographiée par KAREH (1984). Les images mises en perspective simulent un relief de la surface marine et les images éclairées artificiellement permettent de mieux visualiser les zones d'énergie maximum.

7. Conclusion

La télédétection reste un outil valable d'investigation : elle a permis, en effet, de confirmer l'existence de deux grands courants opposés et d'observer que la dérive littorale est en relation avec les vents du jour et de la veille. Les déchets et la pollution de toute sorte dérivent donc vers le nord de Beyrouth en raison des vents dominants qui sont généralement sud-ouest nord-est. Ces déchets sont soit entraînés vers le large si pris par le courant 4, soit évoluent le long de la côte si mobilisés par la dérive littorale. Jounié reste à l'instar des recherches de KAREH (1984 et 1985) une des zones les plus affectées. Le mouvement tourbillonnaire face à Jbeil mériterait des observations plus poussées tant pour connaître son action érosive sur le littoral que pour savoir si les déchets sont maintenus dans cette zone par le vortex.

8. Références

KAREH, G. 1981. Le Nil et les sédiments côtiers du Liban. Annales de géographie de l'Université Saint-Joseph, Beyrouth, vol. 2, p. 69-96.

KAREH, G. 1984. Caractéristiques sédimentologiques de la côte libanaise et de son plateau continental. Annales de géographie de l'Université Saint-Joseph, Beyrouth, vol. 5, p. 82-182.

KAREH, G. 1985. Caractéristiques sédimentologiques de la côte libanaise et de son plateau continental entre les baies de Jounié et de St-Georges (2ème partie). Annales de géographie de l'Université Saint-Joseph, Beyrouth, vol. 6, p. 79-221.

MOIK, J.G. 1980. Digital processing of remotely sensed images. National Aeronautics and Space Administration, Washington, 330 p.

ROBIN, M. 1998. Détermination de l'énergie des houles et de leur capacité à générer une dérive littorale à l'aide d'une image Spot par transformée de Fourier. Exemple de Grand Lahou, République de Côte d'Ivoire. Cahiers Nantais, n° 49, p. 127-137.

SANLAVILLE, P. 1977. Étude géomorphologique de la région littorale du Liban. Publications de l'Université Libanaise, Beyrouth, 2 tomes, 859 p.

SOMMA, J. 1998. Utilisation de la télédétection satellitaire pour l'observation de la dégradation de l'environnement. Communication au Colloque sur le droit de l'environnement, École supérieure des ingénieurs de Beyrouth, février 1998.

PARTIE IV

Paramètres de surface et signatures spectrales

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 299-317

31

Observation spatiale des paramètres de surface

JEAN-PHILIPPE GASTELLU-ETCHEGORRY[1], FRÉDÉRIC ADRAGNA [2], YANN KERR[1], JEAN-PIERRE LAGOUARDE[3], M. LEROY[1] et THUY LE TOAN [1]

[1] *CESBIO (UPS-CNES-CNRS), 18, Av. Edouard Belin, 31401 Toulouse cdx 4 (France); Tel: (33) 5-61-55-61-30; télécopieur : (33) 5-61-55-85-00; courriel : gastellu@cesbio.cnes.fr*

[2] *CNES, 18 Av. Edouard Belin, 31401 Toulouse cdx 4 France*

[3] *INRA - Bioclimatologie, Domaine de la Grande Ferrade, BP 81, 33883 Villenave d'Ornon*

Résumé

La modélisation du fonctionnement de la végétation et des processus de surface (flux de masse et d'énergie) s'appuie sur l'emploi de paramètres (température, LAI, humidité, etc.) caractéristiques des surfaces terrestres. Dans cet article, on présente les principaux paramètres de surface qui peuvent être estimés par télédétection visible, infrarouge et hyperfréquences. Leur estimation repose en général sur des relations semi-empiriques étalonnées avec des mesures sur le terrain. Le manque de robustesse de ces relations, du fait des nombreuses variables biophysiques et de la complexité des interactions électromagnétiques à l'origine des mesures satellitaires, explique les travaux actuels pour les remplacer par l'inversion de modèles de télédétection précis et robustes.

1. Introduction

Ayant été initialement perçue comme un développement de la photographie aérienne, la télédétection a tout d'abord été utilisée pour fournir une segmentation spatiale des milieux observés (*i.e.*, carte d'occupation du sol) et non une description quantitative de ses variables biophysiques ou biochimiques. La curiosité scientifique, les impératifs économiques et les progrès technologiques expliquent les travaux actuels pour interpréter les images satellitaires en terme de paramètres de surface, c'est-à-dire des grandeurs intégratrices de variables biophysiques. L'objectif est de ne plus percevoir ces images comme une simple extension de la vision humaine mais comme la représentation d'un champ bi-dimensionnel, ou même tridimensionnel, caractéristique de grandeurs physiques.

Les paramètres de surface considérés ici sont les quantités intégratrices utilisées pour représenter l'action des différentes composantes des couverts terrestres dans les modèles de simulation des processus de surface et de fonctionnement de la végétation. Certains de ces paramètres servent aussi dans les modèles de télédétection. Plusieurs domaines scientifiques (BRUNET *et al.*, 1997) sont donc concernés : physique du rayonnement, physique du sol, physique de l'interception de l'eau par le couvert, mécanique des fluides et physiologie des plantes.

La signification des paramètres de surface peut différer en fonction du modèle dans lequel on les utilise. Ceci est le cas du paramètre « indice foliaire » selon qu'il représente le rôle de la biomasse foliaire dans un modèle de surface ou dans un modèle de simulation de mesures satellitaires. Les principaux paramètres de surface sont des paramètres structuraux (indice foliaire, etc.), optiques (albédo, etc.), biochimiques (chlorophylle, azote, lignine, etc.) et physiologiques (rendement quantique de la photosynthèse, etc.). La variabilité spatiale et temporelle de ces paramètres souligne la nécessité de l'outil télédétection à cause de sa capacité d'observation continue et globale de la planète. D'autre part, ces paramètres doivent être estimés à une échelle cohérente à l'échelle d'analyse des modèles où il est utilisé. Ainsi, l'initialisation et le forçage de modèles de circulation générale impliquent souvent des échelles d'analyse de la centaine de kilomètres.

Dans cet article, on indique tout d'abord les principaux paramètres de surface observables par télédétection, c'est-à-dire des quantités représentatives de variables biophysiques qui affectent les mesures satellitaires. Après une synthèse sur la sensibilité de ces mesures aux variables biophysiques, quelques relations semi-empiriques utilisées pour estimer, par télédétection, les paramètres de surface sont présentées. Finalement, l'estimation des paramètres par inversion de modèles de télédétection est brièvement discutée.

2. Paramètres de surface

2.1. *Indice foliaire (LAI) et orientation foliaire (LAD)*

Étant l'interface entre la plante et l'atmosphère, la biomasse foliaire influence beaucoup les mesures spatiales et divers processus de surface comme la photosynthèse (60 %-95 % de la photosynthèse totale) et l'évapotranspiration (RUNNING and COUGHAN, 1988), la production végétale (GHLOZ, 1982) et les transferts de masse (CO_2, vapeur d'eau, pluie, etc.) et d'énergie (rayonnement, chaleur sensible et vent, etc.) entre les plantes et leur environnement (BOTKIN, 1986).

L'indice foliaire est souvent utilisé pour quantifier la densité surfacique de biomasse foliaire. Ce paramètre adimensionnel, habituellement désigné par l'acronyme anglais LAI (*Leaf Area Index*), est défini comme la demi-surface totale du feuillage (m^2) par unité de surface (m^2) de sol. D'autre part, la répartition de la biomasse foliaire en tout point r est souvent représentée par la densité volumique des surfaces foliaires $u_f(r)$. Elle est exprimée en m^2 de feuille par m^3 d'espace. Dans un couvert arboré, l'hétérogénéité spatiale de u_f peut provenir du regroupement d'arbres ou de feuilles dans les couronnes d'arbres.

Le LAI est donc un paramètre clé des modèles de surface (SELLERS *et al.*, 1996), de circulation générale (ROYER *et al.*, 1997) et de simulation des mesures de télédétection. En fait, pour des couverts arborés, les mesures satellitaires dépendent aussi de la biomasse épigée (*i.e.* troncs, branches), surtout si le LAI est faible. L'indice de bois WAI (*Wood Area Index*) est souvent utilisé pour caractériser la capacité d'interception de la biomasse épigée. Par suite, il est souvent utilisé le PAI (*Plant Area Index*), avec PAI = WAI + LAI. On a PAI ≈ WAI en l'absence de feuilles (*i.e.*, LAI = 0) et PAI ≈ WAI avec un couvert foliaire très développé (*i.e.* LAI élevé).

La distribution angulaire de l'orientation des feuilles (LAD) est une autre caractéristique structurale de la biomasse foliaire qui affecte beaucoup les mesures satellitaires, l'activité photosynthétique et les échanges d'énergie des couverts. Le LAD est dit sphérique avec une distribution foliaire isotrope (sr^{-1}), planophile avec des feuilles plutôt horizontales et érectophile avec des feuilles plutôt verticales.

2.2. *Rayonnement photosynthétiquement actif absorbé*

La photosynthèse de la végétation est activée par le rayonnement absorbé par la chlorophylle dans le domaine spectral 400 nm-700 nm. Ce rayonnement est qualifié de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). La connaissance du PAR absorbé (APAR) est essentielle pour estimer la production primaire et le cycle global du carbone. On appelle fAPAR la fraction du PAR incident qui est absorbé par le couvert. Contrairement au LAI, le fAPAR ne caractérise pas seulement le couvert mais aussi les conditions d'éclairement de celui-ci. Il varie donc tout au long de la journée avec la direction solaire et l'éclairement atmosphérique. Ceci explique que l'on considère souvent le fAPAR intégré durant la journée et non seulement le fAPAR instantané.

2.3. *Albédo A*

L'albédo d'un milieu est la fraction de rayonnement solaire réfléchie par ce milieu. Il joue un rôle essentiel au niveau du bilan d'énergie terrestre. Ainsi, la fraction (*i.e.*, 1-A) du rayonnement solaire non absorbé est transformée en des flux de masse et d'énergie qui conditionnent l'état et la dynamique de l'atmosphère. Toute modification de l'albédo terrestre peut à moyen terme fortement influencer le climat. La modélisation du climat requiert une précision relative de ±5 % sur l'albédo.

La présence de nuages ainsi que l'absorption et la diffusion atmosphérique expliquent que l'albédo de surface peut fortement différer de l'albédo planétaire du système « Terre + atmosphère ». Ces deux albédos résultent d'une intégration spectrale sur (0,3 3 µm) et d'une intégration sur toutes les directions montantes. Ainsi, l'albédo de surface est :

$$A \approx \frac{1}{\pi} \int_{0.3\mu m}^{3\mu m} \int_{2\pi} \rho_{dd}(\Omega_i,\Omega_r,\lambda).\mu_r.d\Omega_r.d\lambda = \frac{1}{\pi} \int_{0\,3\mu m}^{3\mu m} \rho_{dh}(\Omega_i,\Omega_r,\lambda).d\lambda$$

où $\rho_{dd}(\Omega_i,\Omega_r,\lambda)$ est le facteur de réflectance bidirectionnel (FRB) de la surface, pour la direction incidente (Ω_i) et la direction de visée (Ω_r).

2.4. *Fraction de végétation* σ_f

La fraction de végétation, ou couverture végétale σ_f, indique la fraction de surface occupée par la végétation. Ce paramètre adimensionnel compris entre 0 et 1 permet de représenter les contributions relatives du sol et de la végétation dans plusieurs quantités biophysiques (émissivité, température, réflectance, etc.) et processus (flux d'énergie et de masse entre la biosphère et l'atmosphère, etc.). Il est en particulier utilisé pour modéliser la couche limite atmosphérique (LACAZE, 1999).

2.5. *Concentration en éléments biochimiques*

Le fonctionnement de la végétation dépend beaucoup de sa concentration en eau, chlorophylle, azote, cellulose, protéine, etc. Ainsi, la décomposition de la litière dépend du rapport de ses concentrations en lignine et azote, et ses concentrations en chlorophylle et en azote conditionnent la productivité primaire nette des couverts végétaux.

2.6. *Température*

L'estimation depuis l'espace de ce paramètre clé est certes imprécise, mais la simple extrapolation de mesures ponctuelles à de grandes surfaces n'est pas supposée être plus précise. Une difficulté associée à l'emploi de la notion de température est que la valeur de celle-ci dépend de la définition considérée :
- température thermodynamique (*i.e.*, agitation cinétique moléculaire);
- température de brillance (apparente) T_B, définie par : « $L_B(\lambda,T_B) = L_{mes}$ »;
- température radiométrique T_{radiom} où $L_{mes} = \varepsilon_\lambda.L_B(\lambda,T_{radiom}) + (1-\varepsilon_\lambda).L_a(\lambda)$ est la luminance mesurée, ε_λ l'émissivité de surface, $L_B(\lambda,T)$ la luminance du corps noir de température T et $L_a(\lambda)$ la luminance atmosphérique;
- température radiative T_{rad}. Elle permet de représenter le bilan radiatif total de surface : $R_n = (1-\alpha).R_G + \varepsilon.R_a - \varepsilon.\sigma.T_{rad}^4$, où R_G est le rayonnement net aux courtes longueurs d'onde et R_a est le rayonnement atmosphérique;
- température aérodynamique $T_{aéro}$, pour estimer le flux de chaleur sensible « $H = \rho.c_p \frac{T_{aéro} - T_a}{r_a}$ », où r_a est la résistance aérodynamique de surface.

2.7. *Humidité du sol*

Le contenu en eau de la végétation W_c (kg/m^3), et donc la biomasse, dépendent beaucoup de l'humidité du sol m_v (m^3/m^3). Cette dernière conditionne de nombreux processus comme:

- le développement de la végétation (germination, levée des plantes, etc.);
- les flux d'évaporation des sols, en liaison avec les variables climatiques;
- la transpiration de la végétation, car l'humidité du sol module le déficit de saturation de l'air dans les couverts (CHOUDHURY and MONTEITH, 1988).

3. Télédétection des paramètres de surface

3.1. Présentation

La mesure M de télédétection est une quantité radiométrique souvent fournie en tant que luminance. Elle est assimilée à une réflectance apparente au sommet de l'atmosphère dans le domaine du rayonnement solaire réfléchi, à une température apparente dans les domaines de l'infrarouge thermique et des hyperfréquences passives, et à un coefficient de rétrodiffusion dans le domaine radar (hyperfréquences actives). Toute mesure M dépend de l'atmosphère A, des conditions d'observation O (longueur d'onde, direction de visée, etc.) et des propriétés radiométriques R de la surface observée et de son environnement. Ces propriétés dépendent de diverses variables biophysiques C ($u_f(r)$, LAD, réflectance foliaire, etc.) plus ou moins directement associées à des paramètres de surface P. On a donc : « $M = f(O,A,C)$ », où f est un modèle physique qui simule la mesure satellitaire.

L'opération $f^{-1}(O,A,C)$ qui transforme les mesures M en variables C ou paramètres P comprend deux étapes majeures regroupées ou séparées (figure 1). La première est la transformation de M en propriété radiométrique R de surface. Dans le domaine optique, elle inclue la correction atmosphérique et le filtrage des nuages. La précision de R dépend alors des conditions expérimentales et des modèles de capteur et d'atmosphère. Les quantités M et R sont parfois normalisées pour rendre comparables des observations multidirectionnelles.

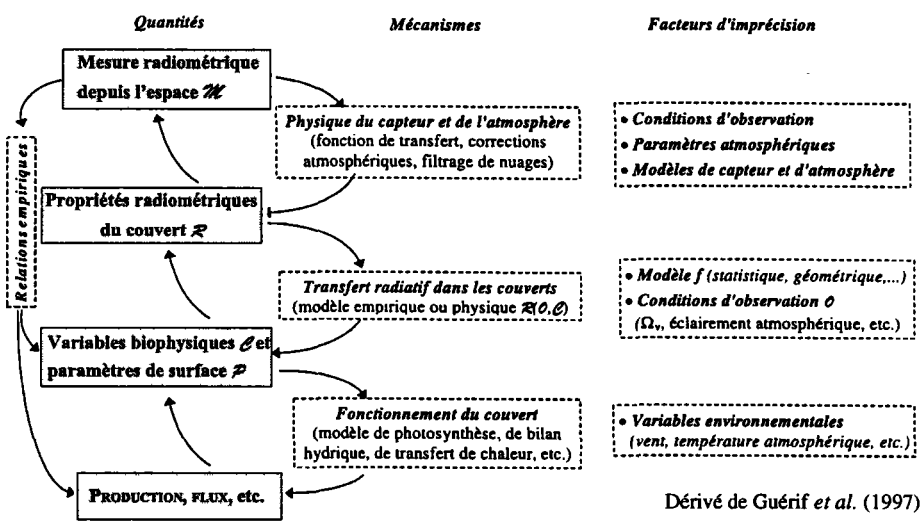


Figure 1. Lien entre mesures satellitaires M, variables biophysiques C et processus de surface, avec mention de facteurs d'imprécision.

Ceci est nécessaire si l'algorithme biophysique de l'étape (2) ne prend pas en compte la configuration d'observation. La deuxième étape est la transformation f de R en variable C ou paramètre P. Leur précision dépend de : i) précision de R, du modèle f et des conditions d'observation, ii) sensibilité des mesures M aux quantités C et P et (iii) disponibilité d'information annexe (type de couvert, etc.).

En pratique, f^{-1} est souvent une simple fonction empirique qui exprime une relation statistique entre la mesure M et l'information biophysique recherchée. L'intérêt des relations empiriques est d'autoriser une estimation rapide et régulière des paramètres de surface. Leur inconvénient est de ne pas être robustes dans le temps et l'espace. En effet, de nombreux facteurs biophysiques et expérimentaux qui affectent les mesures M sont pris en compte avec des coefficients de régression spécifiques au site.

3.2. Sensibilité des mesures de télédétection *M* aux variables biophysiques *C*

La précision de paramètres de surface P dérivés de mesures M dépend de l'influence que les variables biophysiques C associées à ces paramètres P ont sur les mesures M disponibles. En fait, cette influence dépend du capteur (domaine spectral, précision radiométrique, résolution spatiale, etc.) et des conditions d'observation (direction de visée, répétitivité, etc.) (tableau 1).

3.2.1. Mesures visible (VIS), proche infrarouge (PIR) et moyen infrarouge (MIR)

Les facteurs biophysiques qui affectent le plus les mesures VIS, PIR et MIR sont l'architecture (LAI, LAD, σ_f, etc.) et les propriétés spectrales de ses composantes (sol, feuilles, etc.). Les principales sources de bruit sont l'atmosphère et les directions de visée et solaire. L'impact de ces facteurs est illustré ici par des simulations (figures 31-2 (voir cahier couleur), 3, 4) de mesures satellitaires réalisées avec le modèle réaliste DART (GASTELLU-ETCHEGORRY *et al.*, 1996).

Tableau 1. Paramètres de surface et facteurs expérimentaux qui affectent les mesures M.

Mesures $\mathcal{M}$	Paramètres de surface $\mathcal{P}$	Facteurs expérimentaux $\mathcal{O}$
VIS, PIR et MIR (réflectance)	Structure : biomasse foliaire (LAI, LAD), taux de couverture σ_f ,etc. Optique : ρ_{sol}, ρ_f, τ_f (biochimie)	Directions de visée et solaire. Atmosphère : éclairement terrestre, transmittance, réflectance propre.
Infrarouge thermique (T_{app})	Températures T_f ,T_{sol} Structure : biomasse foliaire, σ_f, etc. Émissivités ε_f , ε_{sol} (rugosité, humidité)	Direction de visée. Atmosphère : T_{app} et transmittance.
Hyperfréquence passif (T_{app})	Rugosité de surface (sol + végétation) Émissivités ε_f , ε_{sol} (humidités m_v et W_c) Températures T_f ,T_{sol}	Direction de visée. Atmosphère : T_{app} et transmittance Polarisation.
Radar (coef. de rétrodif. σ_0)	Rugosité de surface (sol + végétation) Humidité de surface (sol + végétation) Végétation = biomasse foliaire et/ou ligneuse selon le domaine fréquentiel.	Direction de visée. Polarisation.

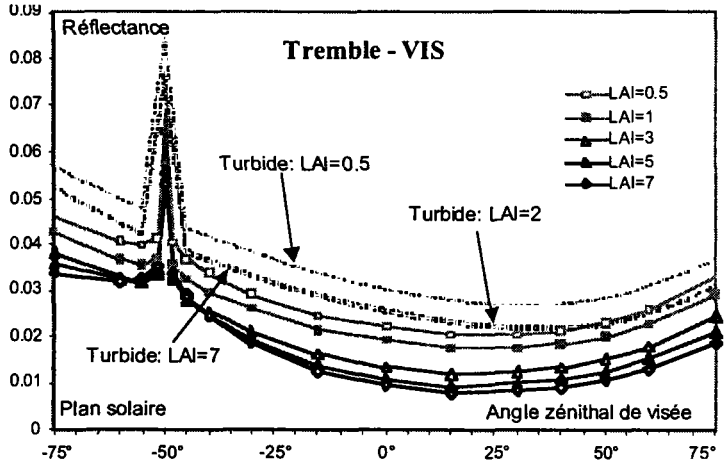


Figure 3. Influence du LAI sur les FRB VIS d'un couvert de trembles et d'un milieu turbide, simulés avec un sol lambertien (r_{sol} = 4%), r_f = 4,8%, t_f = 4,5%, q_s=50°.

La réflectance ρ_c d'un couvert végétal est souvent approchée par :

$$\rho_c(\Omega_s,\Omega_v) = \frac{\Gamma(\Omega_s,\Omega_v)}{G(\theta_s)|\mu_s| + G(\theta_v).\mu_v}.[1-\exp[-LAI.(\frac{G(\theta_s)}{|\mu_s|}+\frac{G(\theta_v)}{\mu_v})] + \rho_{sol}\ \exp[-LAI.(\frac{G(\theta_s)}{|\mu_s|}+\frac{G(\theta_v)}{\mu_v})]$$

La fonction de phase $\frac{\Gamma(\Omega_s,\Omega_v)}{\pi}$ donne la distribution angulaire de la diffusion volumique foliaire en fonction de la direction incidente (Ω_s), des propriétés optiques foliaires et du LAD. Le terme $G(\theta)$ est la fraction foliaire de surface efficace d'interception selon la direction Ω. De plus : $\mu = \cos\theta$.

Quoique très approximative, car elle néglige l'architecture (σ_f,...) des couverts et les ombres associées, cette expression $\rho_c(\Omega_s,\Omega_v)$ souligne la forte anisotropie (selon θ_s et θ_v) des mesures et leur saturation avec le LAI. Il est souvent admis que ρ_c sature pour LAI≈2-3 dans le visible et pour LAI≈4-5 dans le PIR. En fait, ces limites asymptotiques dépendent des conditions d'observation (directions de visée, etc.) et du couvert (architecture, etc.). Ainsi, le FRB de couverts où u_f est élevé et spatialement variable (*e.g.*, forêts) peut fortement différer de celui du couvert théorique turbide* souvent utilisé pour modéliser le FRB de couverts agricoles homogènes. Toute hétérogénéité de u_f induit des ombres qui tendent à diminuer la réflectance du couvert par rapport à un milieu turbide de même LAI. Sur la figure 3, on illustre cet effet avec le FRB VIS d'un milieu turbide et d'un couvert de trembles de forêt boréale (GASTELLU-ETCHEGORRY *et al.*, 1999). De manière classique, les deux FRB diminuent quand le LAI augmente. Cette diminution est beaucoup plus forte pour les trembles que pour le milieu turbide, car l'augmentation du LAI renforce les ombres dans le couvert de trembles.

3.2.2. Mesures infrarouge thermique (IRT)

Ce sont des températures apparentes T_B (précision ≈ 0,1 K) qui dépendent fortement de l'émissivité ε et de la température T des surfaces terrestres, de l'atmosphère et de la

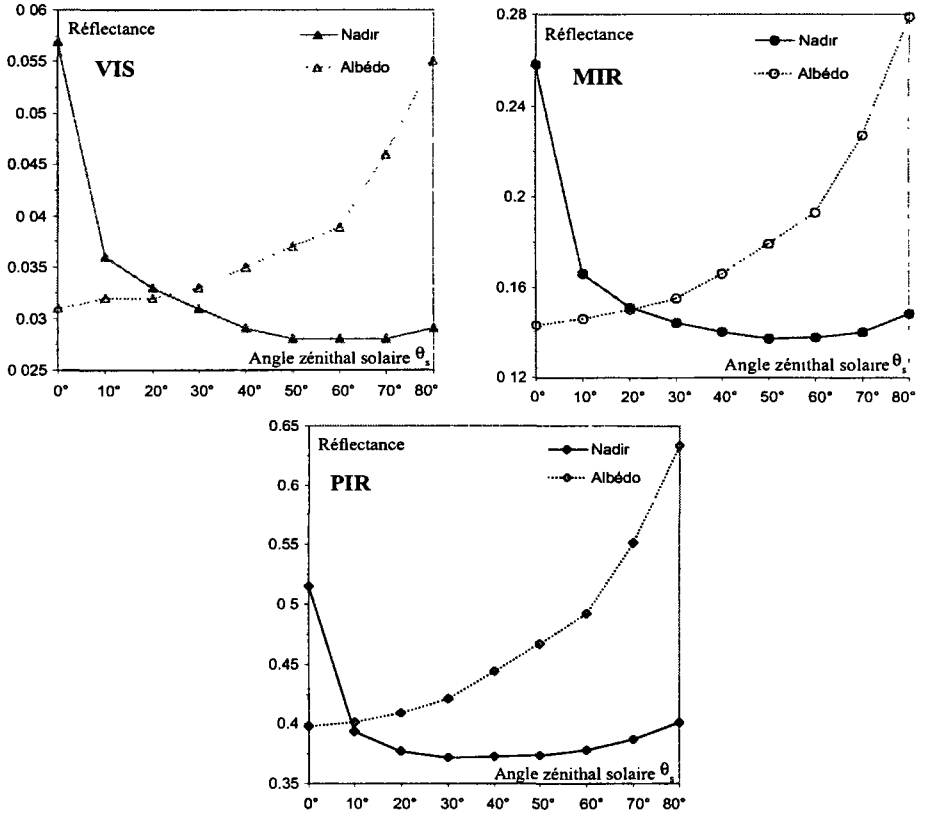


Figure 4. Influence de l'angle zénithal solaire θ_s (0° à 80°) sur l'albédo et la réflectance au nadir VIS, PIR et MIR d'une forêt tropicale. L'estimation de l'albédo avec la seule réflectance au nadir peut conduire à de fortes erreurs.

direction de visée (figure 5). En général, T_B est d'autant plus anisotrope que les surfaces sont hétérogènes et que la température et l'émissivité de leurs composantes (*e.g.*, arbres et sol) diffèrent.

Pour un capteur de bande spectrale $\Delta\lambda_i$ qui observe une surface de température T et d'émissivité ε_i, on a : $T_B = \varepsilon_i^{1/n_i}.T$, où n_i est défini pour approcher la loi de Planck, compte tenu de la sensibilité spectrale du capteur. Cette expression est à l'origine de l'indice TISI $T^{n_i}_B/T^{n_j}_B$) indépendant de T. De plus, elle montre que T_B est beaucoup moins sensible à l'émissivité qu'à la température T. En effet, n_i est supérieur à 1 dans les domaines spectraux utilisés (≈12,6 à 3,73 µm, ≈4,4 à 10,4 µm et ≈4,1 à 11,8 µm), et la dynamique de l'émissivité des surfaces naturelles est relativement faible. Elle est en général comprise entre 0,9 (sol sec) et 0,96 (végétation). La température T considérée est la température de la couche superficielle (quelques micromètres) des surfaces terrestres observées.

3.2.3. Mesures hyperfréquence passive

Ces mesures sont des températures apparentes T_B dont la précision (≈ 1-3K) dépend de la fréquence. Contrairement aux mesures IRT, elles fournissent une information tout temps,

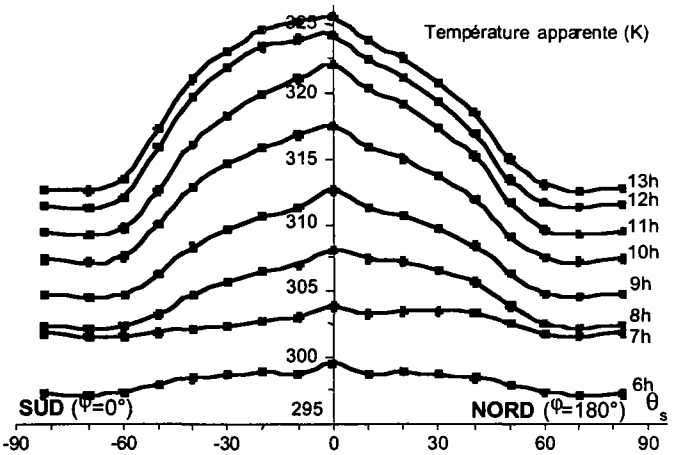


Figure 5. Température apparente de coton (6 h à 13 h) selon des directions de visée θ_v normales aux rangées. Simulations avec le modèle DART (Guillevic, 1999).

car elles sont peu affectées par l'atmosphère et les nuages, et cette information ne provient pas que de la partie superficielle des milieux observés, mais d'un plus grand volume. Ainsi, le rayonnement émis par un sol à 1,4 GHz provient d'une couche de ≈ 2-5 cm d'épaisseur, selon l'humidité, la texture et la rugosité du sol.

En hyperfréquence, T_B est quasiment proportionnelle à la température et à l'émissivité des surfaces observées. Elle est d'autant plus due au sol que la fréquence est basse, car la végétation est alors de plus en plus transparente. Ainsi, le rayonnement émis par un couvert agricole fermé est surtout du au sol à basse fréquence (1,4 GHz) et à la végétation à moyenne fréquence (10 GHz).

L'émissivité des surfaces terrestres est souvent la principale information recueillie avec des mesures hyperfréquence passives, car elle a une dynamique généralement plus élevée que la température. D'une manière générale, elle dépend surtout des états hydriques du sol (m_v) et de la végétation (W_c). Ainsi, l'émissivité ε_{sol} d'un sol de rugosité donnée est quasiment inversement proportionnelle à sa teneur en eau m_v. Le rayonnement émis par un sol humide est donc plus faible que celui émis par un sol sec, à température égale. Par exemple, une diminution de 20 % de l'humidité peut augmenter T_B de l'ordre de 50 à 60 K.

En première approximation, au bas de l'atmosphère il est souvent considéré:

$$T_B(\theta) \approx \varepsilon_{sol}.T_{sol}.e^{-\tau/\mu} + (1 - \omega).T_{veg}.(1 - e^{-\tau/\mu})$$

où t est l'épaisseur optique du couvert et (1 - ω) est l'émissivité de la végétation. Les températures du sol T_{sol} et de la végétation T_{veg} sont souvent supposées égales. En pratique, τ est plus ou moins proportionnel à W_c. Ce modèle, souvent appelé "τ - ω" met bien en évidence que l'influence du sol est d'autant plus faible que le sol est humide et que la biomasse est importante.

3.2.4. Mesures hyperfréquences actives

Comme les mesures hyperfréquences passives, les mesures hyperfréquences actives sont très sensibles à l'humidité du sol (surtout aux basses fréquences) et à la biomasse (surtout aux hautes fréquences). Par contre, elles sont beaucoup plus sensibles à la structure de

surface (rugosité du sol, architecture des couverts). Ceci explique l'aptitude des mesures radar à différentier les types d'occupation du sol.

La puissance P_r reçue par une antenne est généralement exprimée par l'équation radar, à partir de la puissance P_t transmise par l'antenne, du gain G et de la surface A de l'antenne, de la distance R de l'antenne à la cible, et de la surface $\Delta\Sigma$ et du coefficient de rétrodiffusion σ_o de la cible :

$$P_r = [P_t \cdot \frac{G}{4\pi.R^2}].[\sigma_o.\Delta\Sigma].[\frac{A}{4\pi.R^2}]$$

Le terme σ_o dépend de la géométrie du couvert, de l'humidité du sol m_v et du contenu en eau de la végétation W_c. En première approximation :

$$\sigma_o = \sigma_{o,sol}.e^{-2d.Wc/\cos\theta} + \sigma_{o,veg} \text{ où } \sigma_{o,sol} = a + b.m_v \text{ et } \sigma_{o,veg} = c.\cos\theta.(1-e^{-2d.Wc/\cos\theta})$$

Les coefficients de calage (a, b, c, d) dépendent de l'architecture du couvert et de la rugosité du sol. Ils sont souvent obtenus par régression avec des mesures terrain. À basse fréquence, $\sigma_{o,veg} \approx 0$ alors qu'à haute fréquence $\sigma_o \approx \sigma_{o,veg}$.

Ce modèle indique bien que le sol a une composante d'autant plus faible qu'il est sec et que la biomasse est forte. En fait, les mesures radar dépendent d'un grand nombre de paramètres de surface, si bien que toute estimation peut nécessiter des mesures à plusieurs fréquences, polarisations ou directions d'observation. La non disponibilité de telles mesures explique le faible nombre d'applications opérationnelles des radars pour l'extraction de paramètres de surface (GUÉRIF *et al.*, 1997).

3.3. Relations semi-empiriques

3.3.1. Biomasse

La biomasse foliaire est surtout estimée avec des mesures VIS/PIR/MIR et la biomasse ligneuse est surtout estimée avec des mesures hyperfréquence.

- Mesures VIS, PIR, MIR

Il existe de nombreuses relations semi-empiriques pour estimer le LAI et le fAPAR. Elles sont dites génériques, si elles sont appliquées sur l'ensemble du globe, et locales, si elles sont spécifiques à un site donné. Elles utilisent souvent des rapports de combinaisons linéaires de mesures spectrales. Par rapport aux mesures *M*, ces rapports sont généralement conçus pour être plus dépendants des paramètres *P* caractéristiques de la végétation et moins dépendants de facteurs perturbateurs comme le sol, le relief et l'atmosphère. Ils sont donc appelés indices de végétation. Les deux principaux sont l'indice de végétation normalisé NDVI = $\frac{\rho_{PIR} - \rho_{VIS}}{\rho_{PIR} + \rho_{VIS}}$ et le simple rapport SR = $\frac{\rho_{PIR}}{\rho_{VIS}}$ où ρ_{PIR} et ρ_{VIS} sont les réflectances PIR et VIS. Tous deux sont maximaux avec des couverts végétaux denses et fermés, et minimaux avec des surfaces non végétales. D'autres indices (BARET and GUYOT, 1991; BANNARI *et al.*, 1995) ont été conçus pour mieux diminuer l'effet de l'atmosphère et du sol, ou pour rendre plus linéaire la relation "LAI - NDVI".

Exemple de relations génériques : les relations indiquées ici sont utilisées pour le calcul systématique du LAI et du fAPAR des biomes terrestres à partir de l'indice SR de données

AVHRR de NOAA et de valeurs pré-tabulées des fAPAR et SR extrêmes des différents biomes (SELLERS *et al.*, 1996).

$$LAI = LAI_{j,max} \cdot \frac{\log((1-fAPAR)}{\log(1-fAPAR_{j,max})} \text{ ou } LAI = LAI_{j,max} \cdot \frac{fAPAR}{fAPAR_{j,max}} \text{ selon le biome j}$$

$$\text{avec } fAPAR = fAPAR_{j,max} \frac{SR - SR_{j,min}}{SR_{j,max} - SR_{j,min}}$$

Exemple de relations locales : elles dépendent du couvert, de la correction des mesures et des conditions expérimentales (atmosphère, direction de visée, résolution spatiale, etc.). Les relations les plus fiables ont été conçues pour les cultures. Ainsi, pour un couvert de maïs, certains chercheurs utilisent "NDVI=0,942-0,778.e-0,463.LAI". Par contre, pour une forêt de feuillus, ESTÈVE (1998) emploie "$LAI = 50.25.NDVI^{8.71}$", en l'absence de correction atmosphérique, et "$LAI = 12.9.NDVI^{11.24}$", après correction atmosphérique.

- Mesures hyperfréquence passive

La détermination de la biomasse de couverts agricoles requiert en général des mesures dans deux fréquences pour fournir les deux principales composantes de la mesure : la teneur en eau du sol (m_v) et de la végétation (W_c). La biomasse (W_c) est d'autant mieux estimée que la contribution du sol est faible, c'est à dire que la fréquence est élevée et que le sol est humide.

- Mesures hyperfréquence active

Les hautes fréquences renseignent plutôt sur la biomasse foliaire, les fréquences intermédiaires sur la biomasse ligneuse et les basses fréquences sur la rugosité et l'humidité des sols. Ainsi, en bande C (5,3 GHz), la rétrodiffusion d'un couvert forestier est surtout due aux feuilles et petites branches du haut des couronnes (CHAMPION *et al.*, 1997), si bien que les relations empiriques développées ne sont en général valides que pour une biomasse inférieure à 10 $kg.m^{-2}$. La biomasse ligneuse est assez bien corrélée aux mesures en bande P (0,3 GHz) et un peu moins aux mesures en bande L (1,3 GHz).

3.3.2. Taux de couverture σ_f

Il est parfois estimé par régression avec le NDVI (CARLSON and RIPLEY, 1997) ou par l'approximation "$\sigma_f \approx 1 - \exp[-G(\Omega).LAI]$" si le LAI et le LAD sont connus. LACAZE (1999) emploie la régression "$\rho_{PIR}(0,0) - \rho_{VIS}(0,0) = a.\sigma_f + b$" où a et b sont des coefficients de régression et où $\rho_{PIR}(0,0)$ et $\rho_{VIS}(0,0)$ sont des réflectances normalisées pour des directions de visée et solaire au nadir.

3.3.3. Albédo

L'albédo planétaire est estimé avec une combinaison linéaire de réflectances VIS et PIR, car le rayonnement solaire est à 85-90 % dans le VIS et le PIR. L'emploi de plusieurs canaux spectraux est préférable à un seul canal à bande large. En première approximation,

des poids égaux à 0,5 sont souvent appliqués à ρ_{VIS} et ρ_{PIR}. En fait, ces poids dépendent du capteur et de la surface terrestre (neige, océan, végétation, nuage, etc.). Ainsi, pour les couverts végétaux, Certains chercheurs utilisent :

$$\text{Albédo (couverts végétaux)} = 0{,}490 \times \rho_{AVHRR1} + 0{,}440 \times \rho_{AVHRR2} + 0{,}69$$

La prise en compte du FRB du système "atmosphère - Terre" améliore le calcul de l'albédo planétaire. Pour des capteurs à large champ (*i.e.*, AVHRR de NOAA), l'atmosphère, et dans une moindre mesure le FRB des surfaces terrestres, expliquent l'anisotropie du FRB planétaire. L'albédo de surface est dérivé de l'albédo planétaire à l'aide de corrections atmosphériques. Certains estiment la vapeur d'eau et l'extinction des aérosols nécessaires à ces corrections à partir de la différence ($T_{B,4}$ - $T_{B,5}$) et de la réflectance ρ_{AVHRR2} de zones marines voisines. La précision sur l'albédo ainsi obtenu est ≈4 % en absolu.

3.3.4. Concentration en éléments biochimiques

L'estimation depuis l'espace de la chimie des couverts repose sur le fait que les composants biochimiques foliaires affectent les propriétés optiques foliaires dans le domaine (400 2400 nm). Il est utilisé des canaux spectraux assez étroits pour appréhender des caractéristiques (*e.g.*, position et forme des pics d'absorption) spécifiques aux éléments biochimiques. En fait, les mesures *M* dépendent moins de la concentration biochimique surfacique ($\mu g.cm^{-2}$) des feuilles C_f que de celle du couvert $LAI.C_f$ (JACQUEMOUD, 1992; DEMAREZ, 1997). Il est souvent utilisé des régressions multi-linéaires du type "$LAI.C_f$ ou $C_f = \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot \rho_c(\lambda_i)$ ". En fonction de l'élément biochimique, les coefficients de régression a_i dépendent plus ou moins des conditions expérimentales d'acquisition et des propriétés architecturales et optiques du couvert. Cette dépendance est extrême pour des éléments tels que la lignine, l'azote et la cellulose (PINEL, 1997). En fait, selon FOURTY (1996) les seules informations biochimiques susceptibles d'être détectées depuis l'espace avec des régressions multi-linéaires sont la chlorophylle, la matière sèche et l'eau. De plus, cet auteur indique qu'un nombre minimal de 10 bandes spectrales sur le domaine (800 nm 2400 nm) permet d'estimer simultanément la concentration d'eau et de matière sèche des couverts (tableau 2).

Tableau 2. Valeur par ordre d'importance des bandes spectrales, de 800 à 2400 nm, sélectionnées par régression multi-linéaire pour le LAI et les concentrations en eau et matière sèche des feuilles ($C_{H2O,f}$, $C_{MS,f}$) et du couvert. Les chiffres en gras indiquent les jeux de bandes spectrales optimaux (FOURTY, 1996).

n	$C_{H2O,f}$	$LAI.C_{H2O,f}$	$C_{MS,f}$	$LAI.C_{MS,f}$	LAI	$C_{H2O,f}$, $C_{MS,f}$, LAI
1	**1530**	**2040**	**880**	**2290**	**2300**	**2290-2300**
2	**1720**	**900**	**2290**	**1540**	**880**	**1530-1540**
3	**2040**	**1190**	**1540**	**1710**	**1230**	**1690-1720**
4	**2200**	**1100**	**2210**	**1100**	**1530**	**880-900**
5	**2290**	**2260**	**2030**	**1190**	**1690**	**2030-2040**
6	1990	2380	**1060**	**1300**	**2210**	**1190-1230**
7	2160	1300	**1690**	1730	1280	**1060-1100**
8	2140	1530	**1280**	1210	1990	**2200-2210**
9	1650	2300	2080	1080	2170	**1280-1300**
10	1790	1370	2170	1570	1710	**2260**

L'estimation de l'état hydrique des couverts par télédétection est souvent délicate. Elle s'appuie surtout sur des mesures dans le MIR, c'est-à-dire le domaine spectral où la réflectance des couverts est la plus sensible à la teneur en eau. La meilleure bande dans l'intervalle (0,7-2,5 µm) est 1,55-1,75 µm. En effet, les longueurs d'onde a priori optimales comme 1,42-1,56 µm et 1,83-1,88 µm où l'eau liquide absorbe le plus sont inutilisables, car la vapeur d'eau atmosphérique y absorbe beaucoup.

La chlorophylle est l'élément le plus facilement détectable depuis l'espace, car elle absorbe beaucoup dans le VIS. Sa concentration surfacique foliaire Chl_f est donc négativement corrélée aux propriétés optiques VIS des feuilles et des couverts. De plus, les quantités Chl_f et $LAI.Chl_f$ sont positivement corrélées avec le point d'inflexion (λ_i) de la réflectance $\rho_c(\lambda)$ entre le VIS (≈0,68 µm) et le PIR (≈0,75 µm). Ainsi, (λ_i) est déplacé vers les grandes longueurs d'onde quand Chl_f augmente durant la période de croissance. Un intérêt de (λ_i) et des relations empiriques associées est de beaucoup moins dépendre de l'atmosphère et de la direction de visée que les mesures *M.* Ainsi, DEMAREZ (1997) utilise $LAI.Chl_f = \exp\left[\frac{\lambda_i - 713.87}{2.29}\right]$ pour une forêt de feuillus. La précision ainsi obtenue est 10 µg/cm² sur Chl_f, avec (λ_i) dérivé de 8 mesures spectrales fines de 673 nm à 801 nm.

3.3.5. Température

- Télédétection infrarouge thermique

La méthode *split window* ($T_s = \sum_{i=1}^{n} a_i.T_{B,\lambda_i}$), *i.e.* la combinaison linéaire de températures spectrales apparentes $T_{B,\lambda}$, donne des températures de surface marine assez précises (DT≈0,5 K). Pour les surfaces terrestres, la température ainsi estimée est beaucoup moins précise, avec $\Delta T_s \approx$ 2-5 K selon la surface et les conditions d'observation. Ceci est surtout du à la forte variabilité des températures et des émissivités des surfaces terrestres. T_s peut aussi être estimé après correction atmosphérique (à partir de radio sondages, de sondages satellitaires ou de mesures directionnelles). Cependant, la nécessité de méthodes opérationnelles implique des méthodes *split window* comme :

Exemple : $T_{B,S} = T_{B,4} + 3.33(T_{B,4} - T_{B,5}).\frac{5.5 - \varepsilon_4}{4.5} + 0.75.T_{B,4}.(\varepsilon_4 - \varepsilon_5)$ (PRICE, 1984)

Les indices 4 et 5 sont ceux des canaux thermiques AVHRR 4 et 5 de NOAA. Une erreur Δε≈0,01 donne une erreur ΔT≈0,65 K sur T_s.

L'émissivité des couverts dans le domaine spectral le plus utilisé (*i.e.*, 10-12 µm) est souvent évaluée à partir de la connaissance de la fraction de végétation σ_f et de l'hypothèse d'une émissivité de la végétation égale à 0,99.

La détermination de la température de surfaces hétérogènes est très complexe, car le sol et la végétation ont souvent des températures et des émissivités différentes. En exprimant la température apparente $T_{B,s}$ corrigée des effets atmosphériques avec "$T_{B,s} = \sigma_f.T_{B,veg} + (1-\sigma_f).T_{B,sol}$", où $T_{B,sol}$ et $T_{B,veg}$ sont les températures du sol et de la végétation corrigées des effets atmosphériques avec des méthodes *split window* spécifiques, KERR *et al.* (1992) obtiennent des températures avec une précision de 1,5 K.

- Télédétection hyperfréquence passive

Une forte contrainte est que la mesure hyperfréquence passive est en général plus sensible à l'humidité de surface qu'à la température. Cette dernière ne peut souvent être estimée que pour des couverts dont l'émissivité est relativement constante. Ceci est en particulier vrai avec des mesures à haute fréquence, car l'influence du sol est alors négligeable. Les mesures de couverts non fermés dépendent de l'humidité et de la température du sol, ainsi que du taux de couverture σ_f, ce qui peut nécessiter l'emploi de mesures hyperfréquence à différentes fréquences.

3.3.6. Humidité de surface

Cette information est surtout obtenue avec des mesures hyperfréquence. Elle n'est obtenue que de manière indirecte avec les mesures IRT.

- Télédétection hyperfréquence passive

L'humidité de surface est souvent déterminée à l'aide d'une connaissance préalable de la température, obtenue par exemple à partir de relevés ou de modèles météorologiques. Pour un sol nu, une imprécision de 3K sur T_s induit une erreur de l'ordre de 0,01 m^3/m^3 sur m_v (CHAMPION *et al.*, 1997). En fait, l'imprécision sur la connaissance de la rugosité de surface fait que la précision sur m_v est de l'ordre de 0,03-0,05 m^3/m^3 pour les sols nus. La présence de végétation induit des imprécisions d'autant plus importantes que la fréquence est élevée. La détermination simultanée de m_v et de W_c requiert un jeu de mesures acquises à deux fréquences, par exemple à 1,4 GHz et 5 GHz (WIGNERON *et al.*, 1995). L'emploi de la polarisation et de mesures directionnelles peut aussi être utile. Ainsi, les mesures sont de moins en moins polarisées avec le développement de la végétation (TENG *et al.*, 1993), car $T_{B,sol}$ est très polarisée contrairement à $T_{B,veg}$.

- Télédétection radar

La précision obtenue sur l'humidité du sol m_v est relativement faible, du moins pour des couverts fermés. Ainsi, en bande C avec un couvert de blé, certains chercheurs obtiennent $\Delta m_v \approx \pm 0{,}06\text{-}0{,}07\ m^3.m^{-3}$. Ceci souligne l'intérêt d'un couplage avec des mesures VIS, PIR et MIR, car celles-ci sont bien adaptées pour fournir une cartographie préalable de l'occupation du sol.

3.4. Inversion de modèles de transfert radiatif

L'inversion de modèles qui simulent les mesures satellitaires est supposée fournir des paramètres de surface plus fiables que les simples relations semi-empiriques. Plusieurs conditions doivent cependant être réunies :
- précision et robustesse du modèle; sa représentation mathématique des interactions électromagnétiques dans les couverts doit être précise; de plus, ses paramètres d'entrée doivent lui permettre une prise en compte précise des facteurs (architecture du couvert, direction de visée, etc.) qui affectent le plus les mesures satellitaires;
- précision et robustesse de la méthode d'inversion; la non unicité des solution est une forte contrainte, car plusieurs configurations du couvert peuvent conduire à des mesures

identiques; l'emploi de mesures multispectrales, multidirectionnelles, etc. permet souvent de résoudre ce problème.

Le cas particulier de l'inversion de modèles qui simulent les FRB VIS, PIR et MIR de couverts est discuté ci-dessous. Cette approche a tout d'abord été développée par GOEL and THOMPSON, 1984; GOEL, 1989) dans le cas de modèles simples adaptés à des milieux turbides. L'avantage de ces modèles est de permettre des simulations rapides, ce qui permet d'effectuer un grand nombre de simulations pour converger efficacement vers le jeu de paramètres le plus probable.

Inverser la fonction $y = f(x)$ pour une valeur y_i donnée, consiste à rechercher la valeur x_i telle que $y_i = f(x_i)$. Les modèles de réflectance peuvent être considérés comme des fonctions à *n* variables, donnant la valeur de la réflectance en fonction d'un nombre plus ou moins important de paramètres d'entrée (bandes spectrales, angles de visée, angles d'éclairement, structure du couvert, densité foliaire, propriétés optiques foliaires, etc.). L'inversion d'une fonction à *n* variables, consiste à rechercher certains paramètres de la fonction (les paramètres libres) en fixant les autres paramètres (les paramètres fixes). Les paramètres libres sont choisis en fonction du modèle utilisé et de leur intérêt thématique. Les conditions de mesures ainsi que les caractéristiques propres au capteur, telles que les angles de visée et d'éclairement ou les bandes spectrales, font partie des paramètres fixes.

Un modèle de réflectance peut donc être défini par $\rho = f(\mathbf{u},\mathbf{X})$, où $\mathbf{X}$ est le vecteur de paramètres libres de dimension p, $\mathbf{u}$ est le vecteur de paramètres fixes et ρ est la réflectance du milieu étudié. La connaissance de m ($m \geq p$) mesures de réflectance ρ_j^* pour plusieurs valeurs $\mathbf{u}_j$ du vecteur de paramètres fixes, permet de rechercher le vecteur $\mathbf{X}$ qui minimise la fonction coût :

$$\xi(X) = \sum_{j=1}^{m} W_j.[\rho_j - \rho_j^*]^2 \qquad \text{(ESTÈVE, 1998)}$$

Le choix de poids W_j adaptés permet de rendre l'inversion plus rapide et plus précise. La procédure de minimisation est souvent celle du simplexe. Le domaine de recherche des différents paramètres peut être limité par l'ajout d'une pénalité à la fonction coût :

$$\xi(X) = \sum_{j=1}^{m} W_j.[\rho_j - \rho_j^*]^2 + \sum_{i=1}^{n} (\omega_i.(x_i - x_{i,b})^2]^2$$

avec par exemple ω_i très grand si x_i dépasse les bornes possibles.

Une autre méthode d'inversion apparemment prometteuse a été récemment introduite : les réseaux de neurones. Elle repose sur l'emploi de fonctions paramètrées durant une phase d'apprentissage à partir d'un jeu d'entrées/sorties. Ce jeu est créé par simulation directe de réflectances ρ_c avec le modèle que l'on désire inverser, en faisant varier certains de ses paramètres d'entrée. L'emploi de simples fonctions paramètrées conduit à des inversions très rapides. Cette méthode d'inversion s'applique aussi bien aux modèles de réflectance simples et complexes.

- Inversion des modèles turbides

L'inversion utilise en général des mesures spectrales ou directionnelles. Les mesures spectrales sont nécessaires pour étudier la chimie des couverts et les données directionnelles renseignent plus sur la structure. Sur le tableau 3, on présente quelques résultats d'inversion avec des mesures directionnelles. Ainsi, par inversion du modèle SAIL (VERHOEF, 1981) avec des réflectances directionnelles PIR *in situ* d'une culture de soja, GOEL and THOMPSON (1984) ont retrouvé le LAI et deux paramètres (μ et ν) descriptifs du LAD. La précision des estimations du LAI a démontré l'intérêt de la méthode. De même, à partir de l'inversion du modèle de Nilson et Kuusk avec des réflectances *in situ* de culture,

Tableau 3. Exemples d'inversion de modèles turbides, avec indication du modèle, du milieu, des mesures utilisées, des paramètres libres, des paramètres inversés et des données in situ de validation. Les indices (1) et (2) correspondent à deux cas d'inversion réalisés par PRIVETTE *et al.* (1996), avec 1 ou 2 paramètres libres.

	Goel *et al.* (1984)	Kuusk (1991)	Privette *et al.* (1996)	Gao and Lesht (1997)	Bicheron et Leroy (1999)
Modèle inversé	SAIL (Verhoef, 1981)	Nilson-Kuusk (1989)	DISORD (Myneni, 1992)	Gao (1993)	Kuusk (1995)
Milieu étudié	Culture (soja)	Culture (orge trèfle)	Prairies (FIFE)	Prairies (FIFE)	Forêts, savanes cultures.
Mesures de réflectances	In situ, PIR 50 directions	In situ, PIR, rouge ≈13 directions.	AVHRR, PIR ≠ directions	PARABOLA AVHRR	POLDER aéroporté
Paramètres libres	2 : LAI et LAD (μ,v)	11 (ou 9 avec un seul canal)	LAI (1) (LAI, ω_f) (2)	4 : LAI, ω_f, ρ_{sol}, LAD	8: LAI, l*, a_1, N, w_a, w_b, C_{ab}, C_c.
Données de validation	1 date LAI=2,87 ALA = 1,9	20 dates 0,4<LAI<5,7	20 dates 1,7<LAI<2,8		38 mesures LAI, *f*APAR 0,2<LAI<5,1
Résultats d'inversion	LAI = 3,09 ALA = 55,1	RMSE. LAI orge : 2,38 trèfle : 1,25	RMSE. LAI: 0,22 (1), 1,06 (2) ω_f : 0,051 (2)		RMSE LAI : 0,7 *f*APAR : 0,097

KUUSK (1991) a retrouvé le LAI, la dimension et l'orientation des feuilles. D'autre part, l'inversion du modèle de KUUSK (1991) dans la chaîne de traitement des données POLDER (BICHERON and LEROY, 1999) fournit de nombreux paramètres (LAI, chlorophylle, etc.).

- Inversion de modèles complexes

Le temps de calcul est l'inconvénient majeur des modèles complexes lors de l'application de l'inversion à des images spatiales. En effet, le temps d'inversion par les méthodes classiques (*e.g.*, simplexe) dépend du temps de simulation. Deux types de solutions classiques sont illustrés ci-dessous :

1) réseaux de neurones : par inversion du modèle de Li et Strahler avec des réflectances bidirectionnelles, ABUELGASIM *et al.* (1998) ont retrouvé la densité, la forme et la hauteur d'un couvert arboré avec des coefficients de corrélation r^2 égaux respectivement à 0,86, 0,76 et 0,76;

2) tables pré-calculées : ces tables contiennent des réflectances pré-calculées ou les paramètres d'un modèle de réflectance simplifié construit à partir de réflectances pré-calculées. ESTÈVE (1998) a ainsi obtenu des cartes annuelles de taux de couverture et de LAI de la forêt de Fontainebleau par inversion du modèle DART avec une série décennale d'images HRV de SPOT. La précision s'est avérée être équivalente à celle obtenue par étalonnage de relations empiriques avec de nombreuses mesures in-situ. L'intérêt de l'inversion est évidemment de ne pas nécessiter de telles mesures in-situ.

4. Conclusion

Les paramètres de surface susceptibles d'être étudiés depuis l'espace ont été présentés dans cet article. Ils dépendent bien évidemment du type (fréquence, direction de visée, etc.) de mesures satellitaires utilisées. Les méthodes d'estimation reposent en général sur l'emploi de relations analytiques étalonnées avec des mesures terrain. Elles sont souvent peu robustes et fiables en raison de la variabilité des conditions d'observation et de la complexité des milieux naturels. Ces facteurs perturbateurs expliquent l'emploi de plus en plus fréquent de modèles de télédétection à la fois précis et robustes pour toute estimation opérationnelle des paramètres de surface.

5. Références

ABUELGASIM, A., GOPAL, S. and STRAHLER, A., 1998. Forward and inverse modeling of canopy directional reflectance using a neural network. Int. J. Rem. Sens., vol. 19, n° 3, p. 453-471.

BANNARI, A., MORIN, D., HUETE, A.R. and BONN, F., 1995. A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, vol. 13, p. 95-120.

BARET, F. and GUYOT, G, 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sens. Environ., vol. 35, p. 161-173.

BICHERON, P. and LEROY, M., 1999. A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model. Rem. Sens. Env., vol. 67, p. 251-266.

BOTKIN, D.B., 1986. Remote sensing of the Biosphere. Report of the Commitee on planetary biology, National Academy of Sciences, Washington DC, USA.

BRUNET, Y., LAMAUD, E. et PRADEL, E., 1997. Les problèmes d'échelles en modélisation. École-Chercheurs INRA, Le Croisic 25-29 mars 1996, p. 253-271.

CARLSON, T. and RIPLEY, D., 1997, On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index. Remote Sens. Environ., vol. 62, p. 241-252.

CHAMPION, I., WIGNERON, J.P. et BRÉDA, N., 1997. Variables de fonctionnement issues des données de télédétection micro-ondes, École-Chercheurs INRA, Le Croisic, mars 1996, p. 145-168.

CHOUDHURY, B.J. and MONTEITH, J.L., 1988. A four layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. Quaterly J. of Royal Meteor. Society, vol. 114, p. 373-398.

DEMAREZ, V, 1997. Modélisation du transfert radiatif et télédétection hyperspectrale pour suivre la chlorophylle de forêt tempérée, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

ESTÈVE, P., 1998. Inversion du modèle de transfert radiatif DART. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

FOURTY, T., 1996. Estimation du contenu biochimique d'un couvert végétal à partir de données haute résolution spectrale acquises au niveau satellitaire. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

GAO, W. and LESHT, B. M., 1997. Model inversion of satellite-measured reflectances for obtaining surface biophysical and bidirectional reflectance characteristics of grassland. Rem. Sens. Env., vol. 59, p. 461-471.

GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P. DEMAREZ, V., PINEL, V., and ZAGOLSKI, F., 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. Rem. Sens. Env., vol. 58, p. 131-156.

GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P., GUILLEVIC, P., ZAGOLSKI, F., DEMAREZ, V., TRICHON, V., DEERING, D. and LEROY, M., 1999. Modeling BRF and radiation regime of tropical and boreal forests, Part I : BRF. Remote Sensing of Environment, vol. 68, p. 281-316.

GHLOZ, H.L., 1982. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest, Ecol., vol. 63, p. 469-481.

GOEL, N.S. and THOMPSON, R.L., 1984. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. IV. Total inversion of the SAIL model. Rem. Sens. Env., vol. 15, p. 237-253.

GOEL, N.S., 1989. Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data. Dans Theory and applications of Optical Remote Sensing. Ghassem Asrar, Wiley-Interscience, New York.

GUÉRIF, M., LAGOUARDE, J.P. et NICOLAS, H., 1997. Principes de fonctionnement des couverts végétaux issues des données de télédétection dans les domaines optique et infrarouge thermique. École-Chercheurs INRA, Le Croisic, mars 1996, p. 81-108.

JACQUEMOUD, S., 1992. Utilisation de la haute résolution spectrale pour l'étude des couverts végétaux : développement d'un modèle de réflectance spectrale. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

KERR, Y., LAGOUARDE, J.P. and IMBERNON, J., 1992. Accurate land surface temperature retrieval with AVHRR data with use of an improved split windows algorithm. Remote Sens. Envir., vol. 41, p. 197-209

KUUSK, A., 1991. Determination of Vegetation Canopy Parameters from Optical Measurements. Rem. Sens. Env., vol. 37, p. 207-218.

LACAZE, R., 1999. Restitution des paramètres des surfaces continentales utiles à l'étude du climat à partir des observations multiangulaires de télédétection optique. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

PRICE, J.C., 1984. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 AVHRR. J. Geophys. Res. vol. 89, p. 7231-7237.

PRIVETTE, J.L., EMERY, W.J. and SCHIMEL, D.S., 1996. Inversion of a Vegetation Reflectance Model with NOAA AVHRR Data. Rem. Sens. Env., vol. 58, p. 187-200.

PINEL, V., 1997. Apport de la modélisation du transfert radiatif pour l'étude des écosystèmes forestiers par télédétection. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

ROYER, J.F., OLIOSO, A. et COURAULT, D., 1997. Les modèles de circulation générale de l'atmosphère. École-Chercheurs INRA, Le Croisic, mars 1996, p. 193-226.

RUNNING, S.W. and COUGHAN, J.C., 1988. A general model of forest ecosystem processes for tregional applications : I- Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. Ecological Modelling, vol. 42, p. 125-154.

SELLERS, P.J., LOS, S.O., TUCKER, C.J., JUSTICE, C.O., DAZLICH, D.A., COLLATZ, G.J. and RANDALL, D.A., 1996. A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs: Part II. The generation of global fields of terrestrial biosphisical parameters from satellite data. Journal of Climate, vol. 9, n° 4.

TENG, W.L., WANG, J.R. and DORAISWAMY, P.C., 1993. Relationship between satellite microwave radiometric data, antecedent precipitation index, and regional soil moisture. Int. J. Remote Sens., vol. 14, p. 2483-2500.

VERHOEF, W., 1981. Light scattering by leaf layer with application to canopy reflectance modeling : The SAIL model. Rem. Sens. Env., vol. 16, p. 125-141.

WIGNERON, J.P., CHANZY, A., CALVET, J.C. and BRUGUIER, N., 1995. A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields. Remote Sens. Environ., vol. 41, p. 331-341.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 319-332

32

Intérêt du moyen infrarouge pour la cartographie des résidus de cultures : cas du capteur ETM+ de Landsat-7

ABDERRAZAK BANNARI [1], DRISS HABOUDANE [2] et FERDINAND BONN [2]

[1] *Laboratoire de télédétection et de géomatique, Département de géographie, Université d'Ottawa, C.P. 450, Succ. A, Ottawa (Ontario), Canada K1N 6N5; téléphone : +1 (613) 562-5800 (poste 1042); télécopieur : +1 (613) 562-5145; courriel : abannari@uottawa.ca*

[2] *Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1; téléphone : +1 (819) 821-7180 (poste 1042); télécopieur : +1 (819) 821-7944; courriel : driss.haboudane@hermes.usherb.ca*

Résumé

Les résidus de cultures jouent un rôle important dans la protection de la surface du sol contre l'érosion par l'eau et par le vent. Leur conservation sur les terres agricoles, après la moisson, a été considérée comme une pratique anti-érosive efficace. Certains chercheurs ont montré qu'un minimum de 15 % de couverture par les résidus peut réduire l'érosion de 75 % par rapport à un sol nu. Cette étude porte sur l'analyse du potentiel et de l'intérêt du moyen infrarouge pour la détection et la cartographie des résidus de cultures. Ce domaine spectral s'est avéré d'un grand intérêt aussi bien pour l'étude de la végétation vivante et la caractérisation de la végétation sénescente ou sèche que pour l'identification des sols et des roches. Dans cette étude nous avons exploité des mesures spectroradiométriques de plusieurs sols nus ayant différents taux d'humidité et des propriétés optiques différentes, et des résidus de soja et d'orge ayant différents recouvrements.

Les mesures ont été rééchantillonnées dans les bandes spectrales du visible et de l'infrarouge du capteur ETM+ de Landsat-7 qui a été lancé en avril 1999. Les résultats obtenus montrent que, sans contredit, le moyen infrarouge est la région spectrale qui possède la meilleure sensibilité à la présence des résidus. Les indices NDI (*Normalized Difference Index*) et SACRI (*Soil Adjusted Corn Residue Index*) montrent une sensibilité réduite en terme de détection des résidus. Bien que les indices NDI5-7 et MSACRI (*Modified Soil Adjusted Corn Residue Index*), qui combinent les canaux ETM-5 et ETM-7 de Landsat-7, présentent un bon potentiel et une grande similitude au point de vue sensibilité à la variation du taux de couverture par les résidus, le NDI5-7 reste sensible aux propriétés optiques des sols nus sous-jacents, notamment lorsque le sol est sec et de couleur claire et brillante. Le nouvel indice de résidus MSACRI montre une assez bonne dynamique, avec des valeurs moyennes voisines de 0,03 pour un très faible taux de couverture et proches de 0,20 pour des résidus couvrants. Afin de résoudre ce problème de saturation, on propose d'introduire une constante multiplicative égale à 5 qui ramènerait les valeurs de MSACRI dans une gamme comparable à celle des indices de végétation, soit une échelle entre 0 et 1.

1. Introduction

Depuis le lancement des satellites Landsat, les chercheurs en télédétection se sont penchés sur l'étude de la complémentarité des domaines spectraux du visible et de l'infrarouge (BARET *et al.*, 1988; SHIBAYAMA and AKIYAMA, 1989) ainsi que sur la richesse en informations du moyen infrarouge (BARET *et al.*, 1985). Ces recherches portaient essentiellement sur l'étude des caractéristiques spectrales de la végétation verte car les processus biophysiques, comme la photosynthèse et la transpiration se produisent au niveau des feuilles vivantes (ELVIDGE, 1990). Ainsi, les bandes spectrales des capteurs TM (*Thematic Mapper*) de Landsat et HRV (*Haute Résolution Visible*) de SPOT ont été définies pour mieux suivre l'évolution des couverts végétaux et distinguer leurs signatures spectrales de celles des sols nus (GUYOT, 1989). Toutefois, un intérêt moindre a été porté aux caractéristiques spectrales des composantes non vertes (ou sèches) du couvert végétal. Seulement certains auteurs, comme KAUTH et THOMAS (1976), GUYOT (1984) et GUYOT et SEGUIN (1988), se sont intéressés au suivi des propriétés spectrales du couvert au cours de la sénescence.

La végétation sénescente et les résidus de cultures jouent un rôle important dans la protection de la surface du sol contre l'érosion par l'eau et par le vent (DUMANSKI *et al.*, 1986). Leur conservation sur les terres agricoles, après la moisson, a été considérée comme une pratique anti-érosive efficace (ROBERTS and COLEMAN, 1988; MAJOR *et al.*, 1990). Ils protègent les sols contre l'impact des pluies et ils réduisent le ruissellement. En effet, FREEBAIRN et WORCKER (1986) ont montré qu'un minimum de 20 % de couverture par les résidus permet de réduire l'érosion et une équipe de scientifiques de l'Université de Guelph au Canada a trouvé qu'un taux de couverture de résidus de maïs aussi faible que 15 % peut réduire l'érosion de 75 % par rapport à un sol nu (KETCHESON and STONEHOUSE, 1983). Toutefois, l'estimation du taux de couverture des résidus par des modèles empiriques n'est pas assez précise et constitue une source d'erreurs importantes à cause de la similitude entre le spectre des résidus et celui du sol lui-même dans les domaines du visible et du proche infrarouge (BARET, 1986). D'après McNAIRN et PROTZ (1993) et BIARD *et al.* (1995), la combinaison du proche infrarouge (0,76 µm - 0,90 µm) et du moyen infrarouge (1,55 µm - 1,75 µm) a donné des résultats très prometteurs

en matière de détection et de cartographie des résidus de maïs. Aussi, les travaux de ELVIDGE (1990) ont montré la possibilité de caractériser la végétation sèche par ses propriétés d'absorption dans le moyen infrarouge incluant la bande TM-7 (2,08 µm - 2,35 µm), d'où la pertinence d'explorer le potentiel de ce domaine spectral et d'examiner les possibilités qu'il offre en matière de distinction entre les sols et la végétation sénescente.

Mis à part l'absorption par la vapeur d'eau, le moyen infrarouge (1,3 µm - 2,5 µm) se caractérise par une grande transparence vis-à-vis des constituants atmosphériques (KING *et al.*, 1992). Par conséquent, l'effet de l'environnement est réduit et les images seront plus contrastées. Ce domaine spectral s'est avéré d'un grand intérêt aussi bien pour l'étude de la végétation vivante (structure, teneur en eau, etc.) et la caractérisation de la végétation sénescente ou sèche que pour l'identification des sols et des roches (BARET et ANDRIEU, 1994). Ainsi, compte tenu de l'importance accordée au moyen infrarouge dans les programmes de télédétection spatiale (VÉGÉTATION de SPOT-4, MODIS (*MODerat résolution Imaging Spectrometer*) de EOS et ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) de Landsat-7) et aéroportée (télédétection hyperspectrale), on se propose d'étudier les possibilités offertes par le domaine du moyen infrarouge en matière de distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. Une attention particulière sera portée à l'apport des canaux ETM-5 et ETM-7 (ou TM-5 et TM-7) qui sont situés en dehors des bandes d'absorption intense de l'eau dans cette partie du spectre électromagnétique. À cette fin, nous avons exploité des mesures spectroradiométriques de plusieurs sols nus ayant différents taux d'humidité et des propriétés optiques différentes, et des résidus de soja et d'orge ayant différents recouvrements. Les mesures ont été rééchantillonnées dans les bandes spectrales du visible et de l'infrarouge du capteur ETM+ de Landsat-7 qui a été lancé en avril 1999.

2. Matériel et méthode

2.1. Protocole expérimental

Les mesures radiométriques ont été effectuées sur deux types de résidus (orge et soja) et deux types de sols (loam argileux et sol sablonneux) à l'aide d'un spectroradiomètre portable GER-2100. Celui-ci opère dans les domaines du visible, du proche et du moyen infrarouge, soit des longueurs d'onde allant de 0,39 à 2,5 µm. Les mesures radiométriques ont été effectuées avec une résolution de 10 nm entre 0,4 et 1,0 µm et de 24 nm dans l'intervalle 1,0 - 2,5 µm. Le spectroradiomètre était installé sur une potence à une hauteur de 1,5 m du sol permettant d'observer, en visée verticale, une surface d'environ 25 x 13 cm. Les sols argileux (de couleur claire) et sablonneux (relativement brun) ont été placés côte à côte sur une planche de bois d'environ 1 m^2. Cela a permis de viser une surface mixte à 50 % de sol argileux et 50 % de sol sablonneux.

Les mesures spectrales sur les sols ont été réalisées à différents états d'humidité (humide, moyennement humide et sec) dans le but de pouvoir déterminer les paramètres de la droite des sols (pente et ordonnée à l'origine) qui serviront à corriger les effets des propriétés optiques des sols nus sous-jacents sur les réponses spectrales des résidus. En ce qui concerne les résidus, les mesures ont été effectuées pour différents taux de couverture: 0 % (sol nu), 5 %, 10 %, 25 %, 40 %, 60 %, 80%, 95 % et 100 % (résidus totalement couvrants). Elles ont été prises aussi bien au-dessus de chacun des deux sols (argileux et sablonneux) qu'au-dessus de la zone mixte (argile plus sable). Pour tenir compte de l'effet

bidirectionnel de la réflectance de la cible, qui dépend à la fois de l'angle d'illumination et de l'angle de visée, on a effectué les mesures autour de l'heure zénithale suivant une direction de visée verticale. Aussi, puisque le GER mesure la luminance de la cible et étant donné qu'on ne connaît pas l'éclairement (direct et diffus) reçu par cette cible, on a mesuré pour chaque cas les luminances totale et diffuse de la surface de référence (spectralon) ainsi que les luminances totale et diffuse de la cible. Cela permettra de calculer le facteur de réflectance de la cible conformément à la méthode décrite par JACKSON *et al.* (1980).

2.2. Considérations théoriques

L'examen des signatures spectrales des surfaces naturelles montre que le sol est, de façon générale, plus réfléchissant que la végétation vivante dans le visible et le moyen infrarouge, et moins réfléchissant dans le proche infrarouge. Toutefois, cette tendance ne se maintient pas durant la sénescence et le dessèchement de la végétation verte : la réflectance de la végétation connaît un fort accroissement aussi bien dans le vert et le rouge (disparition des pigments chlorophylliens) que dans le moyen infrarouge (dessèchement) (figure 1). Il y a, alors, similitude entre le spectre de la végétation sénescente et celui du sol nu dans le visible et le proche infrarouge, d'où la notion de la droite de sénescence homologue de la droite des sols nus (BARET, 1986). Donc, les canaux rouge et proche infrarouge, caractérisés par le contraste le plus élevé entre le sol et la végétation photosynthétiquement active, ne permettront pas de distinguer entre sol nu et végétation sénescente ou sèche. En effet, à défaut de contraste de réflectance entre le rouge et le proche infrarouge dans le cas de la végétation sèche, les indices de végétation classiques ne sont pas adaptés pour la détection des résidus. Par conséquent, il est impératif de recourir à d'autres domaines spectraux qui offrent un meilleur contraste entre le sol et les résidus. C'est ainsi que McNAIRN et PROTZ (1993) ont constaté la sensibilité du moyen infrarouge à la présence de résidus de maïs et ont retenu le formalisme du *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) développé par ROUSE *et al.* (1974) pour mettre au point le *Normalized Difference Index* (NDI) basé sur la différence normalisée entre les réflectances des bandes du proche et du moyen infrarouge du capteur TM de Landsat (équation 1).

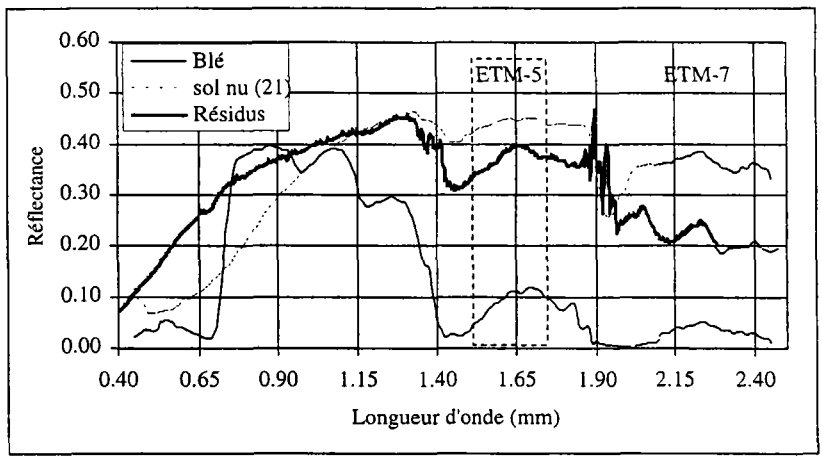


Figure 1. Spectres de sol nu, blé photosynthétiquement actif et les résidus d'orge

$$NDI = (\rho_{ETM4} - \rho_{ETM5}) / (\rho_{ETM4} + \rho_{ETM5}) \quad (1)$$

où :

ρ_{ETM-4} : réflectance mesurée dans la bande ETM-4 (ou TM-4);
ρ_{ETM-5} : réflectance mesurée dans la bande ETM-5 (ou TM-5).

Pour minimiser les effets des propriétés optiques des sols sur le NDI, BIARD *et al.* (1995) se sont inspirés de l'approche proposée par BARET *et al.* (1989) pour transformer le *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (HUETE, 1988) en *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* (TSAVI) et ils l'ont transformé en *Soil Adjusted Corn Residue Index* (SACRI) (équation 2) :

$$SACRI = \alpha(\rho_{ETM4} - \alpha \rho_{ETM5} - \beta) / (\alpha \rho_{ETM4} + \rho_{ETM5} - \alpha\beta) \quad (2)$$

où :

α : pente de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM-4 / ETM-5;
β : ordonnée à l'origine de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM-4 / ETM-5.

Si le SACRI a l'avantage d'améliorer le NDI vis-à-vis des propriétés optiques des sols, il présente l'inconvénient de n'être sensible qu'aux faibles taux de couverture par les résidus (BIARD *et al.*, 1995; BANNARI *et al.*, 1999). En effet, il présente une dynamique faible pour des taux de couverture supérieurs à 25 %. C'est pour cette raison qu'on a entrepris notre expérimentation sur d'autres types de résidus (orge et soja) dans le but d'estimer la plage des valeurs du SACRI et de délimiter son domaine de validité. Dans cette étude, on examine l'apport et le potentiel du moyen infrarouge pour la détection des résidus de cultures. L'accent est mis sur la comparaison des performances du NDI, SACRI et la nouvelle version que nous proposons *Modified Soil Adjusted Corn Residue Index* (MSACRI) (équation 3) qui exploite les bandes ETM-5 et ETM-7 de Landsat-7 ou les bandes TM-5 et TM-7 de Landsat-5. Précisons que pour cette nouvelle version, la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite des sols nus sont calculées dans l'espace spectral bidimensionnel ETM-5 et ETM-7.

$$MSACRI = a(\rho_{ETM5} - a \rho_{ETM7} - b) / (a \rho_{ETM5} + \rho_{ETM7} - ab) \quad (3)$$

où:

ρ_{ETM-5} : réflectance mesurée dans la bande ETM-5 (ou TM-5);
ρ_{ETM-7} : réflectance mesurée dans la bande ETM-7 (ou TM-7);
a : pente de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM-5 / ETM-7;
b : ordonnée à l'origine de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM-5 / ETM-7.

L'intérêt de la bande 7 réside dans le fait que cette région du spectre électromagnétique est identifiée comme étant favorable à l'identification et la différenciation des roches, des sols (MULDERS and GIRARD, 1993), des composantes sèches de la végétation (ELVIDGE, 1990; HABOUDANE *et al.*, 1997; BANNARI *et al.*, 1999) ainsi que de la végétation verte (MALTUS *et al.*, 1993).

3. Résultats et discussion

Dans cette section, on cherche à examiner le potentiel des régions spectrales du proche et moyen infrarouge pour la détection des résidus de cultures et, en particulier, à évaluer la sensibilité du moyen infrarouge à la présence de la végétation sèche. Cela va permettre d'évaluer l'apport de la combinaison des bandes du proche infrarouge (ETM-4) et du moyen infrarouge (ETM-5 et ETM-7). Ainsi, on a étendu le formalisme du NDI aux bandes ETM-5 et ETM-7. Par ailleurs, étant donné que la réponse radiométrique des résidus peut être fortement influencée par les propriétés optiques du sol, on adopte aussi le formalisme du SACRI en vue de corriger les effets de la couleur et la brillance des sols sur les indices de résidus. L'introduction de la bande ETM-7 est dictée par la divergence des tendances spectrales des sols et des résidus dans cette région du spectre (section précédente). Ces tendances montrent nettement que le canal ETM-7 permettra de mieux rehausser le contraste entre les sols et les résidus (figure 1).

3.1. Potentiel du moyen infrarouge

Pour mettre en évidence le potentiel du moyen infrarouge en matière de distinction entre les sols et les résidus, on a représenté les réflectances obtenues sur les sols et les résidus dans l'espace spectral ETM-5 / ETM-4 (figure 2a), ETM-7 / ETM-4 (figure 2b) et ETM-7 / ETM-5 (figure 2c). Sur la figure 2a on montre que la distribution des points de mesures obtenus sur différents taux de couverture par les résidus (soja et orge) se fait le long (ou dans le prolongement) de la droite des sols. Ce qui fait que le potentiel de discrimination par la combinaison des canaux ETM-5 et ETM-4 reste relativement limité. Par contre les combinaisons impliquant la bande ETM-7 montrent un niveau élevé de sensibilité à la présence de résidus (figures 2b et 2c). On note que les points de résidus qui se confondent avec ceux des sols, à proximité de la droite des sols, correspondent à des taux de couvertures faibles. Il importe de souligner que l'espace spectral ETM-7 / ETM-5 (figure 2c) offre une

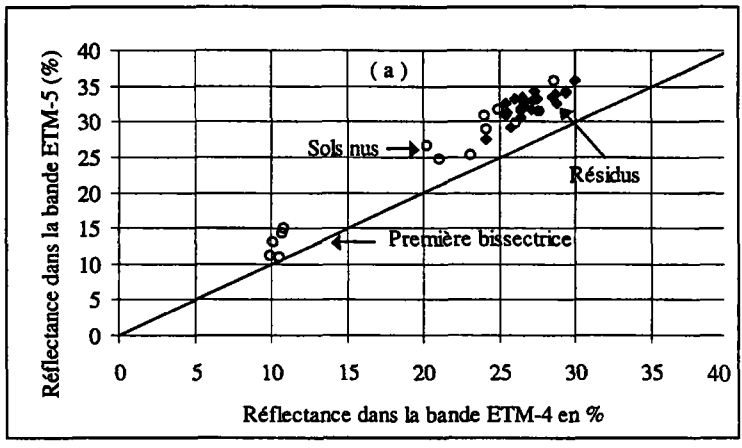
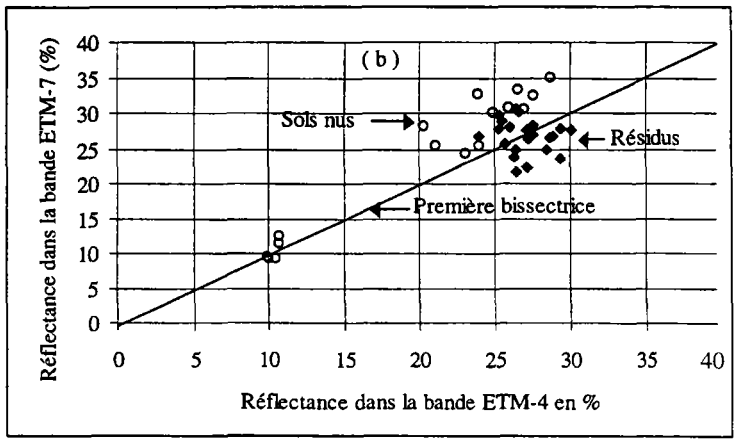


Figure 2. Représentation des réflectances des sols nus et des résidus de soja et d'orge : (a) dans l'espace spectral ETM-5 / ETM-4, (b) dans l'espace spectral ETM-7 / ETM-4 et (c) dans l'espace spectral ETM-7 / ETM-5



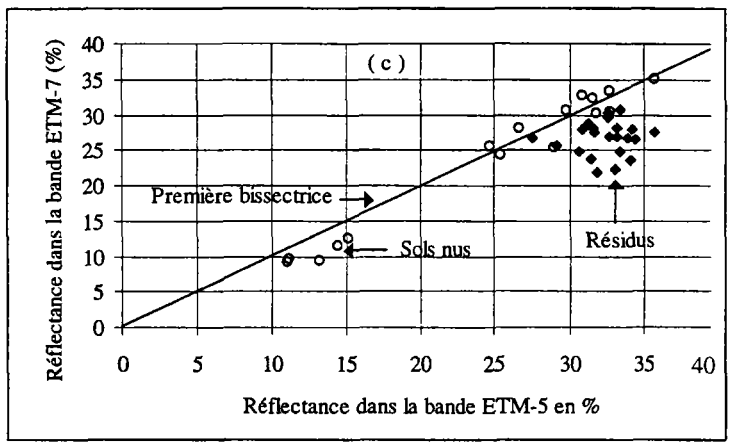


Figure 2. (suite) Représentation des réflectances des sols nus et des résidus de soja et d'orge : (a) dans l'espace spectral ETM-5 / ETM-4, (b) dans l'espace spectral ETM-7 / ETM-4 et (c) dans l'espace spectral ETM-7 / ETM-5

meilleure discrimination sols/résidus. Or, cette représentation dans un espace bidimensionnel ne permet pas de mettre en relief les effets relatifs aux propriétés optiques des sols nus sous-jacents aux résidus. Cet aspect sera examiné dans les paragraphes suivants dans lesquels on traite des indices de résidus.

3.2. Effets des propriétés optiques des sols sous-jacents

Étant donné que les résidus de cultures sont souvent peu couvrants, un bon indice de résidus doit être indépendant de la couleur et la brillance des sols sous-jacents, c'est-à-dire que ses valeurs pour les sols nus doivent être nulles ou presque (BANNARI *et al.*, 1999). Sur les figures 3a et 3b on montre la différence de sensibilité des indices NDI, SACRI et MSACRI aux propriétés optiques des sols sous-jacents aux résidus. En effet, la distribution des

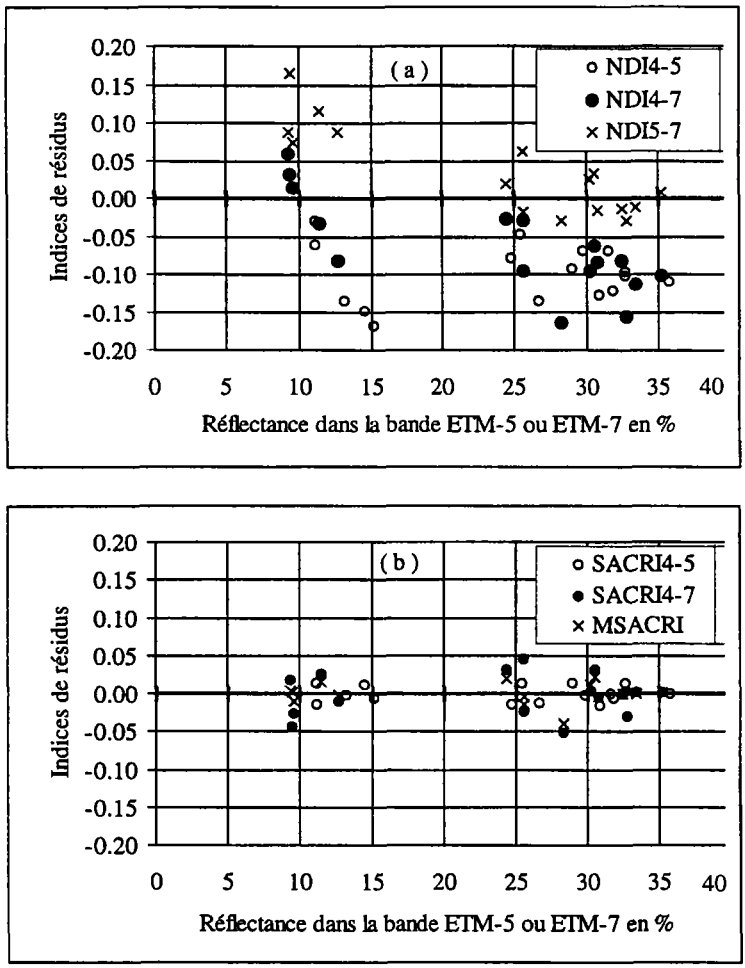


Figure 3. Effet des propriétés optiques des sols nus sur les indices de résidus

valeurs de ces indices obtenus sur des sols nus (figure 3a) montre que, quelles que soient les bandes mises en jeux, l'indice NDI est fortement affecté par les propriétés des sols. Les nuages de points relatifs à ces indices ne s'alignent pas le long de la droite théorique des sols (valeurs nulles), mais ils sont distribués de façon aléatoire avec des écarts pouvant atteindre $\pm 0,18$ selon les bandes spectrales impliquées et selon les caractéristiques des sols nus considérés. Toutefois, le NDI utilisant les canaux ETM-7 et ETM-5 donne des résultats satisfaisants dans le cas des sols ayant une humidité moyenne à faible ou des résultats insuffisants dans le cas des sols secs et de propriétés optiques claires et brillantes. Quant aux indices SACRI et MSACRI ils montrent un très bon comportement vis-à-vis des sols nus car ils répondent à l'exigence d'un bon indice de résidus en donnant des valeurs nulles ou presque pour les sols nus (figure 3b).

3.3. Comparaison des différents indices utilisés

L'évolution des différents indices en fonction du taux de couverture par les résidus de l'orge, du soja et de l'ensemble « orge + soja » est représentée sur les figures 4 et 5. Ces derniers montrent que lorsque les résidus sont moins couvrants les effets des propriétés optiques des sols sont très prononcés sur le NDI4-5 et moyennement prononcés sur les indices NDI4-7 et NDI5-7, notamment lorsque les sols sont humides et sombres. Par contre, lorsque les sols sont secs et de couleur claire, l'erreur sur le NDI5-7 reste très prononcée et varie entre 10 % et 15 % (figure 3a). Lors du passage du NDI au SACRI, les valeurs subissent une translation moyenne d'environ 0,10 pour le NDI4-5 et d'environ 0,05 pour les indices NDI4-7 et NDI5-7. Il semblerait, alors, que les combinaisons utilisant les couples (ETM-4, ETM-5) et (ETM-4, ETM-7) sont plus sensibles aux effets des sols que la combinaison impliquant les bandes ETM-5 et ETM-7. Cela expliquerait l'amélioration de la classification obtenue, dans le cas des sols sablonneux, par McNAIRN et PROTZ (1993) quand ils introduisaient dans leur modèle un second NDI utilisant la bande TM-7.

Sur les figures 4 et 5, on montre aussi que les indices développés pour la détection des résidus de maïs, NDI4-5 et SACRI4-5, présentent une faible dynamique quand le taux de résidus passe de 0 à 100 %. Exception faite des résultats obtenus pour les résidus d'orge sur le sol sablonneux, ces indices sont faiblement corrélés avec le pourcentage de couverture par les résidus. D'ailleurs, le cas des résidus d'orge sur sol sablonneux est la seule situation où l'on note une bonne corrélation entre le taux de couverture par les résidus et la bande ETM-4. Quant aux indices NDI et SACRI utilisant les couples ETM-4, ETM-7 et ETM-5, ETM-7 ils ont un comportement presque similaire en matière de sensibilité à la présence des résidus d'orge et de soja. Ils montrent une tendance croissante, plus ou moins linéaire, au fur et à mesure que le pourcentage de résidus augmente (figures 4 et 5). En plus, les niveaux de corrélation entre ces indices et le taux de couverture par les résidus sont relativement élevés. En effet, on obtient, en moyenne, une valeur de 0,93 pour le soja et de 0,90 dans le cas de l'orge. Notons aussi que le NDI5-7 est relativement plus sensible que le NDI4-7 surtout lorsque les résidus sont moyennement ou peu couvrants. Bien que les indices SACRI4-7 et MSACRI montrent une assez bonne dynamique, avec des valeurs

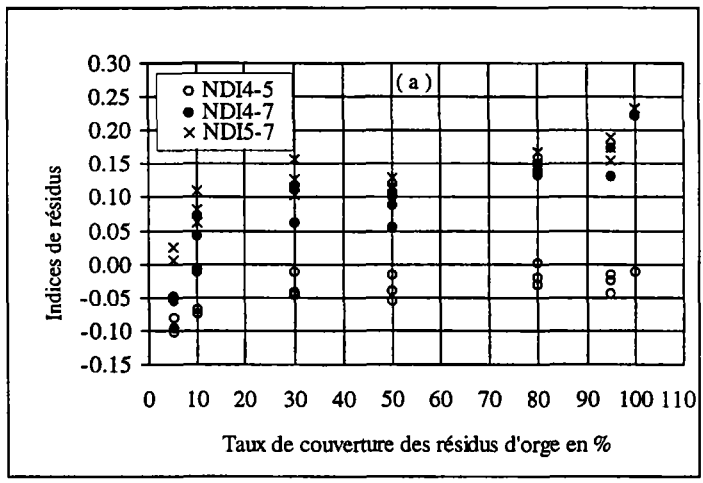


Figure 4. Sensibilité des indices de résidus en fonction de différents taux de couverture des résidus d'orge

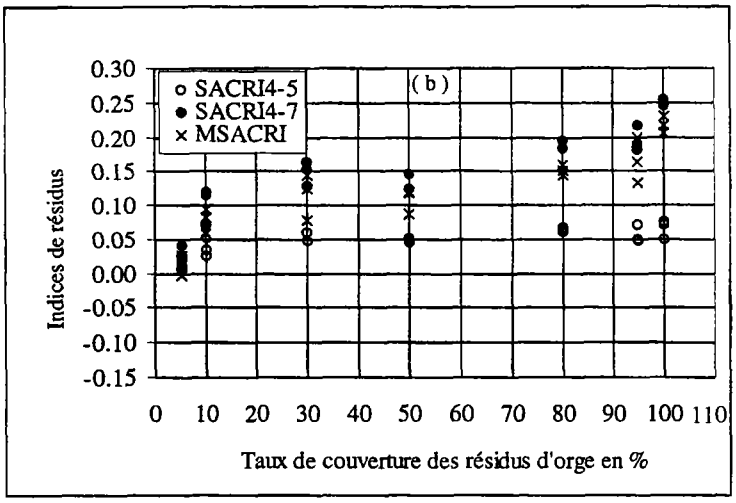


Figure 4. (suite) Sensibilité des indices de résidus en fonction de différents taux de couverture des résidus d'orge

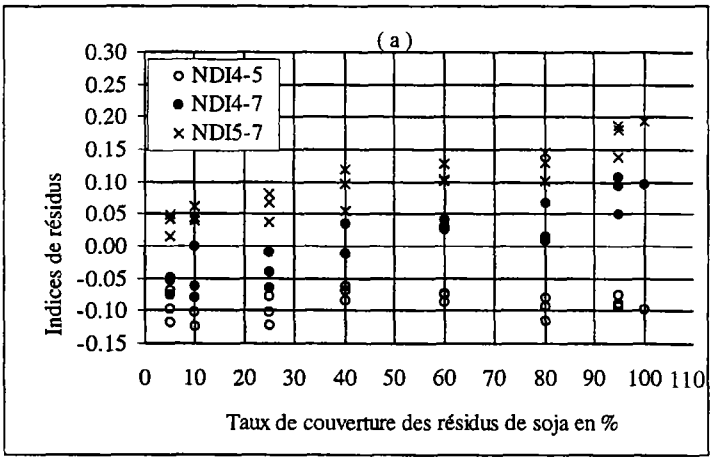


Figure 5. Sensibilité des indices de résidus en fonction de différents taux de couverture des résidus de soja

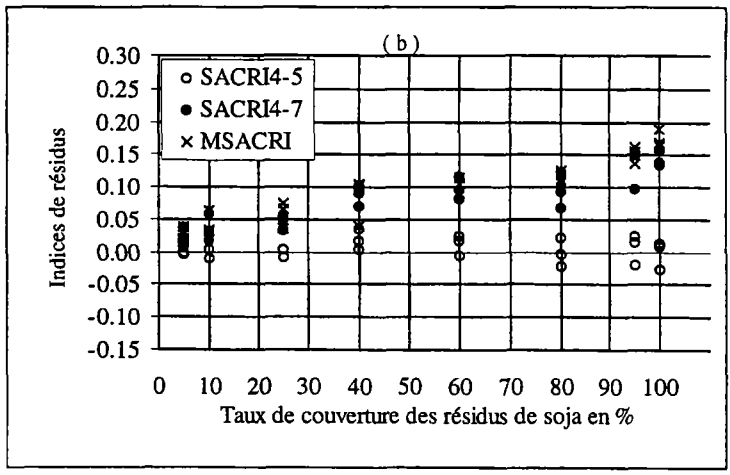


Figure 5. (suite) Sensibilité des indices de résidus en fonction de différents taux de couverture des résidus de soja

moyennes voisines de 0,03 pour un très faible taux de couverture et proches de 0,20 pour des résidus couvrants, leur plage de valeurs reste relativement restreinte. En effet, leurs valeurs respectives ne dépassent pas 0,25 (SACRI4-7) et 0,23 (SACRI5-7) pour des résidus d'orge entièrement couvrants. Dans le cas des résidus de soja, ces valeurs sont à peine de 0,15 pour SACRI4-7 et 0,20 pour SACRI5-7. Afin de résoudre ce problème de saturation, on propose d'introduire une constante multiplicative « C^{ste} » égale à 5 qui ramènerait les valeurs de MSACRI dans une gamme comparable à celle des indices de végétation, soit une échelle entre 0 et 1 :

$$MSACRI = C^{ste}\left[a\left(\rho_{ETM5} - a\,\rho_{ETM7} - b\right)/\left(a\,\rho_{ETM5} + \rho_{ETM7} - ab\right)\right] \qquad (4)$$

En effet, la figure 6 illustre bien cette situation, pour l'orge comme pour le soja le MSACRI augmente progressivement et de façon relativement linéaire au fur et à mesure que le pourcentage de résidus augmente avec un coefficient de corrélation égale à 0,97.

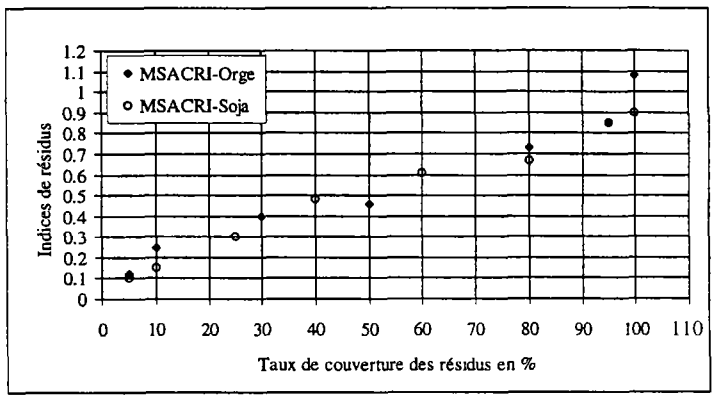


Figure 6. Sensibilité de l'indice MSACRI en fonction de différents taux de couverture des résidus de soja et d'orge

4. Conclusion

Le formalisme qui est considéré dans ce travail, s'inscrit dans un cadre prospectif d'interprétation et d'analyse des données de télédétection relatives à la détection des résidus de cultures. Il a permis de mettre en évidence le pouvoir discriminant du moyen infrarouge (les canaux ETM-5 et ETM-7) pour les sols et les résidus. Les indices NDI et SACRI montrent une sensibilité réduite vis-à-vis de la détection des résidus de cultures. Quant aux indices NDI5-7 et MSACRI, ils présentent une similitude de point de vue sensibilité à la variation du taux de couverture par les résidus. Par contre, le NDI5-7 reste sensible aux propriétés optiques des sols nus sous-jacents, notamment lorsque le sol est sec et de couleur claire et brillante. Le MSACRI montre une assez bonne dynamique, avec des valeurs moyennes voisines de 0,03 pour un très faible taux de couverture et proches de 0,20 pour des résidus couvrants. Afin de résoudre ce problème de saturation, on propose d'introduire une constante multiplicative égale à 5 qui ramènerait les valeurs de MSACRI dans une gamme comparable à celle des indices de végétation, soit une échelle entre 0 et 1.

Finalement, étant donné que les résidus sont souvent peu couvrants, le signal mesuré au capteur intègre la contribution propre du sol nu et celle propre aux résidus eux-mêmes; ainsi on se trouve en présence du problème de mélange des signatures spectrales des sols et des résidus. Pour s'affranchir de cette situation délicate, de multiples voies doivent permettre une meilleure analyse avec des techniques plus souples et mieux adaptées au traitement du signal et de l'image. Parmi ces techniques, celles basées sur la théorie des ensembles flous ou sur la méthode de déconvolution spectrale sont bien adaptées et constituent des avenues très prometteuses. À ce sujet, on compte examiner, dans une prochaine étape, l'apport de la méthode de déconvolution spectrale pour la discrimination entre les sols et les résidus.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada, le fonds FCAR du Québec et le programme de coopération Ontario-Québec pour leur support financier.

6. Références

BANNARI, A., HABOUDANE, D. et BONN, F. 1999. Potentiel des mesures multispectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. Proceedings of the 4th International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition and 21st Canadian Symposium on Remote Sensing, Ottawa, Canada, p. 359-366.

BARET, F. 1986. Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de doctorat, Université de Paris-sud Orsay, n° 98, 182 p.

BARET, F., GUYOT, G., BEGUÉ, A. and MAUREL, P. 1988. Complementarity of Middle-Infrared with Visible and Near-Infrared Reflectance for Monitoring Wheat Canopies. Remote Sensing of Environment, vol. 26, p. 213-225.

BARET, F., GUYOT, G. and MAJOR, D.J. 1989. TSAVI: a vegetation index which minimises soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Canada, p. 1355-1358.

BARET, F. et ANDRIEU, B. 1994. Intérêt du moyen infrarouge réflectif pour caractériser la végétation. Bulletin de la S.F.P.T., n° 136, p. 8-22.

BIARD, F., BANNARI, A. et BONN, F. 1995. SACRI (Soil Adjasted Corn Residue Index): un indice utilisant le proche et le moyen infrarouge pour la détection de résidus de culture de maïs. 17ème Symposium canadien sur la télédétection, Juin 1995, Saskatoon (Saskatchewan), Canada, p. 413-419.

DUMANSKI, J., COOTE, D.R., LUCIUK, G. and LOK, C. 1986. Soil conservation in Canada. Journal of Soils and Water Conservation, p. 204-210.

ELVIDGE, C.D. 1990. Visible and near infrared reflectance characteristcs of dry plant materials. International Journal Remote Sensing, vol. 11, p. 1775-1795.

FREEBAIRN, D.M. and WOCKNER, G.H. 1986. A Study of Soil Erosion on Vertisols of the Eastern Darling Downs, Queensland I : Effects of Surface Conditions on Soil Movement Within Sontour Bay Catchments. Australian Journal of Soil Science, vol. 24, p. 135-158.

GUYOT, G. 1984. Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infrarouge : Application à la télédétection. Bulletin de la S.F.P.T., n° 95, p.

GUYOT, G. et SEGUIN, B. 1988. Possibilités d'utilisation de la télédétection satellitaire en agrométéorologie. Agronomie, vol. 8, n° 1, p. 1-13.

GUYOT, G. 1989.Signatures spectrales des surfaces naturelles. Télédétection satellitaire, vol. 5, Édition Paradigme, CAEN, 165 p.

HABOUDANE, D., BONN, F., BIARD, F., BANNARI, A. et CLICHE, P. 1997. Shortwave Infrared Contribution to the Detection of Crop Residues and Dry Vegetation Over Different Soil Backgrounds. 19e Symposium Canadien sur la télédétection, Ottawa (Ontario), Canada, 24-30 mai, Actes sur CD-ROM, communication n° 195.

HUETE, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295-309.

JACKSON, R.D., PINTER, P.J., PAUL, J., REGINATO, R.J., ROBERT, J. and IDSO, S.B. 1980. Hand-held radiometry. U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration, Agricultural Reviews and Manuals, ARM-W-19, Phoenix, Arizona, U.S.A., 66 p.

KAUTH, R.J. and THOMAS, G.S. 1976. The tasseled cap - a graphic description of the spectral-temporal developement of agricultural corns as seen by Landsat. Proceedings of the 2nd Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, Lafayette, 4B, p. 41-45.

KETCHESON, J.W. and STONEHOUSE, D.P. 1983. Conservation tillage in Ontario. Journal of Soils and Water conservation, vol. 38, p. 253-254.

KING, M.D., KAUFMAN, Y.J., MENZEL, W.P. and TANRÉ, D. 1992. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, n° 1, p. 2-27.

MAJOR, D.J., LARNEY, F.J. and LINDWALL, C.W. 1990. Spectral reflectance characteristics of wheat residues. Proceedings International Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'90), vol. I, p. 603-607.

McNAIRN, H. and PROTZ, R. 1993. Mapping corn Residue cover on Agricultural fields in Oxford County, Ontario, Using Thematic Mapper. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 2, p. 152-159.

MALTHUS, T.J., B. ANDRIEU, F.M. DANSON, K.W. JAGGARD, and M.D. STEVEN. 1993. Candidate High Spectral Resolution Infrared Indices for Crop Cover. Remote Sensing of Environment, vol. 46, p. 204-212.

MULDERS, M.A. and GIRARD, M.C. 1993. Remote Sensing of Soil in Warm Arid and Semi-Arid Lands. Remote Sensing Reviews, vol. 7, p. 341-363.

ROBERTS, P. and D. COLEMAN, D. 1988. A survey of crop residus in soutbwestwern Ontario, 64 p.

ROUSE, J.W., HAAS, R.W., 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, Greenbelt, Maryland, 164 p.

SHIBAYAMA, M. and AKIYAMA, T. 1989. Seasonal Visible, Near-Infrared and Mid-Infrared Spectra of Rice Canopies in Relation to LAI and Above-Ground Dry Phytomass. Remote Sensing of Environment, vol. 27, p. 119-127.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 333-341

33

Détermination d'indices texturaux pour la classification des unités urbaines appliquée à la région est de la ville d'Alger (Algérie)

AICHOUCHE BELHADJ-AISSA, MOSTÉFA BELHADJ-AISSA et YOUCEF SMARA

Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P.32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111, Alger, Algérie; téléphone : 213 2 24 28 02; télécopieur : 213 2 24 28 02; courriel : h.belhadj@mailcity.com

Résumé

L'objectif de cet article est de présenter une méthodologie de génération d'indices texturaux suivie d'une classification dirigée utilisant un sous-ensemble optimal d'images de texture résultantes. La méthodologie proposée permet d'identifier les unités urbaines en fonction de leur signature texturale. Nous nous sommes intéressés à l'extraction de l'information texturale dans le domaine des fréquences spatiales. La production des images de texture est effectuée sur une fenêtre $2^n \times 2^n$. La taille de la fenêtre est choisie en fonction des primitives des textures à classifier. La méthode de sélection d'un sous-ensemble d'images est basée sur le calcul du test de Wilks qui exprime la séparabilité maximale des thèmes par la combinaison des indices texturaux. Dans la procédure de classification, les images d'entrée sont le sous-ensemble optimal d'images indices texturaux. Nous avons testé cette méthodologie sur l'image d'albédo extraite d'une image TM de LANDSAT de 1996 de la région est de la ville d'Alger (Algérie). Les résultats sont des images de texture, les statistiques de Wilks pour chaque sous-ensemble ainsi que des images résultantes de la classification texturale. L'évaluation des résultats de la classification texturale a été effectuée sur la base des échantillons représentatifs des classes de texture prédéfinis.

1. Introduction

L'analyse spatiale regroupe les processus de détection de contours, la segmentation des sous-ensembles d'images présentant des propriétés particulières, la caractérisation, la description et la classification de la texture dans les images numériques. Deux concepts de base caractérisent l'analyse spatiale : le premier consiste à établir les différentes formes de relations entre le pixel et ses voisins immédiats et le deuxième est le comportement de chaque pixel en tant que réalisation aléatoire d'une variable indépendante. Le contexte général de l'analyse spatiale dans cet article est la caractérisation de l'état de surface par l'extraction de l'information texturale dans les images satellitaires, d'une part, et, d'autre part, l'utilisation des signatures de texture des échantillons au sol pour la classification multibande. L'analyse de texture dans les images satellitaires est devenue un thème d'intérêt traité par plusieurs disciplines des sciences de la Terre. Son exploitation nécessite la détermination de règles mathématiques qui décrivent la quantification des différences entre régions texturées. En effet, les méthodes d'analyse, de discrimination et de classification des objets selon leur texture peuvent être regroupées en deux approches essentielles : une approche statistique dans laquelle la texture est décrite par l'intensité d'un pixel et les caractéristiques statistiques de variation de cette intensité dans un voisinage optimal et une approche structurale qui, elle, est basée sur la répartition de primitives de texture, de leur organisation spatiale propre et des relations spatiales entre elles (BELHADJ-AISSA, 1998; KOURGLI et BELHADJ-AISSA, 1997). La mise en œuvre de cette dernière méthode nécessite la localisation des primitives de texture, l'extraction des paramètres qui caractérisent les primitives et l'extraction des paramètres qui caractérisent les relations de dispositions des primitives de cette texture. La méthode que nous avons développée est la discrimination des différentes textures par les paramètres de statistiques locales dans le domaine fréquentiel par la transformée de Fourier. Les paramètres ainsi obtenus sont utilisés dans la classification multibande.

2 Méthodologie proposée

Dans les méthodes classiques d'analyse de la texture par les matrices de co-occurrences, les unités de texture, les matrices des iso-segments, etc., on utilise comme information de base la radiométrie des pixels dans un voisinage prédéfini (BELHADJ-AISSA, 1998). Dans cette méthode, l'information traitée correspond aux fréquences spatiales dans la transformée de Fourier. Cette méthode a été utilisée pour la classification de texture dans les images bruitées telles que les images radar (LIU and JERNIGAN, 1990; MCLEAN, 1993). Ainsi, l'ensemble des paramètres, décrivant les propriétés texturales est déterminé dans l'espace fréquentiel. Cependant, la première étape du processus d'analyse est le calcul de la transformée de Fourier avec optimisation du temps de calcul. Le calcul des paramètres texturaux, évalués sur des fenêtres de tailles variables permet une interprétation qualitative de la texture des unités prédominantes dans une image. L'évaluation quantitative de la texture de ces unités est effectuée par la classification multibande en utilisant les paramètres calculés précédemment. Deux contraintes essentielles se posent : la première est le choix de l'image à analyser pour déduire les paramètres de texture parmi les six canaux, s'il s'agit d'une image extraite d'une image TM de Landsat, la deuxième est le choix du sous-ensemble de paramètres à combiner dans la procédure de classification. La méthodologie proposée et développée est décrite à la figure 1.

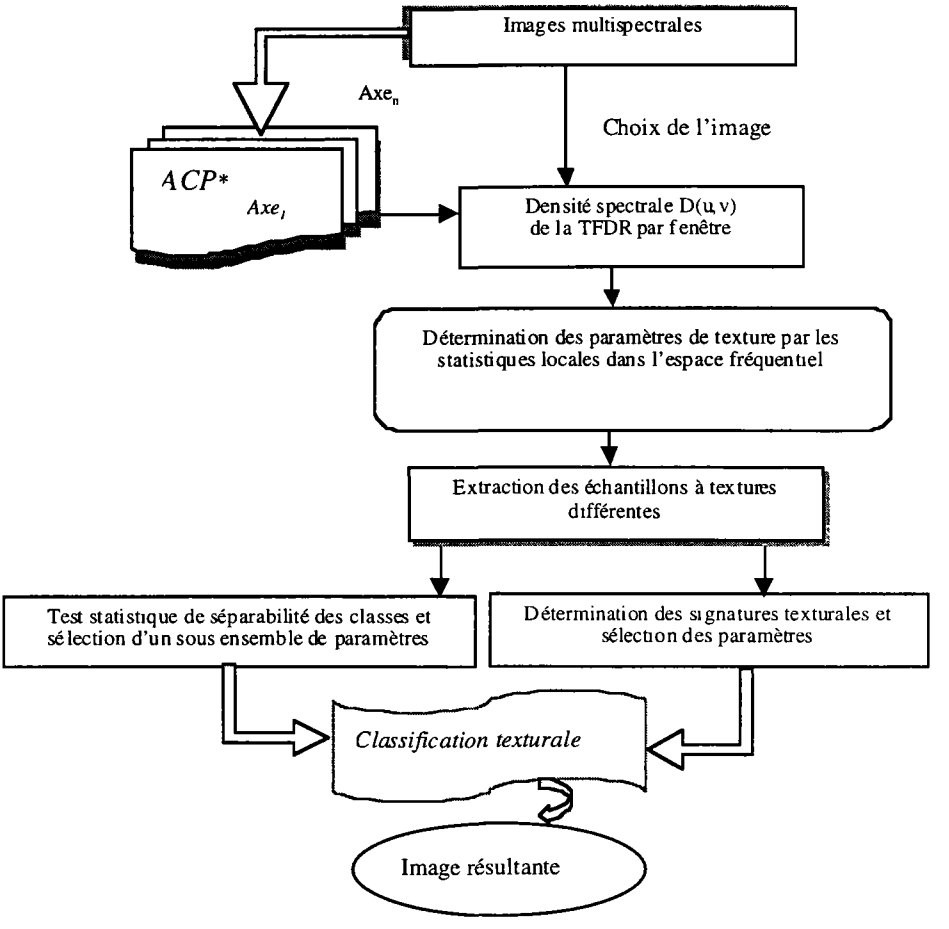
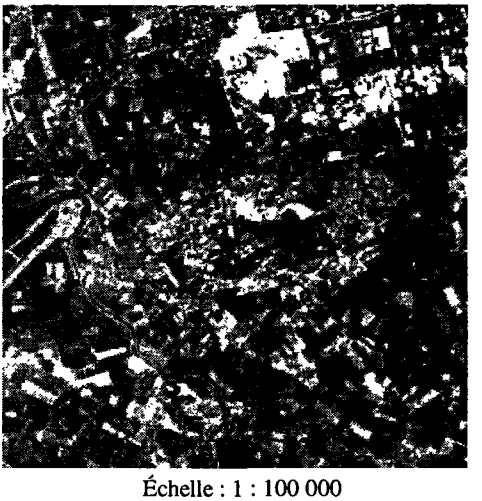


Figure 1. Organigramme méthodologique.

2.1. Région d'étude et données satellitaires

La région d'étude sélectionnée est située à l'est de la capitale, Alger. Elle est caractérisée par une diversité d'états de surface et de rugosités de nature très différentes à savoir la mer, le littoral, l'urbain et les zones agricoles de la Mitidja. Il est donc intéressant d'analyser ces différents types d'état de surface à partir de l'imagerie satellitaire. Les images utilisées sont extraites de l'image TM de Landsat du 17-05-1996.

L'analyse et la discrimination de la texture sont effectuées sur une seule image en entrée. Les résultats de ces opérations sont conditionnés, entre autres par le choix de cette image. Pour cette raison, nous avons effectué une analyse en composantes principales en intégrant les six canaux spectraux et nous avons utilisé le 1er axe de l'ACP (figure 2). En outre, la texture est une propriété qui n'est caractérisée que sur un voisinage approprié de l'objet. Un compromis doit être fait entre la taille du voisinage et la conservation d'une unité texturale significative. Plusieurs tests sur des échantillons ont été effectués en analysant les valeurs des paramètres pour des tailles de voisinage 4 x 4, 8 x 8 et 16 x 16. Pour la méthode



Échelle : 1 : 100 000

Figure 2. Premier axe (albédo) obtenu par l'analyse en composantes principales. L'image initiale de test est une fenêtre de 512 x 512 pixels, mais vu le nombre de pages limité nous avons représenté dans le document qu'une fenêtre de 256 x 256 pixels.

développée qui passe par la transformée de Fourier, la taille du voisinage est de la forme (2^n x 2^n), afin d'optimiser l'algorithme de la transformée de Fourier discrète rapide (TFDR) (BELHADJ-AISSA,1998).

2.2. Densité spectrale

Les informations de discrimination des thèmes peuvent être obtenues à partir du spectre de puissance en termes d'indicateurs de régularité, de directivité, de linéarité et de granularité. Le spectre de puissance est calculé à partir de la transformée de Fourier, soit $F\{I(x,y)\}$ la transformée de Fourier discrète bidimentionnelle d'une matrice image (fenêtre image) telle que :

$$f(u,v)=\sum_{x=0}^{m-1}\sum_{y=0}^{n-1} I(x,y)e^{-2j\pi(\frac{ux}{m}+\frac{vy}{n})} \quad \text{avec} \quad I(x,y)=\begin{bmatrix} I(0,0) & \cdots & I(0,n-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I(m-1,0) & \cdots & I(m-1,n-1) \end{bmatrix}$$

où I(x,y) sont les niveaux de gris de la fenêtre d'analyse.

On définit le spectre de puissance par : $P(u,v)=f(u,v).f^*(u,v)=|f(u,v)|^2$
où $f^*(u,v)$ est le conjugué; (u,v) sont les fréquences spatiales.

La densité spectrale est donnée par : $D(u,v)=\dfrac{P(u,v)}{\sum_{u,v\neq 0} p(u,v)}$

2.3. Génération des paramètres de texture

Une texture faible pour laquelle on ne détecte que très peu de variations significatives des niveaux de gris des pixels présente un spectre de puissance caractérisé par de fortes amplitudes dans le domaine des basses fréquences. Par contre, pour une texture importante

ou granuleuse dans laquelle les variations des niveaux de gris sont accentuées et rapprochées, le spectre de puissance présente de fortes amplitudes dans le domaine des hautes fréquences. Cependant, plusieurs paramètres texturaux ont été définis utilisant les spectres de puissance et de phase pour mettre en évidence des primitives particulières dans une texture donnée. Les descripteurs de texture que nous avons intégrés dans ce processus d'analyse de texture ont été proposés initialement par D'ASTOUS et JERNIGAN (1984) et repris par LIU et JERNIGAN (1990). Nous donnons les formalismes de quelques paramètres à savoir l'énergie du pic principal : $P_1 = D(u_1, v_1) \times 100$ où u_1, v_1 sont les coordonnées de fréquences de la pointe principale de la densité spectrale. Ce paramètre permet de mettre en évidence l'énergie maximum de la fenêtre d'analyse, le Laplacien discret du pic principal :

$$P_2 = \nabla^2 D(u_1, v_1) = D(u_1 + 1, v_1) + D(u_1 - 1, v_1) + D(u_1, v_1 + 1) + D(u_1, v_1 - 1) - 4D(u_1, v_1).$$

Ce paramètre met en évidence les transitions.

L'isotropie de la densité spectrale : $P_3 = \dfrac{|\sigma_u - \sigma_v|}{[(\sigma_u - \sigma_v)^2 - 4\sigma_{uv}^2]^{1/2}}$

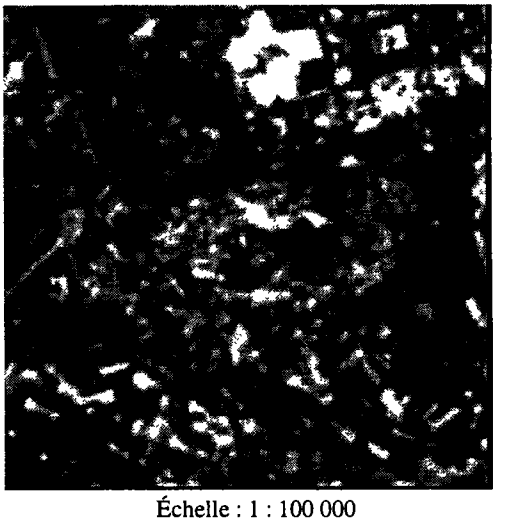
où $\sigma_u = \sum_u \sum_v u^2 D(u,v)$, $\sigma_v = \sum_u \sum_v v^2 D(u,v)$, $\sigma_{uv} + \sum_u \sum_v uvD(u,v)$.

Ce paramètre mesure l'allongement du spectre, il est maximum pour des textures de lignes parallèles.

Les formalismes des autres paramètres sont donnés dans l'interface du logiciel que nous avons développé. Nous donnons les images résultantes où les niveaux de gris expriment une propriété de texture de l'image. Les figures 3, 4, 5 sont, respectivement les résultats des paramètres : énergie du pic principal, carré de la fréquence du pic principal et moment d'inertie du premier quadrant. Ces paramètres sont calculés, après plusieurs tests, sur une fenêtre de taille 8 x 8, glissante par pas de 1 en ligne et en colonne. L'interprétation visuelle

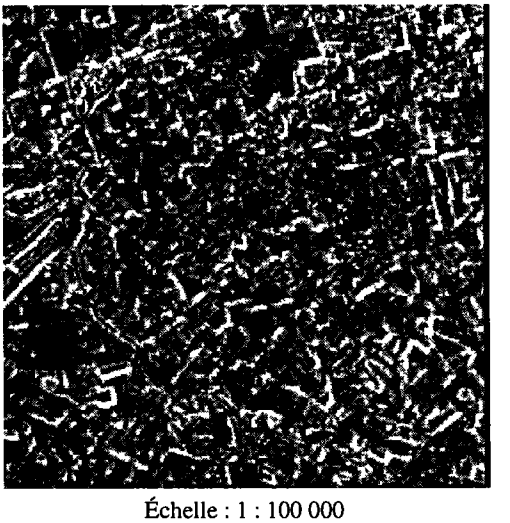
Échelle : 1 : 100 000

Figure 3. Paramètre 1 : énergie du pic principal



Échelle : 1 : 100 000

Figure 4. Paramètre 5 : carré de la fréquence du pic principal



Échelle : 1 : 100 000

Figure 5. Paramètre 17 : moment d'inertie du premier cadran

de ces images conduit aux conclusions suivantes : pour les zones peu texturées, la valeur radiométrique du deuxième paramètre est plus importante que dans les zones à microtexture contrairement au troisième paramètre où toutes les zones à microtexture sont rehaussées.

2.4. Sélection optimale des paramètres de texture

L'apport de l'analyse de texture à la caractérisation des états de surface s'introduit par l'exploitation des différentes propriétés de texture évaluées par différents descripteurs texturaux. Cette exploitation se base sur la sélection et l'utilisation de ces descripteurs dans

les processus de classification. Pour le travail que nous présentons dans cette communication nous avons procédé à la sélection par deux méthodes.

La première est la sélection par les signatures de texture. Pour cela, nous avons extrait 10 échantillons qui représentent des objets différemment texturés (figure 6) de taille 32 x 32 pixels à partir de l'image du premier axe de l'ACP. Nous avons calculé 20 paramètres pour chaque échantillon (BELHADJ-AISSA, 1998). Ensuite, nous avons tracé des signatures de texture pour les différents paramètres en fonction des échantillons. Les paramètres retenus pour la classification sont ceux qui discriminent le maximum d'échantillons correspondant aux 10 classes choisies. Un exemple de signatures texturales est donné sur la figure 7. Nous constatons que les réponses du paramètre 17 pour les 10 échantillons sont différentes. Nous notons que la discrimination des textures par ces statistiques locales diffère d'une région à une autre. Il ne s'agit pas d'une règle générale, mais à chaque zone d'étude, pour une application donnée, l'utilisateur doit trouver les paramètres discriminants les plus appropriés.

La deuxième étape consiste en la sélection des paramètres par la séparabilité des classes. Si la sélection des paramètres par les signatures texturales se base sur l'observation des réponses de chaque paramètre pour différentes classes, dans cette procédure, la sélection se fait pour un sous-ensemble de paramètres qui donne, dans un espace de représentation à p dimensions une bonne séparabilité des classes choisies, où p est égal au nombre de paramètres du sous-ensemble. Ce critère est quantifié par la statistique de Wilks (LIU and JERNIGAN, 1990). Cette statistique est définie par le rapport des déterminants de la matrice intra-classes Σ_w et la matrice de dispersion totale Σ_T qui est donnée par la somme de : $\Sigma_w + \Sigma_B$ (matrice inter- classes). Soit S_k le critère de Wilks $S_k = \frac{|\Sigma_w|}{|\Sigma_T|}$; une petite valeur S_k correspond à un sous-ensemble de paramètres donnant une meilleure discrimination des classes. Les matrices intra, inter et totale des classes sont estimées à partir des échantillons. Les valeurs de S_k pour quelques combinaisons sont données sur le tableau 1 où la troisième combinaison est la plus optimale. Notons que le nombre d'images à combiner est supérieur ou égal à 3 (de 3 au nombre maximal de paramètres calculés).

2.5. Classification texturale

La classification d'images est envisagée comme une procédure de décomposition en région sur la base d'une ressemblance des propriétés texturales. Pour cela, nous avons utilisé, comme données d'entrée, le sous ensemble de paramètres texturaux sélectionnés

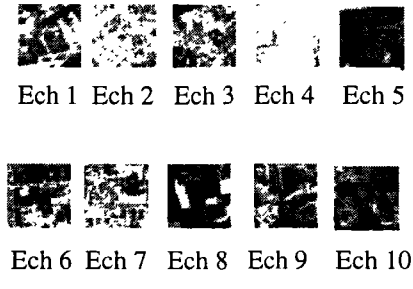


Figure 6. Les 10 échantillons les plus représentatifs des classes. La localisation a été guidée par les photographies aériennes au 1 : 20 000 de 1997.

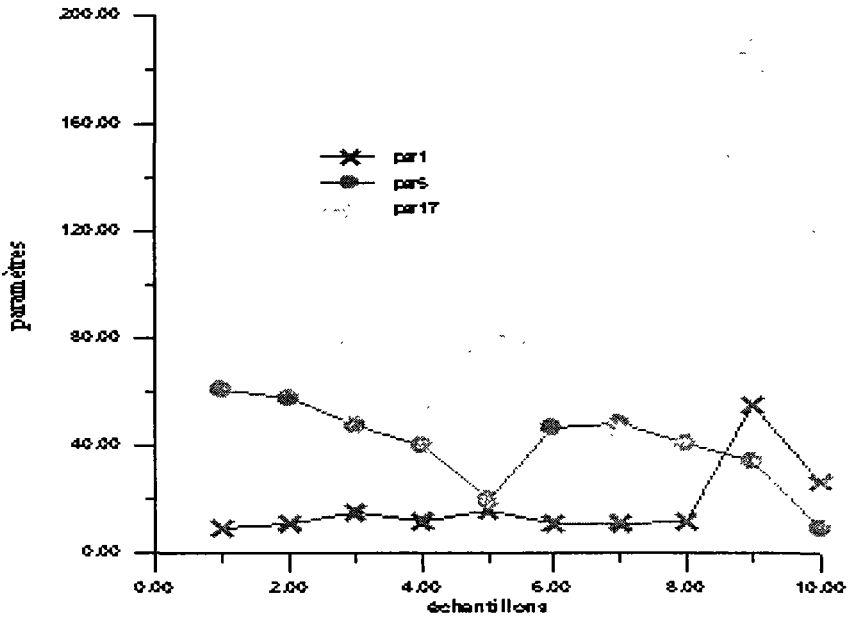


Figure 7. Signature de texture donnée pour les 10 échantillons par les paramètres 1, 5 et 17. Le paramètre 17 donne les valeurs les plus différentes pour chaque échantillon. En effet, c'est le paramètre le plus approprié à la discrimination et la classification des textures pour cette zone d'étude.

précédemment. L'extraction des échantillons se fait de manière interactive. Avant la procédure de classification, les images de texture sont normalisées pour donner aux paramètres la même probabilité de discrimination des classes. La nouvelle valeur radiométrique de chaque pixel de l'image paramètre est donnée par :

$$I'(x,y) = \frac{((I(x,y) - \bar{I})}{S} \quad \text{où} \quad \bar{I} = \frac{1}{NxM} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x,y) \quad \text{et} \quad S = \left[\frac{1}{(NxM-1)} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x,y) - \bar{I}) \right]^{\frac{1}{2}}$$

avec M x N comme dimension des images.

La règle de décision de la classification multibande que nous avons adoptée est celle de minimum de distance. L'algorithme consiste à affecter le pixel $\bar{I}(x,y) = \left[I_1'(x,y), I_2'(x,y), I_1'(x,y), \ldots I_p'(x,y) \right]^T$ à la classe la plus proche selon la distance euclidienne par rapport au centre de gravité de la classe nous donnons sur la figure 33-8 (voir cahier couleur), l'image résultante de la classification dirigée avec 10 classes. Nous constatons que les thèmes prédominants à textures différentes sont rehaussés à savoir le tissu urbain à forte densité (bleu foncé), à faible densité (bleu clair) et les parcelles cultivées en vert.

Tableau 1. Les S_k pour les combinaisons suivantes : S-E (p9, p13, p5), S-E (p11, p10, p16), S-E (p12, p14, p15), S-E (p11, p16, p12).

Sous-ensemble.	Sk	Évaluation
p9, p13, p5	123,5	*****
p11,p10,p16	13,21	*****
p12,p14,p15	9,54	Optimal
p11, p16, p12	18,38	****

3. Conclusion

L'objectif de cet article était la définition et la mise en œuvre d'une méthodologie d'analyse et de caractérisation des états de surface à partir des attributs texturaux dérivés dans l'espace fréquentiel des images satellitaires. Dans ce sens, nous avons réalisé un logiciel qui offre à l'utilisateur un moyen d'effectuer toutes les étapes décrites dans la méthodologie. Les premiers résultats obtenus sur la région d'étude sont en cours de validation par rapport à des données de terrain. Parallèlement, une étude géomorphodynamique de la côte et d'occupation des sols environnants se basant sur l'analyse de structures est en cours en utilisant des images multidates, des photographies aériennes et des relevés de terrain.

4. Références

BELHADJ-AISSA, A. 1998. Contribution au Logiciel d'Analyse et de Traitement d'Images Satellitaires (L.A.T.I.S.), analyse spatiale-spectrale d'images satellitaires appliquée à la cartographie thématique. Thèse de doctorat d'état, Université des sciences et de la technologie Houari Boumédienne, Alger.

D'ASTOUS, D. and JERNIGAN, M. E. 1984. Texture discriminate based on detailed measures of the power spectrum. 7th Int. Conf. Pattern Recognition, Montréal, Jul. 30- Aug. 2, p. 83-86.

KOURGLI A. et BELHADJ-AISSA, A. 1997 :Approche structurale de génération d'images de texture. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n° 17, p. 3611- 3627.

LIU S. S. and JERNIGAN, M. E.1990. Texture analysis and discrimination in additive noise. Computer Vision Graphics and Image Processing, vol. 49, p. 52-67.

MCLEAN G.F, 1993 : Vector quantization for texture classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 23, n° 3, p. 637-649.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 343-348

34

Méthodes de visualisation multivariée et multidate de données spectrales pour la caractérisation des surfaces agricoles

CHRISTIAN BLUMER et RÉGIS CALOZ

Système d'information à référence spatiale, Département du génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse; téléphone : (+41 21) 693 57 85; télécopieur : (+41 21) 693 57 90; courriel : christian.blumer@epfl.ch; regis.caloz@epfl.ch

Résumé

La protection des sols contre l'érosion en région tempérée requiert un suivi de son couvert végétal tant saisonnier que pluri-annuel. Dans ce cadre, une étude multivariée et multidate est réalisée à l'aide d'images TM de Landsat dans le but de faire le suivi de l'indice de protection des sols (facteur cultural C). Une méthode de classification interprétative d'images satellitaires par une approche monodate, permettant de se passer d'informations de réalité de terrain est proposée. Elle est basée sur la représentation de l'espace des attributs en deux dimensions construit par un histogramme bivarié du TSAVI et de la bande TM5. Un tel diagramme est complété par l'introduction d'informations de couleurs directement issues de l'image. Ces modes de visualisation constituent une base de décision précieuse pour la catégorisation en fonction de trois groupes de cultures principales : prairies, céréales et cultures sarclées. L'observation de cette base de décision pour différentes dates de juin à septembre a donné la possibilité de traduire l'évolution temporelle des caractéristiques spectrales sous l'effet des facteurs phénologiques et humains. Elle a, par ailleurs, permis de réaliser une classification satisfaisante avec une qualité globale de 80 à 90 % selon l'année. Ces différentes méthodes de visualisation de données multivariées et multidates se sont révélées en fin de compte être une base d'interprétation efficace pour la séparation des différents types de culture.

1. Introduction

La gestion des ressources agricoles et, en particulier, leur protection contre les phénomènes d'érosion nécessitent, en Europe, le suivi de l'évolution autant saisonnière que pluri-annuelle du couvert végétal. Dans ce cadre, les systèmes de télédétection actuels fournissent une information pertinente en raison de leur étendue spatiale et de leur répétitivité temporelle. Cette information nécessite toutefois d'être transformée, associée avec d'autres et comparée avec des données de réalité de terrain avant d'être exploitable. Dans la mesure où la disponibilité de telles données de réalité de terrain nuit fortement au caractère opérationnel de l'information satellitaire, une méthode de classification interprétative d'image permettant de se passer de cette information est proposée. Elle est basée sur différents modes de visualisation multivariée et multidate des données spectrales.

Cette méthode de classification s'insère dans l'étude du suivi de l'indice de la protection du sol par la végétation (facteur cultural C) qui requiert la connaissance de la répartition des groupes de culture principale : les prairies, les céréales et les cultures sarclées, et de leur succession sur plusieurs années. Pour satisfaire cet objectif, il est nécessaire de suivre une démarche multidate par la combinaison d'images satellitaires de différentes années. Dans ce contexte, la disponibilité d'images de qualité devient un point critique et influence grandement la méthodologie à mettre en œuvre.

Le concept de la méthode de classification et différents exemples de résultats obtenus avec des données TM de Landsat sont décrits plus en détails par la suite. Lors de cette recherche, deux approches ont été étudiées en fonction du nombre d'images satellitaires disponibles pendant une année. Ici, seule l'approche monodate, prenant en compte une image par année, est décrite. Elle apporte néanmoins des résultats intéressants quant à l'interprétation de la réponse spectrale de la végétation.

2. Concept et méthode

La méthode d'interprétation préconisée consiste en la mise au point d'une base de décision pouvant être facilement interprétée par l'analyste et permettant une discrimination suffisante des groupes de culture à identifier. Cette notion de base de décision est très importante car elle permet de faire le lien entre l'information spectrale (les attributs de l'image) et les classes thématiques que l'on cherche à déterminer par interprétation directe sans nécessiter une information de terrain. Une telle approche a déjà été utilisée dans le cadre du projet MARS (*Monitoring Agriculture with Remote Sensing*) (MEYER-ROUX and VOSSEN, 1993).

2.1. Constitution de la base de décision

La base de décision a pour but de permettre la visualisation des classes spectrales en vue de leur catégorisation. Une représentation souvent utilisée est l'histogramme bivarié (ou scattérogramme) des attributs de l'image. Il s'agit d'une réorganisation de l'information spectrale initiale dans l'espace des attributs indépendante de la référence spatiale.

La base de décision choisie est construite selon ce modèle avec comme dimensions les deux attributs suivants : un indice de végétation, le TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*), et la bande spectrale du proche infrarouge (TM5). On parle ici de base

de décision dans la mesure où elle sert à guider la catégorisation des classes spectrales.

Le premier attribut utilisé correspond à l'indice de végétation développé par BARET *et al.* (1989) et dérivé du SAVI (HUETE, 1988). Il se base sur la détermination de la droite des sols à partir des bandes TM3 et TM4, et permet une bonne évaluation de la biomasse active et de la couverture du sol tout en minimisant l'influence du sol. L'intérêt du TSAVI est d'être plus adapté par rapport à d'autres indices de végétation, comme le NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) ou le PVI (*Perpendicular Vegetation Index*), pour le suivi du taux de couverture du sol des différents types de cultures au cours de l'année (BARET and GUYOT, 1991; CYR *et al.*, 1995).

Le TSAVI est déterminé à l'aide des paramètres a et b de la droite des sols ($y = a*x+b$) par la relation suivante : $TSAVI = a*(nir - a*r - b)/[a*nir + r - a*b+0,08*(1 + a^2)]$ où r et nir sont les bandes non calibrées TM3 et TM4 respectivement. Pour une utilisation aisée dans les calculs, le TSAVI est réajusté par l'équation : $TSAVI' = 100*TSAVI+100$.

Le second attribut utilisé permet d'ajouter une information spectrale supplémentaire de l'infrarouge moyen qui, théoriquement, a le potentiel d'augmenter l'effet discriminant par rapport à celui obtenu avec l'utilisation du TSAVI seul. Dans ces bandes spectrales, la teneur en eau de la végétation a un effet dominant sur la réponse spectrale par rapport aux propriétés optiques de la végétation ou à sa biomasse (BAUER *et al.*, 1981). L'infrarouge moyen est en effet inversement corrélé avec la teneur en eau de la végétation. Différentes études ont confirmé son effet discriminant sur les formations végétales (BARET *et al.*, 1988; ANDRIEU et BARET, 1991).

2.2. Approche monodate

Pour les années où l'on ne dispose que d'une image dans l'année, la base de décision est formée par l'histogramme bivarié entre le TSAVI et la bande TM5 (figure 34-1a) (voir cahier couleur).

Deux techniques sont alors utilisées pour augmenter le contenu en information de ce diagramme en introduisant une information de couleurs. La première consiste à réaliser une classification non dirigée sur les attributs et en fonction d'un nombre de classes arbitraires (ici 255 classes). Chaque classe est alors représentée par une couleur issue de la combinaison RVB (rouge, vert, bleu) de leur valeur moyenne dans les bandes TM4, TM5 et TM3, respectivement. Ces classes sont ensuite transférées dans le diagramme précédent pour obtenir un histogramme bivarié thématique (figure 34-1b) (voir cahier couleur). On a donc, par l'intermédiaire des couleurs, une relation directe entre l'image composite TM4, TM5, et TM3 et l'espace des attributs.

La deuxième technique est similaire à la précédente mais diffère dans la mesure où l'on considère autant de classes qu'il y a de points dans le diagramme (figure 34-1c) (voir cahier couleur). Le codage des couleurs reste par contre le même.

3. Données et résultats

3.1. Données

L'étude a été faite sur la région agricole du plateau vaudois en Suisse à l'aide d'une série d'images TM acquises pendant les mois d'été : le 7 et le 30 juillet 1984, le 26 juillet et le 12 septembre 1985, le 6 septembre1986, le 5 août 1992 et le 4 août 1994 (figure 2). Un

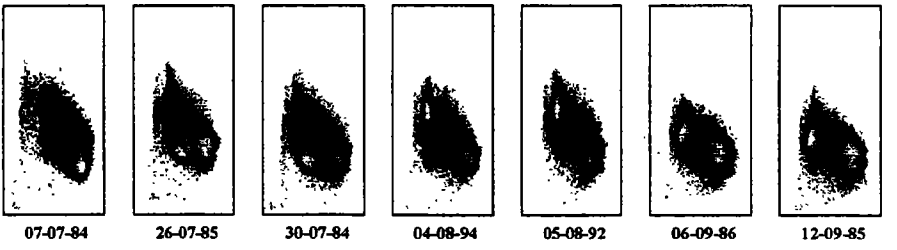


Figure 2. Évolution temporelle des histogrammes bivariés pendant la période d'été

modèle numérique d'altitude (MNA) avec une grille de 25 m et des cartes topographiques numériques au 1 : 25 000, datant de 1993 et 1997, sont utilisées. Un masque des zones urbaines et forestières est extrait sur la base des cartes géograpniques afin d'écarter ces zones pendant la procédure d'analyse. Quelques données de réalité de terrain concernant les types de culture sont disponibles pour les années 1992 et 1994 et serviront pour une validation sommaire des résultats.

Le site d'étude, d'une surface de 75 km^2 environ, est à vocation principalement agricole mais possède de nombreux îlots forestiers (17,6 % de superficie) et urbains (5,5 % de superficie). Le relief est fortement ondulé en raison d'un réseau hydrographique dense et de la présence de chaînes de montagnes bordant la région. Les processus de ruissellement ne sont pas un problème majeur, mais sont seulement spécifiques à certaines configurations du terrain et sont, de plus, sujets à une large variabilité spatiale et temporelle.

3.2. Visualisation monodate

La construction des bases de décision pour différentes périodes de l'année a permis d'observer l'évolution des caractéristiques spectrales de la végétation pendant la période estivale. Cette évolution est fortement liée à l'état de la végétation mais elle inclut aussi des facteurs humains comme les récoltes ou la pratique des intercultures. Une tendance moyenne de l'évolution des caractéristiques spectrales des groupes de végétation, suivant les facteurs phénologiques et humains, en a été déduite et est représentée schématiquement sur la figure 3.

Sur cette figure, on remarque la stabilité des prairies et des cultures sarclées pendant la période considérée, où seule la pratique des récoltes modifie grandement leur réponse spectrale. Par contre, en ce qui concerne les céréales, elles ont la particularité d'évoluer graduellement à partir d'un état proche des cultures sarclées jusqu'à un autre état similaire à celui des sols nus. Cette évolution peut toutefois aboutir à un état proche de celui des prairies si une interculture a été semée entre-temps.

4. Discussion

Il découle de ces observations que la capacité de discrimination des groupes de cultures par la base de décision TSAVI/TM5 varie au cours de l'année en fonction des facteurs environnementaux (état de la végétation) et humains. De plus, il apparaît être difficile de tenir compte des facteurs humains au moment de la phase de discrimination car ils ne peuvent pas être séparés avec certitude des facteurs phénologiques. Pour une date donnée,

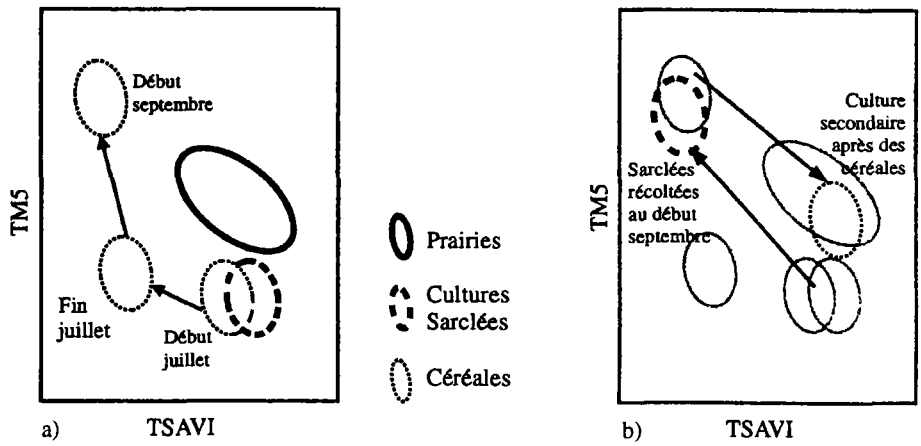


Figure 3. Tendance moyenne de l'évolution des caractéristiques spectrales des trois groupes de cultures (prairies, céréales et cultures sarclées) en fonction des facteurs a) phénologiques, b) humains

cette base de décision permet une bonne discrimination des groupes de céréales, alors que les prairies et les cultures sarclées possèdent une proximité spectrale plus importante. Dans certains cas, il peut être difficile de les séparer.

4.1. Possibilités de classification

À partir des observations précédentes, une procédure de classification est réalisée dans le but d'obtenir un zonage des groupes de cultures principales. Elle consiste en une méthode de partition de l'espace des attributs selon les trois catégories de cultures où la définition des limites résulte de l'interprétation de la réponse spectrale de certaines parcelles agricoles significatives par l'opérateur. Une phase de postclassification est ensuite appliquée afin de reclasser les pixels se trouvant sur les limites des trois catégories par une relation de proximité contextuelle.

Les résultats de la classification pour les années 1992 et 1994 sont donnés sur la figure 34-4 (voir cahier couleur). La confrontation de ces résultats avec les données de réalité de terrain a montré que la qualité globale de la classification des trois groupes de culture est de 91 % et de 83 % pour les deux années respectivement. En regard du nombre réduit d'informations ancillaires utilisées et de la rapidité de réalisation de la classification, ces résultats sont considérés comme largement satisfaisants.

5. Conclusion

Les méthodes de visualisation mises en place lors de cette recherche ont permis de traduire l'information spectrale caractéristique de la végétation dans un espace des attributs à deux dimensions construit par un histogramme bivarié du TSAVI et de la bande TM5. Un tel diagramme, complété par une information de couleurs issue directement de l'image s'est révélé être un élément précieux pour la mise en place d'une méthode interprétative de

classification d'image . Il constitue, d'une part, une référence pour l'interprétation des groupes de cultures principales et, d'autre part, une base de discrimination fiable. Une classification par partition de l'espace des attributs a fourni des résultats très satisfaisants malgré le manque d'information de terrain disponible. Bien que l'approche monodate décrite ici ne permet pas de tenir compte de l'effet des facteurs humains sur l'évolution phénologique de la végétation, elle offre la possibilité de traiter rapidement un grand nombre d'image, ce qui est nécessaire pour réaliser un suivi temporel du couvert végétal..

6. Remerciements

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du projet européen FLOODGEN financé par le CEO sous le contrat ENV4-CT96-0386 et avec l'aide de L'Office fédéral suisse de l'éducation et de la science.

7. Références

ANDRIEU, B. et BARET, F. 1991. Étude par simulation de la sensibilité d'indices de végétation utilisant le moyen infrarouge. 5th International Colloquium, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, p. 597-600.

BARET, F. and GUYOT, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environement, vol. 35, n° 1, p. 161-173.

BARET, F., GUYOT, G., BEGUE, A., MAUREL, P. and PODAIRE, A. 1988. Complementarity of Middle-infrared with visible and near-infrared reflectance for monitoring wheat canopies. Remote Sensing of Environment, vol. 26, n° 3, p. 213-225.

BARET, F., GUYOT, G. and MAJOR, D. 1989. TSAVI : a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. 12th Canadian symposium on remote sensing and IGARSS 89, Vancouver, Canada, p. 1355-1358.

BAUER, M. E., DAUGHTRY, C. S. T. and VANDERBILT, V. C. 1981. Spectral-agronomic relationship of maize, soybean and wheat canopies. Signatures spectrales d'objets en télédétection, Colloque international, Avignon, France, p. 261-272.

CYR, L., BONN, F. and PESANT, A. 1995. Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. Ecological Modelling, vol. 79, n° 2-3, p. 277-285.

HUETE, A. R. 1988. Soil adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, n° 3, p. 295-309.

MEYER-ROUX, J. and VOSSEN, P. 1993. The first phase of the MARS project, 88-93: overview, methods and results. Proceedings of the Third Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, Belgirate, Italy, 17-18 November 1993, p. 33-81.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 349-355

35

Signatures spectrales et dégradation du couvert de forêt dense humide de Côte d'Ivoire

CYRILLE CHATELAIN, RODOLPHE SPICHIGER et LAURENT GAUTIER

Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève, C.P. 60, 1292 Chambésy, Suisse; téléphone: + 41 (22) 4185100; télécopieur : + 41 (22) 418 51 01; courriel : chatelain@cjb.unige.ch

Résumé

Afin de définir les limites de l'interprétation des images TM de Landsat et de mieux décrire l'hétérogénéité des forêts, nous avons étudié les corrélations directes entre les nombres digitaux des images et les descripteurs classiques de la végétation, comme la biomasse ligneuse ou l'aire basale. Ces corrélations ne sont pas significatives en zone de forêts tropicales; par contre les mesures de recouvrement du couvert végétal montrent une corrélation bien plus élevée. Les cartes quantitatives de la végétation que l'on peut obtenir par modélisation n'apportent, d'après cette étude, pas plus d'informations que les cartes issues d'une classification dirigée.

1. Introduction

Il est admis qu'il existe une relation entre le type de végétation et la radiance (TUCKER, 1979; SADER *et al.*, 1989; PUKKALA *et al.*, 1992; GEMMELL, 1995). Cette relation est influencée par les paramètres physiques et structuraux de la végétation (GUYOT *et al.*, 1989). Parmi ces paramètres, l'ombrage provoqué par l'hétérogénéité du couvert végétal des forêts dégradées influence considérablement la valeur des signatures spectrales et

mène à des erreurs d'interprétation et de classification. Par cette étude (CHATELAIN, 1996), nous voulons voir s'il est possible de corriger sur les images cette erreur d'interprétation par une valeur issue de la mesure de l'hétérogénéité du couvert. Finalement, nous avons testé la possibilité de réaliser des cartes quantitatives de la végétation, afin de fournir un outil pour l'évaluation de la dégradation du couvert forestier (CHATELAIN *et al.*, 1996) nécessaire à une meilleure maîtrise du milieu.

2. Matériel et méthodes

Cette étude a été réalisée dans le sud de la Côte d'Ivoire sur la base d'une image TM de Landsat (WRS : P. 196/R. 56) du 24 janvier 1990. Deux zones de 50 x 30 km ont été sélectionnées: une zone se situe dans le domaine des forêts denses humides sempervirentes de la région de Yapo, l'autre est localisée dans le domaine des forêts denses humides semi-décidues de la région de Divo. Dans chaque zone la forêt naturelle couvre moins de 40 % de la surface totale, le reste étant composé de cultures pérennes (café, cacao et palmier à huile), de cultures vivrières, de jachères et de forêts secondaires.

Ce travail met en relation les données de 29 relevés linéaires de 200 m de longueur (GAUTIER *et al.*, 1994) accompagnés de mesures de la biomasse ligneuse des plantes de plus de 2 m de hauteur sur des parcelles de 1600 m^2 et les nombres digitaux moyens des pixels des canaux infrarouges 4, 5 et 7 de l'image situés au niveau des sites de relevés. Les paramètres utilisés comme variables quantitatives de la végétation sont issus de trois types de données :

a) les données de répartition des points supérieurs de contacts le long de la ligne de relevé (figure 1) qui expriment la forme de la canopée et qui influencent la quantité d'ombrage; nous avons extrait de ces données la longueur de la ligne reliant tous les points, la pente moyenne de cette ligne, le nombre de points supérieurs à 22 m de hauteur qui représente le degré de fermeture de la canopée, ainsi que le nombre et la taille des segments composés par la suite de ces points;

b) les pourcentages de recouvrement des strates entre 0-2 m, 2-4 m, 4-8 m, 8-16 m et supérieur à 32 m, qui approximent la densité de la masse foliaire; un indice d'hétérogénéité a été calculé selon la formule modifiée de HIERNAUX (1975), celle-ci prend en compte la somme des différences de recouvrement de chaque strate calculée par intervalles horizontaux de 20 m de longueur;

c) les données structurales issues de relevés de surfaces ont permis d'évaluer le nombre de tiges/ha de plus de 2 m de hauteur, l'aire basale/ha et la biomasse/ha.

Il est nécessaire de rappeler que ces relevés contiennent également des données floristiques non traitées ici et que la canopée de ces forêts est composée d'au moins une

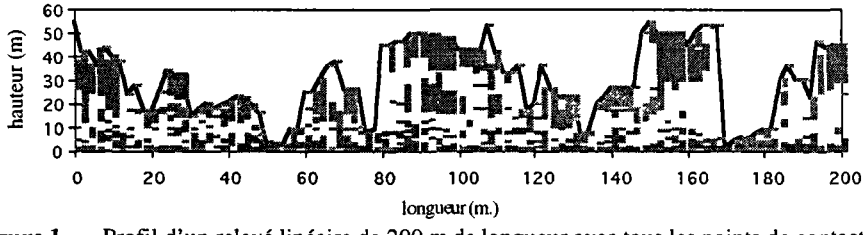


Figure 1. Profil d'un relevé linéaire de 200 m de longueur avec tous les points de contacts avec la végétation. La courbe relie les points supérieurs de contacts et représente la forme de la canopée.

centaine d'espèces différentes. Il n'est donc pas possible d'évaluer l'influence de la structure fine ou de la couleur du feuillage comme c'est souvent le cas en zone tempérée.

Dans un premier temps il a été nécessaire d'identifier des descripteurs de la végétation qui permettent de caractériser, d'une part, le type de végétation et, d'autre part, son état de dégradation. Pour cela, nous avons réalisé une ordination des relevés par la méthode d'analyse en composantes principales. Puis, nous avons recherché l'existence d'une relation entre les valeurs quantitatives (y) de la végétation et les nombres digitaux (x) des images à l'aide de la méthode de régressions simple et multiple. Ceci aboutit à un modèle de régression pouvant être appliqué aux valeurs spectrales, puis de réaliser des cartes quantitatives de la végétation. La comparaison de ces cartes avec celles issues de la classification dirigée de l'image satellitaire nous permettra de vérifier la signification des modèles employés et montrera finalement s'il est judicieux d'employer ces descripteurs pour la définition des légendes.

3. Résultats

3.1. Sélection des descripteurs de la végétation

Le regroupement des sites de relevés par ordination correspond bien à nos observations de terrain lorsque l'on utilise les données issues du recouvrement, et en particulier le pourcentage de recouvrement des arbres entre 8-16 m de hauteur, ainsi que les valeurs de rugosité telles que la longueur de la courbe représentant le profil de la canopée. Le nombre de tiges de diamètre inférieur à 10 cm est également un descripteur discriminant.

3.2. Corrélation

L'analyse des corrélations entre 19 descripteurs de la végétation et les nombres digitaux moyens montre une forte corrélation de la radiance avec les variables du recouvrement de la strate de 8-16 m (figure 2) et 16-32 m et les variables de la rugosité. En revanche, cette analyse nous amène à rejeter certains descripteurs comme le recouvrement 0-2 m, 2-4 m, et la variance de la taille des ouvertures dans la canopée. La biomasse ne montre qu'une faible corrélation. On notera qu'une étude de corrélation utilisant les valeurs spectrales sous forme d'indice (par ex. NDVI) fournit des résultats moins significatifs qu'avec les valeurs brutes des canaux.

3.3. Analyse de régression sur les paramètres de végétation

3.3.1. Régression simple

On observe une relation linéaire positive entre les différents descripteurs représentants la quantité de végétation et la radiance dans l'infrarouge moyen (TM5); cette tendance s'observe également pour les canaux infrarouges TM7 et TM4. Les coefficients de détermination de ces régressions sont relativement faibles puisque les variances explicables du canal TM5 et TM7 oscillent entre 20 et 56 %; ces valeurs sont plus élevées en moyenne avec le canal TM4 (32 à 52 %).

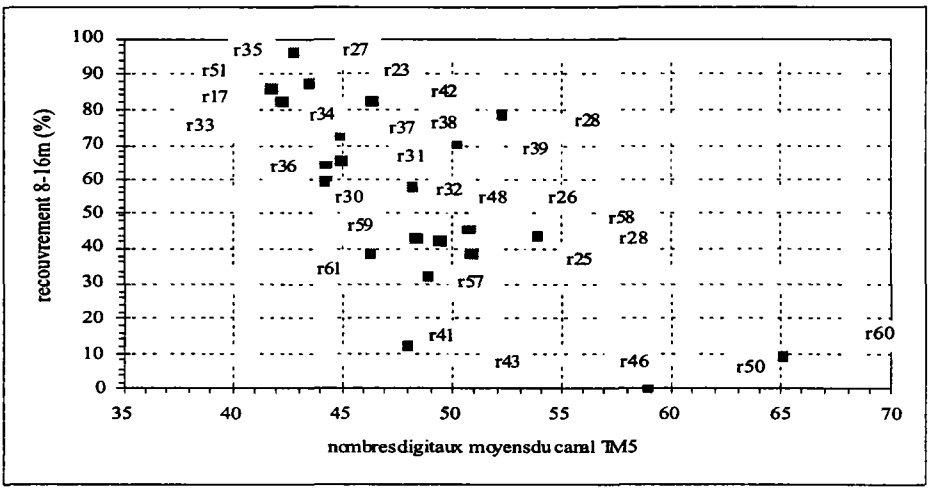


Figure 2. Relation entre les valeurs de recouvrement à 8-16 m et les nombres digitaux moyens de TM 5 mesurés sur chaque site de relevés de terrain.

Les descripteurs, tels que l'aire basale, la biomasse et le nombre de tiges, ont de plus faibles coefficients que ceux liés au recouvrement. Ces derniers sont le recouvrement de 8-16 m ($R^2 = 56$ % avec une probabilité sigma inférieure à 0,005), la hauteur moyenne de la canopée ($R^2 = 39$ %). Le rôle prépondérant des mesures de recouvrement correspond aux hypothèses que nous avions formulées auparavant. Par contre, les variables de rugosité ont des coefficients de détermination peu significatifs.

Comme nous le remarquions au sujet des corrélations entre les variables quantitatives, si le recouvrement est fortement significatif pour expliquer un modèle de régression, il ne faut pas oublier que l'augmentation du recouvrement va de paire avec une augmentation de la hauteur de la canopée ou de la biomasse, et donc la possibilité de le mesurer est très intéressante.

3.3.2. Régression multiple

La régression simple de la radiance d'un canal sur un seul descripteur fournit de nombreuses informations, mais l'utilisation conjointe des trois canaux dans l'infrarouge devrait permettre d'affiner les relations, malgré la forte corrélation de l'information entre ces canaux.

De fait, on observe des résultats relativement similaires à ceux de la régression simple mais ils sont moins significatifs; par exemple, la régression linéaire multiple sur la biomasse a seulement un R^2 de 8 %, malgré le rôle prépondérant qu'on lui attribue généralement.

Cette approche par régression multiple permet d'expliquer uniquement la variation d'un paramètre structural à la fois, ce qui n'est pas satisfaisant pour décrire la végétation, c'est pourquoi nous avons tenté de prendre les composantes principales comme variables à expliquer, par la méthode de régression orthogonale. Les résultats montrent pour la première composante une valeur R^2 de 49 %, pour la composante 2 de 28 % et la troisième de 52 %.

3.4. Classification des images à l'aide des paramètres de régression

L'intérêt principal de la recherche d'une relation entre les paramètres quantitatifs et les images est la création de cartes thématiques de manière semi-automatique. Nous avons appliqué les modèles de régression qui montrent une forte corrélation sur les données numériques des trois canaux de l'image, pour créer des cartes exprimant un paramètre quantitatif de la végétation. Les résultats sont validés par la comparaison avec la classification dirigée qui sert de référence, puis les valeurs sont vérifiées à l'aide des données des relevés.

Nous avons réalisé une carte du pourcentage de recouvrement de la strate de 8-16 m: bien que le modèle de régression multiple montrait un fort coefficient de régression, il n'est possible de distinguer que deux classes de forêts contre 6 classes par la procédure de classification dirigée, du moment que la cooccurrence doit être d'au moins 80 %. De plus, l'estimation du recouvrement de certaines classes fournit des données trop élevées, comme pour les ananas et les bananiers, ou la végétation herbeuse (tableau 1).

Une carte du recouvrement à 12 m a été réalisée à l'aide du modèle. Elle montre un résultat concluant pour la distinction approximative des milieux lorsque l'on reclasse les données la carte avec des intervalles de recouvrement de 20 %. Concernant la région de Yapo (tableau 1), la cooccurrence avec la classification contenant vingt classes de végétation est de l'ordre de 80 %. Lorsqu'on diminue les intervalles pour avoir des classes de recouvrement de 10 %, afin d'affiner la carte, la cooccurrence n'atteint plus que 30 % pour une classe donnée. On note que l'information issue des données de recouvrement par intervalles de 20 % est bien inférieure à celle de la classification car il n'est pas possible de réaliser plus de 6 classes sur les 20 de la classification dirigée.

Une carte de la hauteur moyenne de la canopée avait été également réalisée (figure 3.). Concernant la zone de Yapo, le reclassement de cette carte en 25 intervalles de 2 m et sa comparaison avec la classification, montrent une cooccurrence d'une classe avec un intervalle donné de l'ordre de 20 %. La majorité des pixels (70 %) sont classés dans une tranche de +-4m autour de cet intervalle.

Certaines incohérences de classification par régression démontrent les limites de l'utilisation d'un modèle linéaire unique. Elles concernent la surestimation de la hauteur moyenne dans les cas où les valeurs numériques faibles sont dues à une dégradation et la sous-estimation de la hauteur lorsque la canopée est très plane (parasoleraie). L'information que l'on extrait de cette carte n'est donc pas utilisable directement, et devrait être nuancée par un coefficient lié à l'hétérogénéité du couvert.

Tableau 1. Cooccurrence entre la carte du recouvrement 8-16m en 10 intervalles et la classification sur la zone de Yapo avec 17 thèmes de couverture du sol.

Thèmes / Recouvrement (%)	Forêt dense	F exploitée	F hétérogène	Plantation de niagon	F.bas fond basse	F.bas-fond haute	Plantation de Framirés	Palmiers	Forêt secondaire	Cacao	Parasoleers	Brousse	Banane	Ananas	Bambous	Sol herbeux	Sol nu
0-10												59	46		71 5	**85.2**	**99.7**
10-20												11 6	35 9		27 1	14 1	
20-30										1.3	2 5	**30.5**	**43**	4 2	1 3		
30-40							2 1			9 7	**44**	**41.1**	14 7	10 7			
40-50							4 7		**38.0**	39 2	**43.2**	10 5	1 7	17 1			
50-60						**14.7**	**40.7**	**21.4**	**51.2**	**46.6**	9 2			**24.7**			
60-70		1 8	19 9	1 04	0 5	**56.6**	**49.5**	**64.8**	9 3	2 8				20 3			
70-80	9 8	**49.7**	**68.4**	**52.5**	**59.3**	26 2	2 2	12 7						10 8			
80-90	**76.5**	**46**	10 8	**42.2**	**37.4**	2 3								8 9			
90-100	**13.3**	2.1		3.3	2 7									2 3			
>100	0 2																

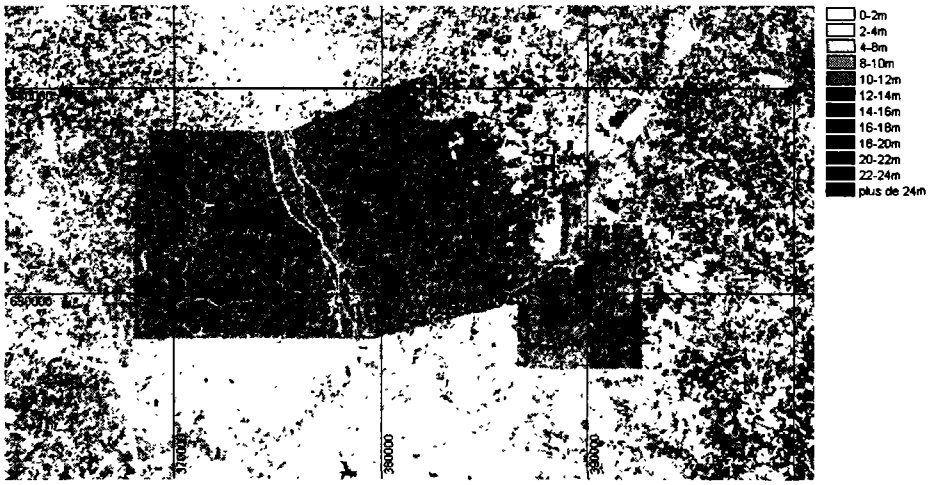


Figure 3. Forêt classée de Yapo. Carte de la hauteur moyenne de la canopée par intervalles de 2 m de hauteur.

4. Conclusion

Il ressort de cette recherche que la classification dirigée fournit des résultats plus pertinent que ceux issus de la modélisation. Les cartes issues des modèles de régression multiple font toutes ressortir une surévaluation des paramètres quantitatifs dans le cas des milieux particuliers (palmeraies, bas-fonds, forêts dégradées). Il s'agit de cas où l'humidité, la morphologie du feuillage (palmiers) et le pourcentage d'ombre interviennent pour modifier la relation linéaire. Par des mesures quantitatives qui considèrent d'une manière ou d'une autre ce pourcentage d'ombre lié à l'hétérogénéité, puis par la réalisation d'une carte des valeurs d'hétérogénéité, nous espérions réduire ce problème de classification, cependant la création d'une telle carte de la végétation na pas pu être réalisé, car l'intégration d'un tel indice dans les modèles de régression est peu significative

Un modèle de régression cubique aurait été certainement plus efficace, car nos résultats montrent que pour les valeurs quantitatives élevées, la relation la plus plausible est apparentée à une courbe, mais le nombre insuffisant de relevés ne nous permet pas une telle analyse.

Les corrélations directes entre les valeurs numériques et les paramètres, tels que la biomasse et l'aire basale, ne sont pas significatives et excluent toute possibilité de cartographie de la biomasse par télédétection dans le cas des forêts dégradées de zone tropicale. Ceci n'empêche pas l'existence de la relation biomasse-infrarouge, mais implique qu'une évaluation fine des corrélations est très délicate à l'échelle de résolution des capteurs TM de Landsat.

Il est probable que ces conclusions négatives s'expliquent par la grande variance des paramètres quantitatifs et des valeurs des pixels au niveau des sites de référence, et que l'échantillonnage de plus grandes surfaces homogènes aurait conduit à de meilleures corrélations. L'étude des corrélations entre les paramètres structuraux et les valeurs spectrales est complexe lorsque l'on utilise comme référentiel un écosystème naturel qui est par définition hétérogène et qui se situe en zone tropicale en particulier. Une analyse approfondie de l'implication de ces paramètres devrait être réalisée en fixant un paramètre

et en modulant les autres, mais elle n'est possible que par une modélisation ou par l'étude d'écosystèmes homogènes particuliers comme des plantations monospécifiques. Cependant, cette approche globale permet de cerner les limitations et de proposer de nouvelles approches.

Il nous semble néanmoins nécessaire de poursuivre les investigations au niveau de sites forestiers tropicaux présentant des états physiologiques plus diversifiés. Il faudrait pour cela disposer de plusieurs images satellitaires successives dans l'année, car les données analysées dans ce travail ne sont que l'expression de l'état de la végétation à une date donnée. Il est évident que les radiances observées évoluent au cours des saisons comme le montrent les analyses par suivi avec des images de type AVHRR de NOAA (PAIVINEN *et al.*, 1992).

5. Remerciements

Cette étude a été possible grâce à une subvention du Fonds National Suisse de Recherche Scientifique.

6. Références

CHATELAIN, C. 1996. Possibilités d'application de l'imagerie satellitaire à haute résolution à l'étude des transformations de la végétation en Côte d'Ivoire forestière. Thèse de doctorat, Université de Genève. 201 p.

CHATELAIN, C., GAUTIER, L. and SPICHIGER, R. 1996. A recent forest history fragmentation in Southern Ivory Coast. Biodiversity and Conservation, n° 5, p. 37-53.

GAUTIER, L., CHATELAIN, C. and SPICHIGER, R. 1994. Presentation of a relevé method for vegetation studies based on fine-scale satellite imagery. XIII[th] Congress de l'Association pour l'étude taxononomique de la flore d'Afrique Tropicale, Zomba, Malawi, p. 1339-1350.

GEMMELL, F.M. 1995. Effects of forest cover, terrain, and scale on timber volume estimation with thematic mapper data in rocky mountain site. Remote Sensing of Environment, n° 51, p. 291-305.

GUYOT, G., GUYON, D. and RIOM, J. 1989. Factors affecting the spectral response of forest canopies: A review. Geocarto, n° 3, p. 3-17.

HIERNAUX, P. 1975. Etude phytoécologique des savanes du pays baoulé méridional. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.

PAIVINEN, R., PITKANEN, J. and WITT, R. 1992. Mapping closed tropical cover in West Africa using NOAA AVHRR-LAC data. Silva Carelica, n° 21, p. 27-51.

PUKKALA, T., PHOJONEN, H. and MUINONEN, E. 1992. Woody biomass density in the Tendelti area of the central Sudan. Silva Carelica, n° 21, p. 51-90.

SADER, S.A., WAIDE, R.B., LAWRENCE W.T. *et al.* 1989. Tropical forest biomass and successional age class relationship to a vegetation index derived from Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, n° 28, p. 143-156.

TUCKER, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, n° 8, p. 127-150.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 357-367

36

Amélioration et comparaison de filtres adaptatifs pour la réduction du chatoiement dans les images radar RSO de ERS-1

DALILA CHERIFI et YOUCEF SMARA

Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène (USTHB), B.P. 32, El-Alia Bab-Ezzouar, 16111 Alger, Algérie; téléphone : 213 (2) 24 79 50 poste 806; télécopieur : 213 (2) 24 71 87; courriel :dcherifi @hotmail.com; y.smara@mailcity.com

Résumé

Les images radar présentent un effet de chatoiement qui se traduit par une forte dispersion des valeurs de radiométrie observées sur des surfaces naturelles. Ce phénomène est commun à toutes les images produites par des systèmes cohérents. L'utilisateur d'une image radar à synthèse d'ouverture (RSO) cherche le plus souvent à faciliter l'interprétation des images, par une réduction énergique du chatoiement. Ainsi, de nombreuses méthodes de filtrage du chatoiement dans les images RSO ont été étudiées. Le problème consiste à estimer le bruit et de le supprimer tout en préservant la radiométrie et les informations texturales de l'image. Dans cet article, nous présentons un algorithme améliorant le filtre adaptatif défini par LOPES en 1991. Ce filtre a été implémenté sur la base d'une version modifié du filtre de FROST. Il permet un filtrage des zones homogènes tout en préservant les structures et les textures. Une étude comparative ainsi que l'évaluation des performances des différents filtres sont effectuées à l'aide de l'algorithme de détection de contour proposé par TOUZI en 1988 et d'un ensemble de critères d'évaluation objectifs directement mesurables dans l'image : préservation de la radiométrie moyenne, taux de réduction du chatoiement dans les zones homogènes, préservation du contraste près des contours, des lignes et des forts réflecteurs. Les tests ont été effectués sur des images radar RSO du satellite ERS-1 sur la région de Laghouat (Sud algérien).

1. Introduction

Contrairement aux images prises dans le domaine du visible et de l'infrarouge, les images RSO présentent un effet de chatoiement qui se traduit par une forte dispersion des valeurs de radiométrie observées. Ce phénomène commun à toutes les images produites par des systèmes utilisant des ondes cohérentes rend difficile la perception et l'extraction des détails fins de l'image. Ainsi, le chatoiement est dû au fait qu'une cellule de résolution correspondant à une cible étendue est composée de plusieurs éléments diffuseurs. Leurs réponses élémentaires vont interférer de manière constructive ou destructive. Ceci se traduit dans l'image par des points brillants ou sombres (GOODMAN, 1976). Le chatoiement entraîne donc une dégradation du contraste. Différents filtres ont été proposés pour le réduire.

2. Filtrage des images RSO

Le chatoiement est considéré comme un bruit multiplicatif, son expression mathématique est donnée par :

$$I = R.u \tag{1}$$

où R désigne la reflectivité radar moyenne et u est le chatoiement de moyenne unité et de variance $\sigma_u^2 = \frac{1}{L}$.

Au cours de notre étude nous nous sommes intéressés aux filtres adaptatifs. Ainsi, nous avons étudié et réalisé le filtre de Lee, le filtre de Kuan, le filtre de Frost ainsi que les filtres statistique et géométrique. Les filtres basés sur le critère d'erreur quadratique moyenne minimale (EQMM) sont établis en minimisant l'erreur quadratique entre l'estimation et la valeur réelle. Nous présentons les filtres les plus communément utilisés (Lee, Kuan, Frost) et leurs versions modifiées.

2.1. Filtre de Lee

Le filtre de Lee est un filtre adaptatif basé sur le calcul des statistiques locales de l'image. Il considère le chatoiement comme étant un bruit multiplicatif statistiquement indépendant de l'image. L'expression du filtre de Lee est donnée par la formule suivante (LEE, 1981; LOPES *et al.*, 1990) :

$$\begin{cases} \hat{R} = \bar{I}(1 - w) + I.w \\ \text{avec} \quad w = 1 - \dfrac{C_u^2}{C_I^2} \end{cases} \tag{2}$$

où $c_I = \frac{\sigma_I}{\bar{I}}$ est le coefficient de variation de l'image et $c_u = \frac{\sigma_u}{u}$ est le coefficient de variation du bruit.

On s'aperçoit que si la moyenne et la variance du chatoiement sont connues, l'estimation de R dépend du calcul des statistiques locales de la fenêtre de traitement, qui sont la moyenne et la variance ($\bar{I}$, σ_I).

2.2. Filtre de Kuan

KUAN *et al.* (1985) ont proposé un modèle de l'image où ni la moyenne ni la variance ne sont stationnaires. L'équation du filtre de Kuan se présente sous la forme suivante (LOPES *et al.*, 1990) :

$$\begin{cases} \hat{R} = \bar{I}(1 - w) + I.w \\ \text{avec} \quad w = \left(1 - \frac{C_u^2}{C_I^2}\right) \Big/ (1 + C_u^2) \end{cases} \tag{3}$$

où $C_I = \frac{\sigma_I}{\bar{I}}$ est le coefficient de variation de l'image et $C_u = \frac{\sigma_u}{\bar{u}}$ est le coefficient de variation du bruit.

2.3. Filtre de Frost

FROST *et al.* (1982) intègrent dans leur modèle l'effet multiplicatif du chatoiement et la réponse impulsionnelle du capteur RSO. Selon ce modèle, l'image radar observée en intensité est de la forme :

$$I(x,r) = [R(x,r) \cdot u(x,r)] * h(x,r) \tag{4}$$

où h(x, r) est la réponse impulsionnelle du capteur RSO.

Le modèle de Frost est caractérisé par la réponse impulsionnelle du filtre m(t) qui s'écrit comme suit :

$$m(t) = K_2 \exp[-K.C_I d(t)] \tag{5}$$

où K_2 est une constante de normalisation, K est le paramètre de filtre permettant de contrôler le degré de lissage lors du filtrage et d(t) est la distance euclidienne.

2.4. Amélioration des filtres de Lee, de Kuan et de Frost

LOPES *et al.* (1990) ont apporté des améliorations aux filtres de Lee, de Kuan et de Frost. L'amélioration consiste à apporter un traitement adapté de l'image en fonction de l'hétérogénéité locale de la scène à restaurer mesurée par l'intermédiaire du coefficient de variation. Ainsi ils ont introduit deux seuils C_u et C_{max} qui limitent les différentes classes comme suit :

- zone homogène : dans ce cas, le filtre doit assigner la valeur à estimer par la moyenne des pixels qui l'entourent; en théorie, la zone est dite homogène si son coefficient de variation $C_I \leq$ Cu (coefficient de variation du bruit);
- zone hétérogène : dans ce cas, le filtre doit éliminer le chatoiement tout en préservant les contours et les zones texturées; cela peut se réaliser en supposant que le filtre est capable de séparer le chatoiement et l'information texturale; le filtre sera opérationnel pour $C_u < C_I < C_{max}$;
- zone à préserver : dans le cas où $C_I \geq C_{max}$, les filtres précédemment présentés ne sont pas fiables, la valeur du pixel doit être préservée [R(i,j)=I(i,j)].

3. Filtre statistique et géométrique

Le filtre adaptatif développé par LOPES *et al.* (1993) s'adapte à la non stationnarité locale de l'image radar grâce à une détection de structures (détection de contours et de lignes) intégrée au processus de filtrage. Le filtre est contrôlé par le coefficient de variation local de l'image C_l assisté de détecteurs de structures à géométrie variable capable de localiser dans une fenêtre de traitement la présence et l'orientation de contours, de lignes ou de forts réflecteurs.

Ce double contrôle de l'hétérogénéité spatiale de l'image permet de redéfinir la géométrie du masque de filtrage en fonction de la nature et de la morphologie de la structure détectée. Ce filtre, contrairement aux filtres basés sur les statistiques du premier ordre, tient compte de la non stationnarité locale de l'image en introduisant les détecteurs de contours et lignes. Ainsi, en appliquant le filtre GGMAP (LOPES *et al.*, 1993), de Lee (DESNOS and MATTEINI, 1993) et de Frost (CHÉRIFI et SMARA, 1999a), on obtient un bon lissage dans les zones homogènes. La préservation des structures, des textures et des forts diffuseurs dépend du filtre utilisé dans la chaîne de filtrage. Néanmoins, la difficulté réside dans le choix des seuils liés aux détecteurs lignes et contours et de la valeur de C_{max} .

3.1. Détecteur de contours et lignes basé sur l'opérateur « rapport » : application du filtre statistique et géométrique

Le principe du détecteur de contours et lignes consiste à diviser la fenêtre de traitement en deux pour la détection de contours et en trois pour la détection de lignes, comme on le montre sur la figure 1.

La détection de contours et de lignes, au moyen de l'opérateur rapport r, consiste à calculer localement en chaque pixel de l'image et pour une direction donnée les expressions suivantes :

- rapport contour $r_2 = \min(X_1/X_2, X_2/X_1)$;
- rapport ligne $r_3 = \min(Y_1/Y_2, Y_2/Y_1)$;

où X_1, X_2, Y_1, Y_2 sont définies comme étant les valeurs moyennes des pixels à l'intérieur des sous-fenêtres d'intensité moyenne P_1 et P_2. Le calcul des rapports des radiométries moyennes s'effectue suivant les quatre directions usuelles. La valeur minimale des rapports est comparée à un seuil théorique. Ainsi, un contour est détecté pour $r_2 < r_{2min}$ et

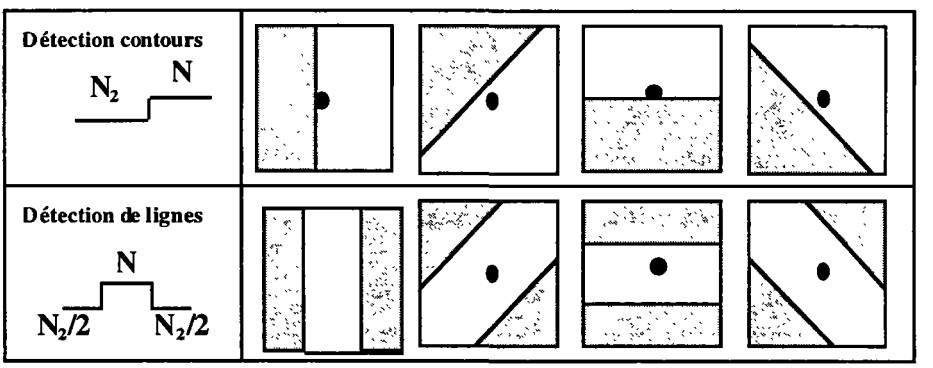


Figure 1. Configuration des masques géométriques pour la détection de contours (r_2) et de lignes (r_3). Chaque masque est retourné de 90°.

$r_3<r_{3min}$. Les valeurs de r_{2min} et r_{3min} sont calculées à partir de la fonction de densité de probabilité donnée par l'expression suivante :

$$P(r/P) = \frac{2\Gamma(N_1,L+N_2L)}{\Gamma(N_1L)*G(N_2L)} \frac{P_2^{N_1L}}{P_1} \frac{N_2^{N_2L}}{N_1} \frac{r^{(2NL-1)}}{r^2\frac{P_2}{P_1}+\frac{N_2}{N_1}^{N_1L+N_2L}} + \frac{P_2^{N_2L}}{P_1} \frac{N_1^{N_1L}}{N_2} \frac{r^{(2NL-1)}}{r^2\frac{P_1}{P_2}+\frac{N_1}{N_2}^{N_1L+N_2L}} \quad (6)$$

Les seuils se calculent numériquement en fonction du contraste $C = \min(P_1/P_2, P_2/P_1)$ des structures que l'on cherche à détecter avec une certaine probabilité de détection que l'on se fixe. Son expression est donnée par :

$$Pd(r,C) = \int_0^r P(r/C)dr \quad (7)$$

Dans notre cas en se fixe une Pd ≥ 90 % pour un contraste C donné où une pfa inférieure à 5 % (figure 2).

3.2. Algorithme de détection de contour de Touzi

TOUZI *et al.* (1988) ont proposé un algorithme de détection de contour basé sur l'opérateur « rapport » des radiométries moyennes des pixels des deux voisinages adjacents pour une direction considérée comme suit :

$$r = \min\left(\frac{X_1}{X_2}, \frac{X_2}{X_1}\right) \quad (8)$$

L'algorithme opère sur des voisinages (i = 1,..3) de taille croissante (figure 3). Les différents seuils $T_{i(i=0,\ 3)}$ (avec $T_0 = 0$), correspondants ont une pd (ou pfa) donnée. L'application de l'opérateur rapport contour (le traitement s'effectue suivant les quatre directions) commence par traiter la plus petite fenêtre (i = 1), la valeur de r est assignée à

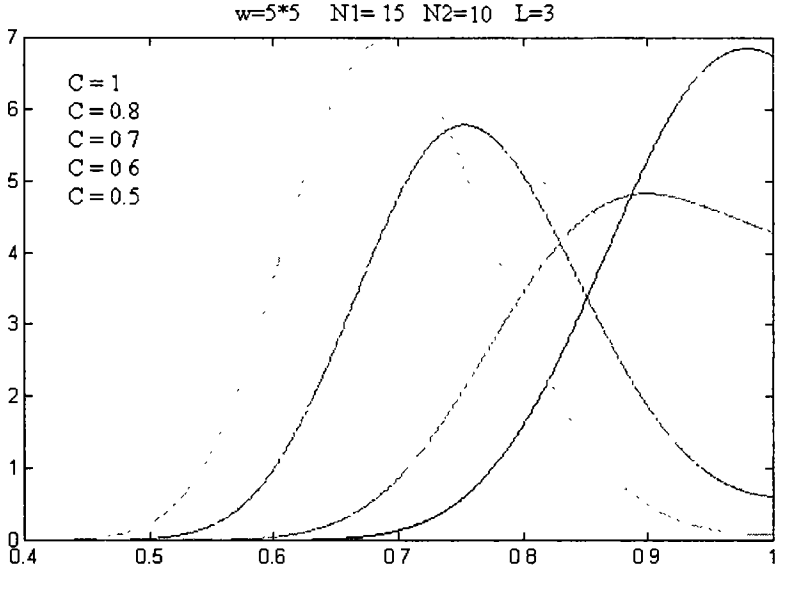


Figure 2. Fonction de densité de probabilité (ddp) du rapport ligne à l'intérieur d'une zone homogène et sur des zones présentant différents contrastes, pour une fenêtre 5 x 5.

un contour si elle appartient à l'intervalle $[T_0, T_3]$, par contre pour $(r > T_3)$ le point traité est assigné à une zone homogène. Le schéma descriptif de cet algorithme est présenté sur la figure 3.

L'algorithme est appliqué sur l'image de Laghouat (Algérie) filtrée par les différents filtres réalisés. Les résultats sont illustrés sur les figures 4 et 5. Dans notre cas, après calcul on a obtenu les seuils suivants $T_0 = 0$, $T_1 = 0{,}37$ (N = 3, L = 3, NL = 9), $T_2 = 0{,}59$ (N = 10, L = 3, NL = 30), $T_3 = 0{,}7$(N = 21, L = 3, NL = 63) (CHÉRIFI and SMARA, 1999b).

4. Évaluation expérimentale des méthodes de filtrage du chatoiement en imagerie RSO

4.1. Critères d'évaluation

Deux méthodes d'évaluation sont régulièrement utilisées. La première est l'appréciation visuelle, qui consiste à vérifier la netteté de l'image (aspect flou) ainsi que la préservation des contours et des structures. Néanmoins, cette méthode reste insuffisante pour caractériser l'efficacité du filtre utilisé. La deuxième méthode est basée sur des critères statistiques nécessaires pour quantifier la qualité de l'image filtrée.

4.1.1. Nombre équivalent de vues

Ce paramètre est appelé nombre équivalent de vue ENL. Il est calculé à partir du coefficient de variation C_I dans une zone homogène. Il permet par sa valeur de quantifier le taux de lissage des zones homogènes. Il est donné par :

- pour une image en intensité :

$$C_I = \frac{1}{\sqrt{ENL}} \Rightarrow ENL = \frac{1}{C_I^2} \tag{9}$$

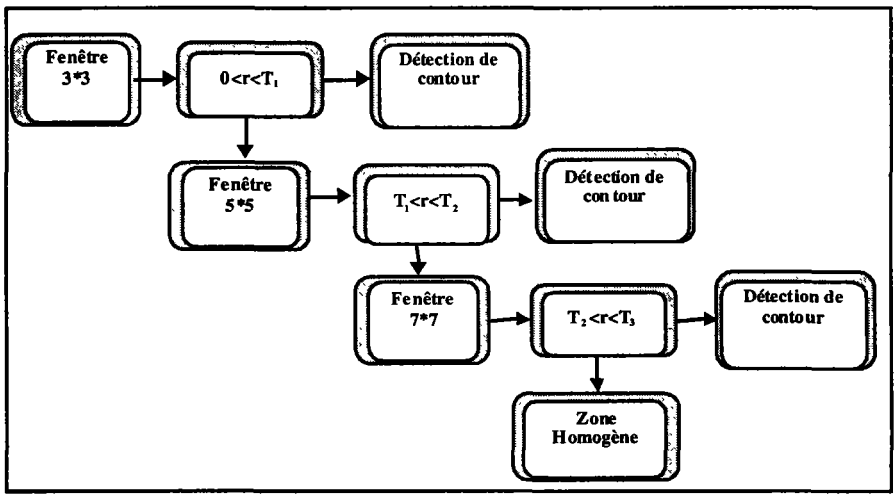


Figure 3. Schéma de l'algorithme du détecteur « rapport contour » de Touzi.

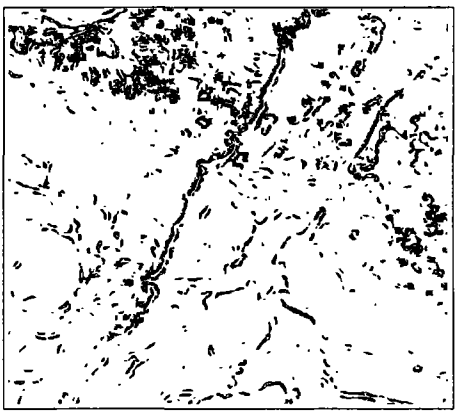


Figure 4. Détecteur de contour (Filtre de Lee) (N = 5 x 5, T1 = 0,37, T2 = 0,59, T3 = 0,7).

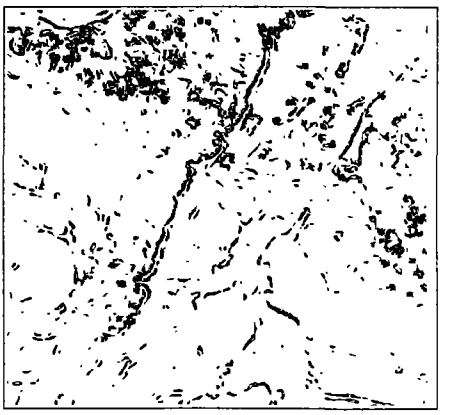


Figure 5. Détecteur de contour (Filtre de Frost) (N = 5 x 5, T1 = 0,37, T2 = 0,59, T3 = 0,7).

- pour une image en amplitude :

$$C_A = \frac{0.522}{\sqrt{ENL}} \Rightarrow ENL = \left(\frac{0.522}{C_A}\right)^2 \tag{10}$$

Ce critère permet d'évaluer la qualité de la réduction du chatoiement. Plus cette valeur est grande, meilleure sera la réduction du chatoiement dans la zone homogène de l'image. Il est calculé sur une zone homogène de l'image.

4.1.2. Préservation des contours

Ce paramètre représente le gain ou la perte de contraste d'un contour suite à un filtrage, par le rapport des radiométries moyennes estimées de part et d'autre du contour :

$$\begin{cases} \Delta C = 10\log C_f - 10\log C \\ C_f = \dfrac{1}{r_f}, C = \dfrac{1}{r} \end{cases} \tag{11}$$

où r_f et r désignent respectivement le rapport des radiométries moyennes minimales d'un contour avant et après filtrage.

Une autre méthode simple consiste à calculer la valeur absolue de la différence des moyennes prise de part et d'autres du contour comme suit :

$$\Delta m = |m1 - m2| \tag{12}$$

4.2. Résultats

Nous avons utilisé l'image RSO, trois vues de la ville de Laghouat (Sud algérien). Tous les filtres ont été testés en utilisant des fenêtres de filtrage de taille de 5 x 5. Les images filtrées sont présentées sur les figures 6 à 11 . Nous avons appliqué les différents filtres sur des données RSO en amplitude, les valeurs des coefficients de variation C_u et C_{max} sont respectivement 0,28 et 0,43 pour les filtres basés sur les critères EQMM.

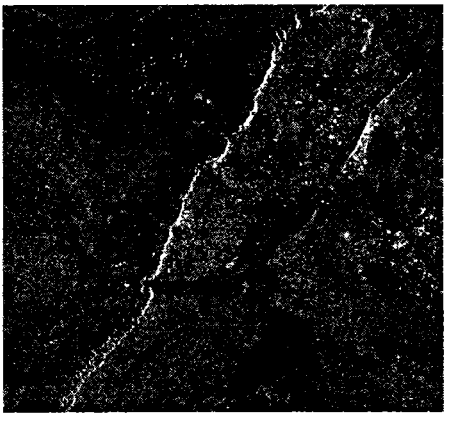


Figure 6. Image originale de Laghouat.

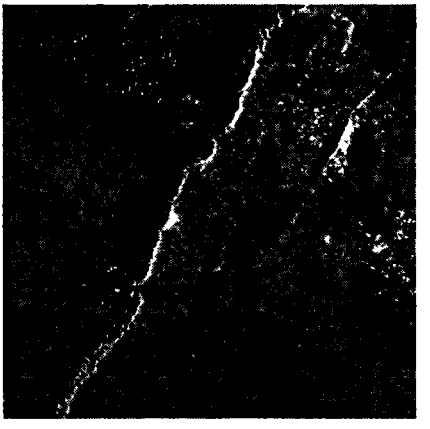


Figure 7. Filtre de Frost (Laghouat).

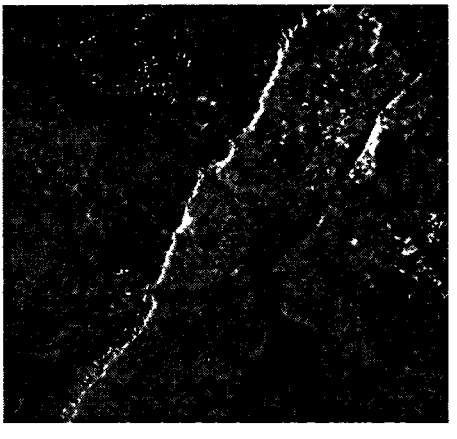


Figure 8. Filtre de Lee (Laghouat).

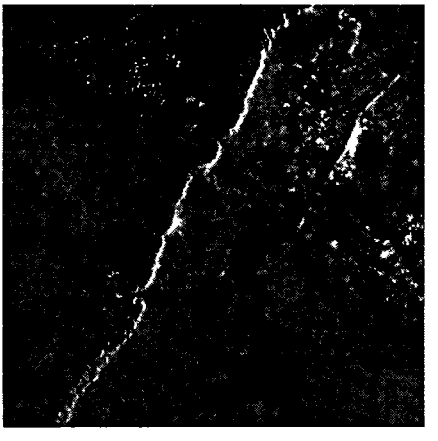


Figure 9. Filtre de Kuan (Laghouat).

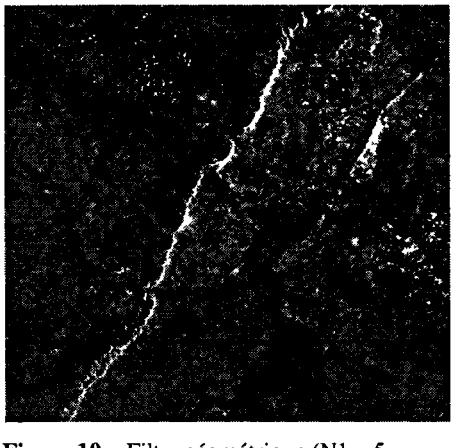


Figure 10. Filtre géométrique (N1 = 5, N2 = 20, L = 3).

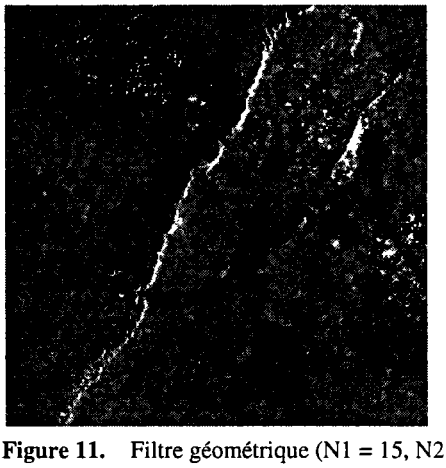


Figure 11. Filtre géométrique (N1 = 15, N2 = 10, L = 3).

4.2.1. Préservation de la radiométrie moyenne et taux de lissage

Les filtres de Lee amélioré, de Kuan amélioré et de Frost amélioré ont les mêmes performances de lissage, cependant le filtre de Frost amélioré a un biais légèrement inférieur à celui de Lee amélioré et de Kuan amélioré.

Le filtre statistique et géométrique dans sa version modifiée présente un biais faible par rapport aux filtres de Lee et de Frost. Les résultats expérimentaux sont donnés sur le tableau 1.

4.2.2. Préservation de la radiométrie des contours

D'après les deux paramètres mesurés ΔC et Δm, on remarque que sur les deux images testées, les filtres statistiques et géométriques dans leur version modifiée préservent mieux les structures comparativement aux filtres de Lee et de Frost, autrement dit une faible perte de contraste et une meilleure préservation de transition (tableau 2).

Tableau 1. Nombre équivalent de vues et biais estimé sur l'image de Laghouat.

Image	Moyenne	Biais (dB)	CI	ENL
Originale	54,15	0	0,290	3,25
Filtre de Lee amelioré	43,10	-0,99	0,164	10,17
Filtre de Kuan amélioré	44,40	-0,86	0,162	10,42
Filtre de Frost amélioré	44,33	-0,87	0,166	9,92
Filtre statistique et géométrique (Lee), N1 = 5	45,93	-0,71	0,170	8,75
Filtre statistique et géométrique (Lee), N1 = 15	45,74	-0,73	0,160	9,57
Filtre statistique et géométrique (Frost), N1 = 5	45,87	-0,72	0,190	7,26
Filtre statistique et géométrique (Frost), N1 = 15	45,73	-0,73	0,180	8,44

Tableau 2. Préservation du contraste des contours sur l'image de Laghouat

Image	m1	m2	C (valeur idéale 0)	m
Originale	255,0	102,75	0	152,25
Filtre de Lee amélioré	176,5	112,50	4,585	64,00
Filtre de Frost amélioré	196,0	107,25	3,060	88,75
Filtre statistique et géométrique (Lee) N1 = 5	212,0	110,50	2,573	101,50
Filtre statistique et géométrique (Lee) N1 = 15	202,0	111,00	3,102	91,00
Filtre statistique et géométrique (Frost) N1 = 5	224,0	95,25	0,538	128,75
Filtre statistique et géométrique (Frost) N1 = 15	181,0	91,50	2,268	89,50

5. Discussion et conclusion

Afin de mettre en évidence les performances des filtres étudiés nous avons effectué une étude comparative basée sur des critères statistiques. Les performances du filtre Lee amélioré et du filtre de Kuan amélioré sont pratiquement identiques. Une bonne réduction du chatoiement s'opère dans les zones homogènes mais au détriment des contrastes contours et lignes. Le filtre de Frost présente l'avantage de lisser les zones homogènes, et de conserver les contours et lignes. Ceci est dû à l'utilisation du paramètre K. Cependant, les micro-contours sont aussi lissés. Les points isolés où les forts réflecteurs sont moyennement préservés.

Le filtre statistique et géométrique qui utilise le filtre de Frost donne le meilleur compromis sur l'ensemble des critères étudiés en termes de lissage et de préservation des contours et des lignes. En conclusion, le choix du filtre dépend d'abord de l'application et des paramètres recherchés par les utilisateurs. Les améliorations à apporter à la mise en place des filtres de réduction du chatoiement sont respectivement :

- l'intégration de la corrélation spatiale du chatoiement dans le calcul des paramètres statistiques des filtres adaptatifs existants;
- l'intégration du filtrage dans un processus de segmentation, plutôt que d'en faire une étape préalable.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence spatiale européenne (ASE) pour la mise à disposition des données RSO.

7. Références

CHÉRIFI, D. et SMARA, Y. 1999a. Rapport contour dans l'exploitation des images radar SAR. Actes de la deuxième conférence internationale d'électronique sur les signaux, systèmes et automatique, Blida, Algérie, 10-12 mai 1999, p. 45-49.

CHÉRIFI, D. and SMARA, Y. 1999b. Refined Adaptive Speckle Filtering For SAR images. 19ème symposium de l'EARSeL, « Remote sensing in the 21th century: economic and environmental applications », Valladolid, Espagne, 31 mai -2 juin 1999.

DESNOS, Y.L. and MATTEINI, V. 1993. Review on structure detection and speckle filtering on ERS-1 images. EARSel Advances in Remote Sensing, vol. 2, n° 2, p. 52-65.

FROST, V. S., STILES, J. A., SHANMUGAN, K.S. and HOLTZMAN, J.C., 1982. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 4, n° 2, p. 157-165.

GOODMAN, J. W. 1976. Some fundamental properties of speckle. Journal of Optical Society of America, vol. 66, n° 11, p. 1145-1149.

KUAN, D.T., SAWCHUK, A.A., STRAND, T.C. and CHAVEL, P., 1985. Adaptative noise smoothing filter for images with signal dependent noise. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 7, n° 2, p. 165-177

LEE, J.S, 1981. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images. Optical Enginnering, vol. 25, n° 5, p. 636-643.

LOPES, A., TOUZI, R. and NEZRY, E., 1990. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, n° 6, p. 992-1000.

LOPES, A., TOUZI, R., NEZRY, E. and LAUR, H., 1993. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, n° 9, p 1735-1758.

TOUZI, R., LOPES, A and BOUSQUET, P., 1988. A statistical and geometrical edge detector for SAR images. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, n° 6, p. 764-773.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 369-377

37

Utilisation des données TM de Landsat pour le suivi de l'état hydrique du couvert végétal en Algérie

ABDERRAHMANE HAMIMED, KHALLADI MEDERBAL et ABDELKADER KHALDI

Laboratoire d'analyse des systèmes biologiques et de géomatique, Centre universitaire Mustapha Stambouli, B.P. 763, Mascara 29000, Algérie; téléphone : +213 6 80 41 68/ 69; télécopieur : +213 6 80 41 64

Résumé

Ce travail a pour objectif d'élaborer une méthodologie fondée sur l'utilisation des données satellitaires TM de Landsat pour le suivi d'un couvert végétal. Il s'agit d'estimer son évapotranspiration réelle et de diagnostiquer son état hydrique à travers la résolution de l'équation du bilan d'énergie à la surface par le biais du modèle *SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land)*. L'algorithme utilisé fait intervenir, à l'entrée, le NDVI, la température de surface et l'albédo. Le jeu de données est constitué de sept bandes TM et des mesures agrométéorologiques de terrain. Pour l'estimation du flux de chaleur sensible, nous avons opté pour une méthode basée sur utilisation des profils dans la couche de surface, avec le couplage qui s'opère au niveau du flux à la base de la couche limite convective. Il est alors possible de calculer la densité du flux de chaleur sensible et d'estimer l'évapotranspiration réelle à partir de la résolution de l'équation du bilan d'énergie. Enfin, différents indices d'humidité, dérivés de l'évapotranspiration, ont été calculés : l'indice CWSI, le paramètre de Priestley et Taylor et la résistance de surface à l'évaporation. Ces indices permettent de faire le diagnostic quantitatif de l'état de stress hydrique du pixel. En conclusion, les résultats obtenus sont prometteurs pour l'exploitation du SEBAL par télédétection.

1. Introduction

L'agriculture est une activité humaine sensible aux aléas du climat. Des phénomènes climatiques extrêmes, tels que la grêle, les gels précoces et tardifs, les pluies excessives et les inondations, représentent une sérieuse menace pour la production agricole d'un pays. Cependant, aucun phénomène n'a été plus dévastateur à grande échelle que la sécheresse.

Aujourd'hui plus que le passé, le monde de l'agriculture irriguée est conscient de la nécessité d'une utilisation optimale de l'eau d'irrigation. L'intérêt d'une gestion rationnelle de l'eau d'irrigation n'est aussi plus à démontrer tant aux plans agricole et socio-économique qu'écologique. Ceci requiert donc le développement des techniques fiables et sensibles pour la détection du stress hydrique d'un couvert végétal. Actuellement, l'une des techniques les plus pertinentes est sans conteste la radiothermométrie infrarouge : la température de surface d'un couvert végétal est en effet un bon indicateur du degré de réduction de son évapotranspiration. Le développement des techniques de la télédétection a ouvert de nouvelles perspectives à l'utilisation de cette technique pour le suivi du bilan hydrique du sol et la détection du stress hydrique. Au début des années 1980, on a vu le développement d'une technique pour la quantification de l'évapotranspiration sur une surface agricole homogène à travers le formalisme de SEGUIN *et al.* (1982), initialement basé sur l'équation de transfert radiatif à partir des données satellitaires obtenues au milieu de la journée dans l'infrarouge thermique. Celles-ci ont été fournies par des capteurs à faible résolution tels AVHRR de NOAA et VISSR de METEOSAT. Malgré qu'il soit équipé d'un canal dans l'infrarouge thermique, le capteur TM est très peu utilisé dans le domaine agronomique car son passage correspond à un moment où les températures de l'air et de la surface évoluent rapidement.

Le présent travail a pour objectif le développement d'une méthodologie d'exploitation des données TM de haute résolution spatiale pour le suivi d'un couvert végétal à structure hétérogène et de diagnostic de son état hydrique à partir de la résolution de l'équation du bilan d'énergie.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site d'étude

Le site d'étude correspond à deux zones choisies dans la région littorale ouest algérienne : les deux plaines de Bousfer et de Misserghine. Ces deux plaines, physiographiquement bien distinctes, sont séparées par les monts du Murdjajou (figure 1).

En outre, le choix de ce site a été guidé par deux critères essentiels : une diversité de l'occupation du sol et une présence d'aires sèches et de parties irriguées fortement contrastées sur le plan hydrique.

2.2. Données utilisées

Le jeu de données est constitué de sept bandes du capteur TM de Landsat-5 datant du 15 mars 1993 et d'un certain nombre de paramètres : la température de l'air, la température dans le sol (0,5 m et 1 m), la température de point de rosée et la température psychrométrique, la tension de vapeur, la pression au niveau de la mer, le rayonnement et la vitesse du vent

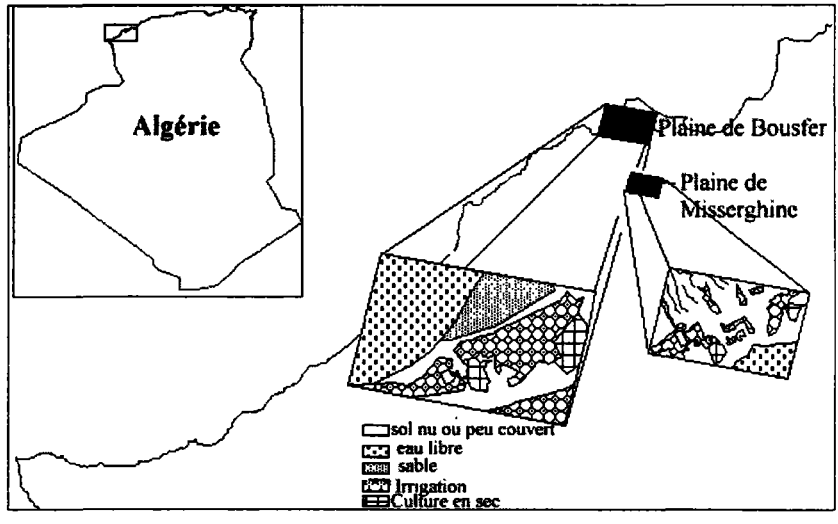


Figure 1. Carte de localisation des sites d'étude

à 2 m de hauteur. Ces paramètres sont collectés au niveau des stations de l'ONM-Oran, de Senia et du port d'Oran.

2.3. Méthodologie d'extraction de l'évapotranspiration

Le système sol–plante–atmosphère est très complexe. Son comportement est à la fois physique et biologique. Chaque élément de ce système contrôle une partie des comportements des autres. L'état d'équilibre, quand il existe, est difficilement « modélisable ». En général, tous les modèles de simulation sont fondés sur l'équation de la conservation des flux à la surface. Dans le contexte de notre travail, nous nous appuierons sur le modèle de simulation du bilan énergétique à la surface (SEBAL).

En effet, ce dernier, développé au Winand Staring Center (WSC) à Wageningen (Pays-Bas) par BASTIAANSSEN *et al.* (1993), a été adapté aux conditions bioclimatiques méditerranéennes pour résoudre l'équation du bilan d'énergie à l'échelle du pixel. Pour détourner certains problèmes d'estimation des paramètres liés à l'équation de transfert radiatif, ce modèle est conçu sur l'empirisme de certaines relations liant les paramètres mesurables par télédétection (le NDVI, l'albédo et la température de surface), aux paramètres « tirés » par des observations agrométéorologiques (la température de l'air, T_a et la vitesse du vent) et à ceux qui sont modélisables (l'émissivité de surface et de l'atmosphère, la rugosité de surface).

En général, l'équation du bilan d'énergie à la surface s'écrit (VIDAL, 1990) :

$$Q^* - G_o - H - \lambda E = 0 \qquad (1)$$

où Q^* est le rayonnement net;
G_o est la densité du flux de chaleur dans le sol;
H est la densité du flux de chaleur sensible;

lE est la densité du flux de chaleur latente ou, autrement dit, l'équivalent énergétique de l'évapotranspiration.

Pour extraire l'évapotranspiration, le modèle SEBAL intervient d'une manière séquentielle en calculant le rayonnement net (Q*), la densité du flux de chaleur dans le sol (G_o) et la densité de flux de chaleur sensible (H) et cela pour extraire, à partir de l'équation du bilan énergétique, la valeur du flux de chaleur latente (λE) à l'échelle du pixel.

Pour cartographier le rayonnement net (Q*) à l'échelle du pixel, il suffit, en théorie, d'évaluer le rayonnement global, l'émission par la surface et le rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde.

Pour le flux de chaleur dans le sol, il est estimé d'une manière approchée à partir d'un modèle de simulation qui exploite les données de télédétection : l'albédo, l'indice de végétation, la température de surface et le rayonnement net (CHOUDHURY *et al.*, 1987).

Il est ensuite possible de cartographier la densité du flux de chaleur sensible qui est fonction du gradient de la température et du coefficient de résistance au transfert turbulent (r_{ah}) entre la surface et l'atmosphère. L'évaluation de r_{ah} est basée sur l'utilisation des profils moyens de la partie de la couche limite dans laquelle les flux verticaux (flux de quantité de mouvement, vitesse de frottement, etc.) peuvent être considérés comme constants. Il est donc possible de supposer que, dans les terrains hautement secs, la densité de flux de chaleur latente est nulle. La densité de flux de chaleur sensible, au-dessus des pixels secs (H^{sec}), s'écrit alors :

$$H^{sec} = Q^* - G_o \qquad (2)$$

En outre, le repérage des pixels secs se fait par l'analyse des deux caractéristiques spécifiques et complémentaires de la surface du sol : l'albédo des courtes longueurs d'onde et la température de surface. La relation entre ces deux grandeurs physiques est d'allure unimodale. Le mode représente une valeur d'albédo pour laquelle la température est maximale.

La dérivée de l'albédo, par rapport à la température de surface pour les pixels secs, nous permet d'extraire une valeur de résistance au transfert turbulent (r_{ah}^{sec}) à la hauteur de la couche limite de surface (100 m). Cette valeur, incorporée dans un procédé itératif convergent, permet d'extraire la vitesse de frottement (u*) à la hauteur de référence et à l'échelle du pixel (HAMIMED, 1997).

Le gradient entre la température de surface et la température de l'air (δT) est évalué en respectant certaines conditions au limite :

- la linéarité entre la température de surface et le gradient δT (HORIGUCHI *et al.*, 1992);
- les pixels, dont l'albédo est inférieur à 0,1, sont considérés humides et le gradient δT est nul;
- les pixels, dont l'albédo est supérieur à r_o^{seuil}, sont considérés secs.

Cette démarche débouche sur la cartographie, à l'échelle du pixel, de la densité de flux de chaleur latente (λE). Ce paramètre est relié étroitement avec les indicateurs d'humidité dont nous citons l'indice de stress hydrique (CWSI), le paramètre de Priestley et Taylor (α) et la résistance de surface à l'évaporation (r_s).

3. Résultats

À travers cette modélisation de l'équation de transfert radiatif, nous avons montré que l'étude de la température de surface a permis la mise en évidence des observations suivantes :

- les secteurs où les sols nus sont dominants présentent des températures de surface supérieures à celles des secteurs où la couverture végétale est dense; elle est supérieure aussi à celle des surfaces d'eau libre;
- la proximité des côtes (la plaine de Bousfer) est caractérisée par une température moyenne de surface relativement faible (294 K); le coefficient de variation est de l'ordre de 0,9 %; cette homogénéité de variation spatiale de la température est due aux vents et à l'humidité de l'air qui sont forts et ont pour effet d'abaisser les écarts entre les températures de surface et les températures de l'air.

On peut noter aussi que l'analyse des relations entre l'albédo et la température de surface, qui a fait l'objet de controverses ces dernières années, est une contribution à la question importante sur le mécanisme de la sécheresse. Notre travail a rehaussé la coexistence de deux aspects physiques : une régulation hydrique dans les surfaces humides où la température de surface augmente quand l'albédo augmente (contrôle par évaporation), puis une régulation radiative caractéristique des surfaces sèches où l'eau est insuffisante pour déclencher le contrôle par évaporation. Nos résultats ont confirmé la validité de ces aspects physiques et indiqué que globalement c'est la sécheresse qui induit la logique radiative (figure 2).

Dans les études visant à estimer l'évapotranspiration à travers l'équation du bilan d'énergie, il apparaît que l'évaluation du flux de chaleur sensible est plus délicate. Pour cela, l'approche suivie dans notre travail est basée sur l'utilisation des profils de vitesse du vent et le flux de quantité de mouvement à la hauteur de la couche limite de surface.

En effet, l'estimation de l'évapotranspiration réelle par SEBAL représente assez fidèlement la logique des variations spatiales de l'évapotranspiration de façon assez

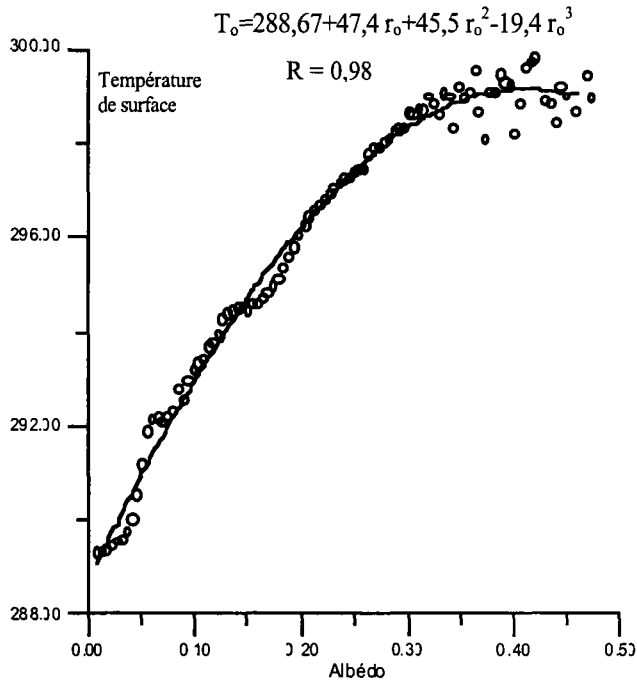


Figure 2. Relation entre les valeurs de la température de surface instantanée et de l'albédo : plaine de Bousfer

satisfaisante que les modèles sophistiqués sans avoir à introduire un nombre important de paramètres d'entrée difficilement accessibles en routine. Sur les figures 37-3 et 37-4 (voir cahier couleur), on montre que les cultures irriguées et les surfaces d'eau libre se distinguent des surfaces sèches. L'analyse de l'histogramme des fréquences des valeurs de flux de chaleur latente montre, par son allure bimodale, une nette distinction entre l'espace humide et l'espace sec. En irrigation, ce terme est utilisé pour vérifier l'homogénéité de l'arrosage. Le coefficient de variation de λE pour la plaine de Bousfer est de l'ordre de 1,06; ceci indique une bonne homogénéité induite principalement par un taux d'humidité élevé de l'air. Aussi, concernant la validité du modèle, la vitesse de frottement, obtenue sur les deux sites d'étude adjacents, est constante : 0,33 $m.s^{-1}$. Également, les vitesses du vent, à 2 m de hauteur, obtenues par les profils logarithmiques, sont quasiment égales à celles mesurées *in situ*; ceci justifie la validité du modèle utilisé.

4. Discussion

En ce qui concerne le diagnostic hydrique des cultures, l'analyse préalable a montré que l'imagerie TM était susceptible de caractériser globalement la répartition spatiale de l'évapotranspiration réelle et par conséquent le repérage des sécheresses à partir de certains indices et paramètres.

Plus précisément, le calcul de l'indice de stress hydrique (CWSI) à l'échelle du pixel s'est avéré étroitement corrélé aux régimes hydriques des cultures (figures 37-5 et 37-6) (voir cahier couleur). L'analyse de la distribution fréquentielle de l'image du CWSI de la plaine de Misserghine (figure 7) montre que plus de la moitié de la surface souffre d'un déficit hydrique plus ou moins fort (CWSI>0,5) (IDSO *et al.*, 1981). Par contre, le confort hydrique (CWSI<0,3), si on excepte la sebkha et les cours d'eau, est représenté sur une très faible superficie.

L'interprétation de la distribution fréquentielle du paramètre (α) de Priestly et Taylor (figure 8) donne un appui solide pour la validation du modèle. Les valeurs de ce paramètre, identifiées dans la littérature (CHOUDHURY *et al.*, 1994; PERRIER, 1987), sont comprises dans un intervalle (0-1,45), sont approximativement représentées dans l'histogramme des fréquences. Les surfaces humides (en confort hydrique) sont distinguées par des paramètres $\alpha \geq 1,26$. En revanche, les surfaces en stress hydrique plus ou moins fort ont des paramètres $\alpha < 0,7$ (PERRIER, 1987).

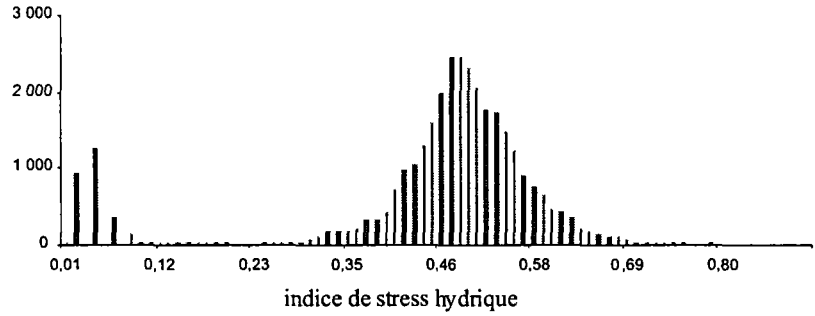


Figure 7. Distribution fréquentielle de l'indice de stress hydrique CWSI : plaine de Misserghine

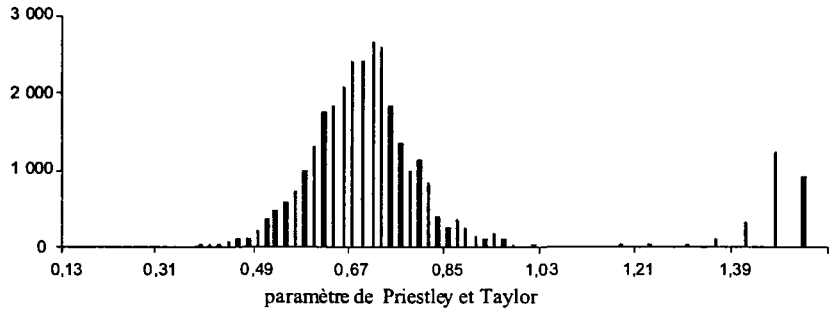


Figure 8. Distribution fréquentielle du paramètre de Priestley et Taylor : plaine de Bousfer

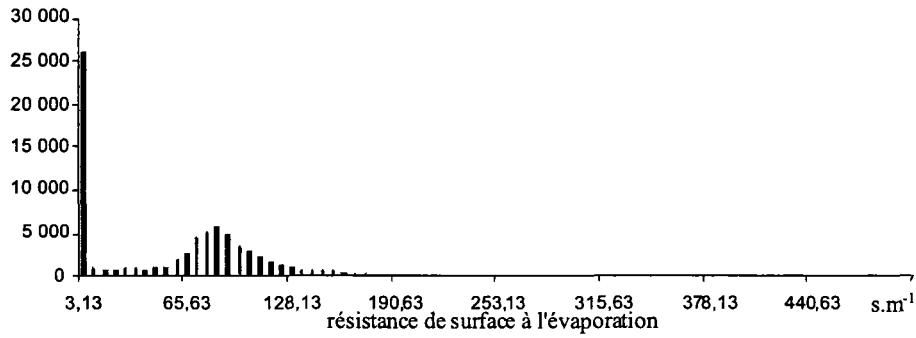


Figure 9. Distribution fréquentielle de la résistance de surface à l'évaporation : plaine de Bousfer

Dans les approches d'estimation de l'évapotranspiration et le pilotage de l'irrigation à l'échelle régionale (VIDAL and PERRIER., 1989), la résistance de surface à l'évaporation est mesurée *in situ.* L'estimation de ce paramètre à partir de l'image, en utilisant ces approches (SEGUIN *et al.*, 1982; VIDAL, 1990), est une opération très complexe car, en plus des données climatiques, s'ajoutent l'évapotranspiration réelle et surtout la résistance au transfert de chaleur qui est généralement absent.

Sur la canne à sucre (périmètre du Gharb, Maroc), VIDAL (1990) a mesuré dans 105 points différents la résistance de surface à l'évaporation pour la relier aux réserves hydriques facilement utilisables. Les mesures s'étalaient entre 10 et 150 $s.m^{-1}$. De même, BASTIAANSSEN (1996) a montré que la distribution fréquentielle de la résistance de surface doit varier dans la gamme (0 et 400 $s.m^{-1}$) et que le pic doit se trouver entre 30 et 150 $s.m^{-1}$. Les résultats sur la figure 9 sont approximativement conformes à cette indication.

5. Conclusion

Les résultats présentés confirment les possibilités offertes par les données satellitaires TM pour résoudre l'équation du bilan d'énergie, d'apprécier l'intensité du stress hydrique, de bien différencier les parcelles soumises aux différents régimes hydriques, de repérer les hétérogénéités intra et interparcellaires et d'en chercher l'origine (stress hydrique, maladies,

salinité, alimentation minérale, etc.). La seule limitation, pour le suivi des irrigations, est la faible fréquence d'acquisition des données satellitaires.

Dans l'attente d'un progrès technologique permettant d'améliorer l'aspect temporel des satellites à haute résolution spatiale, on peut aujourd'hui réaliser la cartographie des unités de sol, considérées sous l'angle du bilan hydrique, à partir de l'imagerie TM de Landsat.

6. Remerciement

Les auteurs remercient l'Office National de la Météorologie (Oran) pour l'acquisition des données climatiques.

7. Références

BASTIAANSSEN, W.G.M. 1996. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain : A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. DLO Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Wageningen, Netherlands, 273 p.

BASTIAANSSEN, W.G.M., HOEKMAN, D.H. and ROEBELING, R.A. 1993. Analysis of land surface exchange processes in two agricultural regions in Spain using Thematic Mapper Simulator data. *in* BOLLE, FEDDES and KALMA (éd). Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales, IAHS Publ. n°212, IAHS Press, Oxfordshire, U.K., p. 407-416.

CHOUDHURY, B.J., IDSO, S.B. and REGINATO, R.J. 1987. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared temperature based energy balance equation. Agricultural and Forest Meteorol., vol. 39, p. 283-297.

CHOUDHURY, B.J., AHMED, N.A., IDSO, S.B., REGINATO, R.J. and DAUGTRY, C.S.T. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studies by model simulations. Remote Sensing of Environment, vol. 50, p. 1-17.

HAMIMED, A. 1997. Extraction des paramètres physiques en relation avec l'irrigation à partir des images de télédétection hautes résolutions : cas des plaines de Bousfer et Misserghine. Thèse de magister, Centre national des techniques spatiales, Arzew, 178 p.

HORIGUCHI, I., TANI, H. and MOTOKI, T. 1992. Accuraåe estimation of 1.5 m-height air temperature by GMS IR data. Proceedings of the 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment, vol. 2, Rio de Janeiro, Brazil, p. 301-307.

IDSO, S.B., JACKSON, R.D., PINTER, J.R., REGINATO, R.J. and HATEFIELD, J.L. 1981. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. Agricultural Meteorology, vol. 24, p. 45-55.

PERRIER, A. 1987. Modélisation des échanges de surface: continuum sol–plante–atmosphère. Climatologie et observations spatiales, Centre national d'études spatiales, École d'été, vol. 1, p. 421-456.

SEGUIN, B., BAELZ, S., MONGET, J.M. et PETIT, V. 1982. Utilisation de la thermographie IR pour l'estimation de l'évaporation régionale I : Mise au point méthodologique sur le site de la Crau. Agronomie, vol. 2, n°1, p. 7-16.

VIDAL, A. and PERRIER, A. 1989. Irrigation monitoring by following the water balance from NOAA-AVHRR thermal infrared data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, n° 5, p. 949-954.

VIDAL, A. 1990. Estimation de l'évapotranspiration par télédétection : Application au contrôle de l'irrigation. Étude du Centre national du machinisme agricole du génie rural des eaux et des forêts, Montpellier, Série Hydraulique Agricole, vol. 8, 180 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 379-384

38

Caractérisation des landes montagnardes dans le Massif Central français à l'aide de l'information satellitale de HRV de SPOT

CHRISTINE JACQUEMINET [1] et GILLES THÉBAUD [2]

[1] *Centre de recherches pour l'aménagement et l'environnement (CRENAM), Université Jean Monnet, 6, rue Basse des Rives, 42023 Saint-Étienne, France; téléphone : (33) 0477421925; télécopieur : (33) 0477421924; courriel : christine.jacqueminet@univ-st-etienne.fr*

[2] *Observatoire du patrimoine naturel d'Auvergne (OPNA), Herbiers de Clermont-Ferrand, 3, boulevard Lafayette, 63 000 Clermont-Ferrand, France; téléphone : (33) 0473421788; courriel : herbiers@univ-bpclermont.fr*

Résumé

L'objet de cette étude est d'analyser l'apport de l'information spectrale pour caractériser des formations végétales dans un secteur de landes montagnardes. Situées au-dessus de la lisière forestière, les Hautes-Chaumes des monts du Forez se composent d'une mosaïque de landes, de pelouses et de tourbières. Traditionnellement exploitées pour le pâturage d'estive, elles subissent une déprise agricole qui se traduit par la colonisation des espèces ligneuses. Deux objectifs sont poursuivis : l'inventaire des formations végétales et l'identification des secteurs touchés par l'extension des ligneux.

La reconnaissance des différents peuplements végétaux a été réalisée à partir de classifications multibandes appliquées à une image HRV de SPOT. En raison de la grande hétérogénéité floristique et physionomique du couvert végétal, une démarche de classification non dirigée a été choisie. La confrontation des résultats de classification avec le terrain a permis de dresser une typologie des formations végétales révélant leur composition en herbacées et ligneux. Cette nomenclature résultant du traitement des données satellitales fait apparaître les différents états de ces formations de landes plus ou

moins dominées par les ligneux. Elle rend également compte de l'exploitation pastorale actuelle, puisqu'une sous-exploitation favorise, entre autres, le regain des ligneux.

1. Introduction

Les Hautes-Chaumes des monts du Forez, situées au nord-est du Massif Central français s'étendent entre 1 200 à 1 634 m d'altitude, entre les étages montagnard et subalpin (> 1 500 m). Ces crêtes ont été défrichées par le passé et présentent aujourd'hui une grande diversité floristique : des pelouses à *Festuca rubra*, des landes à *Calluna vulgaris* (callune) et *Vaccinium myrtillus* (myrtille), quelques massifs arborés (hêtraies, sapinières) et des tourbières. Certains secteurs ont le statut de ZNIEFF (zone naturelle d'intérêt écologique, floristique et faunistique). Les landes et les pelouses sont exploitées en tant que pâturages. À ces parcours, le système traditionnel comportait à proximité des jasseries (bâtiment d'exploitation) des fumades, prairies irriguées et enrichies par la fumure animale, que l'on fauchait. Cette vaste étendue ouverte (environ 9 000 ha) représente l'une des richesses paysagiques et écologiques du parc naturel régional du Livradois-Forez (figure 1).

Actuellement, ces alpages d'altitude subissent une déprise agricole qui se traduit par un abandon progressif des parcelles pâturées ou, au contraire, une surexploitation. L'abandon des pâturages et de la pratique de la fauche favorise le regain des espèces ligneuses de landes (callune), au détriment des pelouses. Une surfréquentation contribue, par le biais du piétinement, au développement d'une herbacée non fourragère, le nard (*Nardus stricta*). On observe également une extension des surfaces forestières par reconquête naturelle, à partir de la lisière forestière, ou par reboisement volontaire.

Cette évolution, naturelle dans le cas d'abandon ou anthropique, menace le maintien de biotopes rares et pose le problème de la fermeture des paysages. L'objectif de cette étude est de réaliser une cartographie exhaustive de la couverture végétale de tout le massif des Hautes-Chaumes afin d'appréhender la diversité écologique et la dynamique des principaux

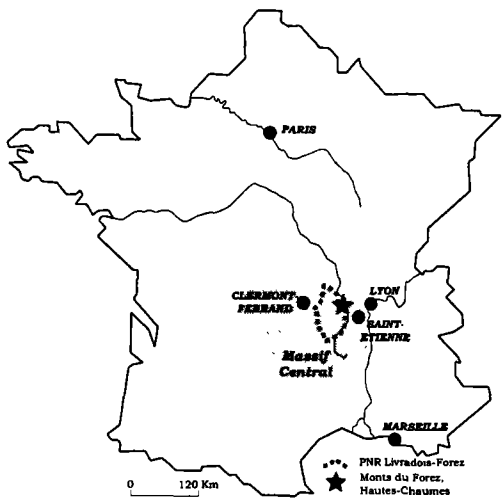


Figure 1. Carte de localisation des Hautes-chaumes des monts du Forez

peuplements. Cette cartographie doit apporter des informations à propos des types de formations végétales présentes et de l'extension des surfaces pâturées et de leur état. Et elle doit permettre de localiser les secteurs soumis à une recolonisation forestière.

2. Données et méthode

Cette recherche a été réalisée à l'aide d'une image satellitale HRV de SPOT (K-J : 045-258) du 24-08-1994 et de photographies aériennes au 1 : 30 000 de 1995. L'image HRV (XS) de SPOT comporte trois bandes spectrales : deux dans le visible et une dans le proche infrarouge.

Plusieurs études phyto-sociologiques (RENARD et PARIS, 1985; ROUMET, 1985; THEBAUD, 1988; TRECUL et DELEFORTRIE, 1986) ont été conduites sur les Hautes-Chaumes. Elles ont donné lieu à une carte de végétation offrant un bon aperçu des espèces présentes. Le recours à une image satellitale permettait d'actualiser cette connaissance acquise. Cependant, la mise en relation de ce document avec les données satellitales a rapidement montré la faible corrélation qui existait entre les peuplements floristiques, tels qu'ils ont été décrits sur la carte de végétation, et les unités spectrales qui ressortaient sur l'image. Les entités floristiques indiquées sur la carte sont loin d'apparaître aussi homogènes sur l'image satellitale et nous ne maîtrisons pas tous les paramètres déterminant les réponses spectrales.

La classification des formations végétales a été menée à l'aide d'une démarche non dirigée. Une part importante de cette étude a consisté à rechercher les clés qui permettent d'interpréter l'image et à fournir une nouvelle typologie de ces peuplements végétaux en fonction de leurs caractéristiques spectrales. Cette interprétation est faite par le biais d'une confrontation des résultats de classifications automatiques avec le terrain et les photographies aériennes. Les classes ayant une signification thématique, reconnue sur le terrain, ont été retenues.

Cette mise en relation constante image-terrain a souligné l'importance des paramètres liés à la physionomie du couvert dans la réponse spectrale de la végétation (CHERPEAU, 1992). Les descripteurs physionomiques déterminants sont les suivants : composition floristique (espèces dominantes et proportions relatives de ligneux et d'herbacées), structure verticale, biomasse chlorophyllienne, taux de recouvrement.

Les classifications ont été réalisées par le biais de la méthode des nuées dynamiques, sur les bandes spectrales brutes, en variant le nombre de classes à chaque essai. Les classes satisfaisantes, observées au cours de ces différentes étapes, ont été extraites. L'image résultante est un ré-assemblage des classes issues des différents essais de classification. L'application d'un filtre de lissage a permis d'homogénéiser le résultat.

3. Résultats

Quatre grands types de formations végétales ont été distingués : les formations forestières composées de ligneux hauts, les landes basses dominées par les chaméphytes, les landes mixtes, composées de chaméphytes et d'herbacées, et les formations herbacées. Parmi ces formations, certains groupements sont décrits en fonction de l'espèce dominante. Les tourbières n'ont pu être reconnues en tant que telles. Les différentes associations hydrophiles les constituant sont associées aux formations précédentes.

Les sols nus ont également été cartographiés. Ils correspondent aux parcelles labourées lors de l'enregistrement de l'image satellitale, aux rochers à nu et aux zones érodées. On remarque que les chemins, bordés par une lande parfois plus dense à leur périphérie immédiate en raison du ruissellement, sont classés en formations de landes mixtes. La résolution spatiale du capteur (20 m) est dans ce cas insuffisante pour les identifier en tant que sols nus.

3.1. Formations forestières

On a pu identifier les feuillus et les conifères. Les espèces arborées et arbustives présentes sur les Hautes-Chaumes sont peu diversifiées. Le sapin est le principal conifère arboré rencontré et parmi les feuillus, sont représentés le hêtre, le bouleau, le sorbier des oiseleurs. Ces ligneux hauts sont identifiés au stade de peuplement dense et au stade de peuplement diffus. Ces peuplements diffus de feuillus (sorbier des oiseleurs, bouleau, alisier) ou de conifères (pin sylvestre, genévrier) correspondent, dans de nombreux cas, à des secteurs touchés par la reconquête des ligneux. L'image classée nous offre ainsi un bon aperçu des secteurs occupés par une végétation forestière et des zones soumises à la recolonisation des ligneux en particulier à proximité de la lisière.

La discrimination entre les feuillus et les conifères s'est avérée relativement aisée sauf dans le cas des jeunes plantations de conifères. Ces dernières n'ont pu être distinguées des peuplements denses de feuillus en raison d'un faible taux de recouvrement des arbres et de la présence d'un sous-bois très dense, composé de myrtilles dont la réponse est proche de celle des feuillus. Les principaux ensembles forestiers apparaissent classés en deux thèmes sur l'image classée. Là aussi, le taux de recouvrement intervient. Cette hétérogénéité traduit différentes générations de plantations ou une réussite mitigée du reboisement.

3.2. Formations de landes

Deux espèces principales sont présentes, sous de multiples associations, dans la composition de ces landes montagnardes et subalpines : la callune et la myrtille. Si dans l'ensemble, les formations végétales n'ont pu être décrites selon leur composition floristique, nous avons néanmoins remarqué que les peuplements à callune se distinguent par une réponse propre. Cette information nous est précieuse, car la callune, espèce conquérante, est un bon marqueur de la dynamique du milieu. La myrtille, également, lorsqu'elle est monospécifique, peut être reconnue spectralement. Par contre, la lande basse et très dense composée de divers ligneux bas (callune, myrtille, genêt) n'a pu être distinguée des peuplements diffus de conifères. C'est une même classe qui représente ces deux formations.

Le principal apport de l'information satellitale réside ici dans la perception de la présence plus ou moins dominante des ligneux bas au sein des landes. Les deux classes, landes mixtes et landes basses traduisent différents états des landes en rapport avec la disparition des herbacées au profit des chaméphytes. Des états que l'on peut mettre en relation avec l'exploitation pastorale. La présence de landes traduit un état avancé d'abandon des activités pastorales. Le moindre pâturage et notamment l'arrêt de la pratique de la fauche favorisent la propagation des chaméphytes (THÉBAUD, 1988).

3.3. Formations herbacées

Cette catégorie regroupe les pelouses dominées par des graminées (*Festuca rubea, Agrostis capillaris).* Elles témoignent d'une pression pastorale forte (THÉBAUD, 1988). Les formations herbacées se différencient par une réponse spectrale propre due à l'absence de ligneux et par un parcellaire bien perceptible sur l'image. Deux types de formations herbacées ont été distingués selon leur hauteur : les herbacées rases et les herbacées hautes.

Les herbacées rases correspondent aux parcelles exploitées à la date d'enregistrement de l'image, c'est-à-dire les parcelles pâturées, les fumades fauchées (prairies fertilisées) et les prairies contaminées par le nard. Le nard développe beaucoup de paille sèche, d'un point de vue spectral, sa réponse traduit une faible activité chlorophyllienne.

Les herbacées hautes indiquent les parcelles de moindre pâturage et les fumades non fauchées.

3.4. Tourbières

Les tourbières ne sont pas identifiées en tant que telles mais associées à d'autres formations végétales. En effet, le couvert végétal des tourbières se compose d'une juxtaposition de formations hydrophiles réparties, dans des cuvettes, en fonction de leur situation par rapport au réseau hydrographique (ETLICHER *et al.*, 1993). Les tourbières foréziennes sont constituées en périphérie et en aval par des bas-marais ou des prairies humides. Les premiers correspondent à des cariçaies (*Carex rostrata, Carex nigra,* etc) et les secondes sont dominées par des graminées (*Molinia coerulea, Festuca rivularis,* etc) ou des joncs (*Juncus acutiflorus*). Sur l'image classée, ces deux entités apparaissent dans la classe « formations herbacées hautes ». Le centre de la tourbière est en général occupé par un haut-marais qui se différencie en auréoles concentriques suivant un gradient d'assèchement. Les stades les plus évolués de ce haut-marais s'intègrent dans la classe « landes très denses » et les stades moins évolués, composés de sphaignes et d'arbrisseaux divers, dans la classe « landes mixtes ». Les secteurs boisés de la tourbière (*Betula pubescens*) sont représentés par la classe « peuplement diffus de conifères ». L'image satellitale offre ici une bonne perception de l'hétérogénéité de ce biotope.

4. Discussion et conclusion

La cartographie des Hautes-Chaumes à l'aide d'une image satellitale a comporté quelques limites. Certains groupements végétaux n'ont pu être différenciés d'un point de vue spectral et n'apparaissent pas dans une classe propre. Par exemple, la lande basse très dense et les peuplements diffus de conifères sont cartographiés dans une même classe; les tourbières sont représentées dans plusieurs classes. L'utilisation d'une image enregistrée à une autre date ou d'une image offrant une bande spectrale dans le moyen infrarouge, dans le cas des tourbières, aiderait à lever ces confusions.

Par contre, la résolution spatiale du capteur n'est apparue trop faible que dans des cas très restreints : les reboisements de taille réduite et les chemins non érodés.

La reconnaissance des formations végétales sur image satellitale est dépendante et étroitement liée aux études réalisées au sol. L'inventaire phyto-sociologique, grâce à la connaissance des espèces et des groupements présents, a facilité l'interprétation de l'image sur le terrain. Cette connaissance a permis d'analyser l'information spécifique apportée par

le capteur à propos de la structure des peuplements végétaux. En association avec ce travail de terrain, la méthode adoptée ici s'avère reproductible.

L'un des apports majeurs de l'information satellitale réside dans la perception de la physionomie des couverts végétaux et en particulier dans l'appréhension de la proportion de ligneux au sein de ces formations végétales. Cette connaissance permet de saisir de façon fine le processus de recolonisation par les ligneux aussi bien dans le cas des ligneux bas des landes que dans le cas des ligneux hauts des lisières forestières. Les secteurs les plus touchés sont facilement décelables.

Par ailleurs, l'image fournit un constat réel des parcelles pâturées et de leur état par le biais du parcellaire et de la nature des formations végétales occupant ces surfaces. Cette information permet à la fois de suivre l'activité pastorale et d'étudier son impact sur la couverture végétale.

L'image classée rend compte des variations fines de la couverture végétale et de sa plus ou moins grande diversité. L'hétérogénéité des formations végétales est un indicateur de la richesse écologique du milieu. On remarquera cependant, que cette richesse n'est perçue que d'un point de vue structural. La diversité floristique des groupements végétaux, leur valeur fourragère associée aux espèces, n'ont pu être analysées à l'aide des données satellitales.

Enfin, cette recherche basée sur l'exploitation d'une seule image se révèle prometteuse pour mener un suivi diachronique de ce secteur.

5. Références

BESSENAY, C. 1995. La gestion des données environnementales dans un espace naturel sensible : le système d'information géographique des Hautes-Chaumes foréziennes. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Étienne, 237 p.

CHERPEAU, A. 1992. Télédétection et agroécologie, un essai de cartographie destinée à la gestion des milieux herbacés de haute montagne. Application au Parc national des Écrins. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble I, 230 p.

ETLICHER, B. (dir.), BESSENAY C., COUHERT J.-P., FAURY O., FRANCEZ A.-J., SOURP E., SUCHEL J.-B., THÉBAUD G. 1993. Les Hautes Chaumes du Forez : diagnostic écologique pour la gestion d'un espace sensible. Centre d'Études Foréziennes, Parc naturel régional du Livradois Forez, Publications de l'Université de Saint-Étienne, Saint-Étienne, 159 p.

RENARD, F. et PARIS F. 1985. Réflexions sur l'aménagement des Hautes-Chaumes du Forez d'après la cartographie de sa végétation. Mémoire de fin d'études de maîtrise, Université de Rennes I, 132 p.

ROUMET, C. 1985. Cartographie de la végétation des Hautes-Chaumes de la commune de Saint Pierre la Bourlhonne. Mémoire de fin d'études de maîtrise, Université Rennes I, 105 p.

THÉBAUD, G., 1988. Le Haut-Forez et ses milieux naturels : apports de l'analyse phytosociologique pour la connaissance écologique et géographique d'une moyenne montagne cristalline subalpine. Thèse de doctorat d'état, Université de Clermont Ferrand II, 330 p.

TRECUL, C. et DELEFORTRIE, J. 1986. Cartographie de la végétation des Hautes-Chaumes sur les communes de Job et de Valcivières. Mémoire de fin d'études, École Nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles de Clermont Ferrand, 82 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 385-394

39

Nouvel algorithme de calcul des paramètres de texture appliqué à la classification d'images satellitaires

ASSIA KOURGLI et AICHOUCHE BELHADJ-AISSA

Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des Sciences et de la Technologie de Houari Boumediene , B.P. 32, El Alia, Bab-Ezzouar, 16111 Alger, Algérie; téléphone: 213.2.24.79.50/65 poste : 806; télécopieur : 213.2.24.28.02; courriel : a.kourgli@mailcity.com

Résumé

Nous présentons un nouvel algorithme de calcul des paramètres de texture issus des matrices de co-occurrence de niveaux de gris (MCNG) qui permet de réduire les temps de calcul et l'espace-mémoire à allouer pour les différents programmes. Cet algorithme repose sur le calcul de fréquences d'occurrence des niveaux de gris par des histogrammes équivalents. Les éléments calculés par ces histogrammes équivalents sont : la moyenne, la variance, l'énergie, l'inertie, la corrélation, le groupe de nuances (*cluster shade*) et le groupe de prédominances (*cluster prominence*). Pour évaluer cette méthode, nous avons estimé ces paramètres à partir des matrices symétriques et à partir de la nouvelle formulation, pour une image contenant 256 niveaux de gris avec une fenêtre d'analyse de taille 5 x 5. Les gains en espace-mémoire sont de l'ordre de 1/256 pour les paramètres moyenne, variance et corrélation et de l'ordre de 1/128 pour les paramètres inertie et groupe de nuances. Pour un Pentium II avec une vitesse de 350 Mhz, le gain en temps de calcul est de l'ordre de 1/20. Comme application, nous avons utilisé les nouvelles formulations des paramètres de texture dans un processus de classification texturale.

1. Introduction

En imagerie, la texture est liée aux variations d'intensité locales d'une zone. Elle est définie par les relations spatiales que possèdent des niveaux de gris voisins. Il existe diverses méthodes d'analyse, de discrimination et de classification de texture. Elles se basent principalement sur l'analyse et la quantification des paramètres statistiques évalués sur le voisinage du pixel traité (approche statistique) ou sur la description des primitives de la texture et la structure locale (approche structurale) (GOOL *et al.*, 1985; REED and HANS DU BUF, 1993; KOURGLI et BELHADJ, 1997). L'approche par les matrices de co-occurrence des niveaux de gris (MCNG) est une approche statistique puissante car la MCNG contient une information texture-contexte plus importante que celle contenue dans tout autre matrice intermédiaire (CONNERS and HARLOW, 1980). En effet, cette méthode à été utilisée avec succès dans divers domaines d'application (imageries satellitaire, biomédicale, etc.) (HARALICK, 1986).

2. Matrices de co-occurrence

L'évaluation de la MCNG dans une image est réalisée par l'estimation des fonctions de densité de probabilités conditionnelles conjointes de second ordre $p(i, j \mid d, \theta)$. On définit la MCNG $\phi(d,\theta)$ (θ = 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°) dont les éléments $p(i, j \mid d, \theta)$, notés pij représentent la fréquence d'occurrence de la paire de niveaux de gris (i,j) dans un voisinage de taille S : M x N suivant une relation R définie par (d, θ) soit:

$$p(i,j \mid d,\theta) = \text{card } \{ (m,n),(k,l) \in S \,/\, I(m,n) = i \text{ et } I(k,l) = j \}$$

On peut considérer les quatre directions principales (0°, 45°, 90°, 135°). Ainsi, chaque élément de la matrice directionnelle est calculé par l'expression :

$$S_\theta(d) = 1/2[\phi(d,\theta) + \phi(d,\theta + 180°)],$$
$$= 1/2[\phi(d,\theta) + \phi^t(d,\theta)].$$

Introduite par HARALICK *et al.* (1973), l'approche statistique par les MCNG a été utilisée pour fournir un ensemble de 14 paramètres statistiques décrivant la texture des images (GOTLIEB and KREYSZIG, 1990). Cependant, les images générées par ces éléments présentant un certain degré de corrélation entre eux, on restreint l'utilisation aux 7 paramètres qui donnent les images les plus décorrélées (HARALICK, 1979; UNSER, 1986) soit : la moyenne, la variance, l'énergie, l'entropie, l'inertie, la corrélation et l'homogénéité locale. CONNERS and HARLOW (1980) préconisent en outre l'utilisation de deux paramètres supplémentaires : le groupement de nuances et le groupement de prédominances (tableau 1).

3. Nouvel algorithme de calcul des paramètres de texture

Bien que très intéressante et donnant de bons résultats de discrimination texturale, l'approche par les MCNG, une fois introduite, présente deux inconvénients majeurs : un temps de calcul considérable et l'allocation d'une grande taille-mémoire.

Tableau 1. Paramètres de texture. À gauche la formulation classique (expression) des paramètres de texture issus de la MCNG et à droite le nouvelle formulation (nouvelle expression) définie à partir des fréquences d'occurrence.

Paramètre	Expression	Nouvelle expression
1. Moyenne	$\mu_x = \sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{L-1} i \times \frac{pij}{N} = \mu_y$	$\mu_x = \sum_{i=0}^{L-1} \frac{i \times occ(i)}{N} = \mu_y$
2.Variance	$\sigma_x^2 = \sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{L-1} (i-\mu_x)^2 \frac{pij}{N}$	$\sigma_x^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i-\mu_x)^2 \frac{occ(i)}{N}$
3. Inertie	$I = \sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{L-1} (i-j)^2 \times \frac{pij}{N}$	$2\sum_{i=0}^{L-1} i^2 \frac{occ(i)}{N} - 2\sum_{i=0}^{L-1} i \frac{occ'(i)}{N}$
4. Corrélation	$\sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{L-1} \frac{(i-\mu_x)(j-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} \times \frac{pij}{N}$	$\frac{1}{\sigma_x^2}\left(\sum_{i=0}^{L-1} \frac{i \times occ'(i)}{N} - \mu_x^2\right)$
5. Groupe de nuance	$\sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{L-1} (i+j-\mu_x-\mu_y)^3 \frac{pij}{N}$	$2\sum_{i=0}^{L-1} (i-\mu_x)^2 \left(\begin{array}{l} (i-4\mu_x)\frac{occ(i)}{N} \\ +3\frac{occ'(i)}{N} \end{array} \right)$
6. Groupe de prédominance	$\sum_{i=0}^{L-1}\sum_{j=0}^{L-1} (i+j-\mu_x-\mu_y)^4 \frac{pij}{N}$	$2\sum_{i=0}^{L-1} (i-\mu_x)^2 \times \left(\begin{array}{l} (i^2-6i\mu_x+8\mu_x^2)\frac{occ(i)}{N} + \\ (4i-10\mu_x)\frac{occ'(i)}{N} + 3\frac{occ''(i)}{N} \end{array} \right)$

Avec $occ'(i) = \sum j$ *et* $occ''(i) = \sum j^2$ *suivant* $R(d,\theta)$

Divers auteurs se sont penchés sur ce problème, lui trouvant chacun une solution propre. Ainsi, UNSER (1986) remplace la MCNG par la somme et la différence d'histogrammes en se basant sur une hypothèse de stationnarité. MARCEAU *et al.* (1990) proposent une approche texturale/spectrale pour la classification de. différents thèmes et adoptent la réduction du niveau de quantification (16 et 32 au lieu de 256). PECKINPAUGH (1991) décrit un algorithme de calcul des paramètres de texture avec un gain de temps appréciable. Nous proposons, ici, un nouvel algorithme pour calculer certains paramètres de texture par le biais de différents histogrammes.

3.1. Méthodologie

3.1.1. Calcul du paramètre moyenne

Pour illustrer notre démarche, nous prenons l'exemple du calcul de l'élément moyenne. En effet, pour une fenêtre 'F' de taille N_l x N_c = 3 x 3 et une MCNG 'M' symétrique suivant la relation R : (d,θ) la moyenne s'exprime comme suit (tableau 1) :

$$\mu_x = \sum_{i=0}^{L-1} i \sum_{j=0}^{L-1} \frac{pij}{N}$$

Pour une normalisation appropriée chaque probabilité p_{ij} doit être divisée par le nombre total 'N' des p_{ij}. Par exemple, à la fenêtre F correspondant la MCNG : M pour R : (1,0°)

$$F: \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad M: \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 2 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

Dans ce cas, $N = 2 \times N_l \times (N_c - 1) = 2 \times 3 \times 2 = 12$ et $\mu_x = \sum_{i=1}^{3} i \sum_{j=1}^{3} \frac{p_{ij}}{12}$

$$\mu_x = \frac{(1\times(2+1+2)+2\times(1+0+2)+3\times(2+2+0)}{12} = \frac{(1\times5+2\times3+3\times4)}{12} = \frac{23}{12}$$

Notons, en particulier, que Σp_{ij} pour un 'i' donné représente la probabilité d'occurrence du niveau de gris 'i' dans la fenêtre suivant F1, additionné à la probabilité d'occurrence du niveau de gris 'i' dans la fenêtre F2 (puisque l'on considère une matrice symétrique) :

$$F1(d=1,\theta=0°) : \begin{bmatrix} 1 & 2 & * \\ 2 & 3 & * \\ 3 & 1 & * \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad F2(d=1,\theta=180°) : \begin{bmatrix} * & 2 & 3 \\ * & 3 & 1 \\ * & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Ainsi, occ(1) = 2 + 3 = 5, occ(2) = 2 + 1 = 3 et occ(3) = 2 + 2 = 4.

En règle générale, pour une fenêtre F, le calcul de occ(i) revient à sommer les fréquences des occurrences de 'i' suivant R (d,θ) dans cette fenêtre :

occ(i) = fréquence d'occurrence (i) suivant R(d,θ)

Évaluer μ_x, revient à multiplier chaque niveau de gris de la fenêtre image par la fréquence d'occurrence lui correspondant :

$$\mu_x = \sum_{i=1}^{3} \frac{i \times occ(i)}{12} = \frac{(1\times5+2\times3+3\times4)}{12} = \frac{23}{12}$$

ce qui nous donne la nouvelle formulation de μ_x : $\mu_x = \sum_{i=0}^{L-1} \frac{i \times occ(i)}{N}$

De la même façon, il nous est possible d'estimer d'autres paramètres de texture moyennant le calcul des fréquences d'occurrence sur les fenêtres adéquates.

3.1.2. Calcul du paramètre variance

Pour le calcul du paramètre variance, nous procédons de la même façon. À l'origine, la variance est définie par :

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - \mu_x)^2 \sum_{j=0}^{L-1} \frac{pij}{N} \quad \text{et devient} \quad \sigma_x^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - \mu_x)^2 \frac{occ(i)}{N}$$

3.1.3. Calcul du paramètre corrélation

Sachant que, pour une matrice symétrique, nous avons la définition suivante de la corrélation :

$$C = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{(i - \mu_x)(j - \mu_x)}{\sigma_x \cdot \sigma_x} \frac{pij}{N} = \frac{1}{\sigma_x^2} \left(\sum_{i=0}^{L-1} i \sum_{j=0}^{L-1} j \frac{pij}{N} - \mu_x^2 \right)$$

Reconsidérons le même exemple pour lequel nous allons estimer :

$$\sum_{i=1}^{3} i \sum_{j=1}^{3} j \frac{pij}{N} = \frac{[1 \times (1 \times 2 + 2 \times 1 + 3 \times 2)] + [2 \times (1 \times 1 + 2 \times 0 + 3 \times 2)] +}{12}$$

$$\frac{[3 \times (1 \times 2 + 2 \times 2 + 3 \times 0)]}{12} = \frac{(1 \times 10) + (2 \times 7) + (3 \times 6)}{12} = \frac{42}{12} = \frac{7}{2}$$

Nous notons, Σjp_{ij} pour un 'i' donné représente la somme des 'j' pour lesquels la relation R (d, θ) est vérifiée, ce qui revient à considérer les deux fenêtres F1 et F2 :

$$F1(d = 1, \theta = 0°) : \underset{(i,j)}{\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}} \quad \text{et} \quad F2(d = 1, \theta = 180°) : \underset{(j,i)}{\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}}$$

Pour une fenêtre F, le calcul de occ'(i) revient à sommer pour chaque 'i' les 'j' suivant R (d,q) dans cette fenêtre : occ'(1) = Sj suivant R (d,q).

Ainsi $occ'(1) = (2+1)_{F1} + (3+3+1)_{F2} = 10$,

$occ'(2) = (3+3)_{F1} + (1)_{F2} = 7$,

$occ'(3) = (1+1)_{F1} + (2+2)_{F2} = 6$.

$$\sum_{i=1}^{3} i \sum_{j=1}^{3} j \frac{pij}{N} = \sum_{i=1}^{3} \frac{i \times occ'(i)}{12} = \frac{(1 \times 10 + 2 \times 7 + 3 \times 6)}{12} = \frac{7}{2}$$

ce qui nous donne la nouvelle formulation de la corrélation :

$$C = \frac{1}{\sigma_x^2}\left(\sum_{i=0}^{L-1}\frac{i \times occ'(i)}{N} - \mu_x^2\right).$$

En se basant sur le même principe, nous calculons les paramètres inertie, groupe de nuances et groupe de prédominances (tableau 1).

3.2. Évaluation

Les paramètres que l'on peut estimer grâce à cet algorithme sont des paramètres faisant intervenir des sommations directes sur les probabilités d'occurrence. Sur le tableau 1, on donne les nouvelles formulations (nouvelle expression) des paramètres calculés suivant cet algorithme pour une matrice symétrique. Les autres éléments, tels que l'énergie, l'entropie et l'homogénéité locale, font intervenir des calculs sur les probabilités prises individuellement. On ne peut alors appliquer cette méthode pour les estimer.

L'évaluation de cet algorithme a été faite sur une image de taille 512 x 512 avec une fenêtre d'analyse est de taille 5 x 5 suivant R (1,0°). Nous donnons, sur le tableau 2, les résultats obtenus en utilisant un PC (Pentium II) cadensé une vitesse de 350 Mhz. Nous remarquons qu'en règle générale les gains en temps de calcul et en espace-mémoire sont importants.

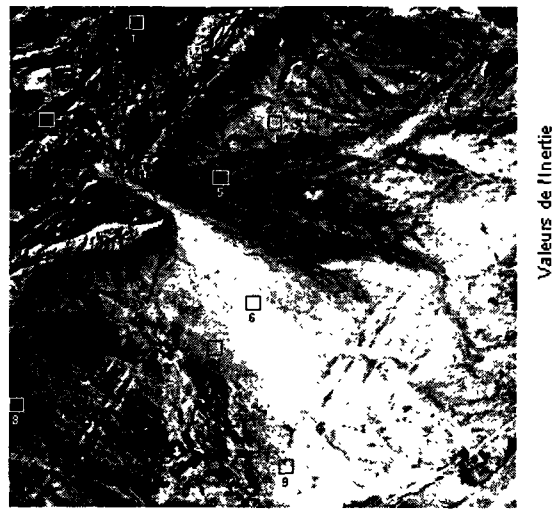
4. Classification texturale

La classification texturale se base sur un critère de similarité entre les unités à classifier. La méthode de classification que nous avons adoptée repose sur le calcul de signatures texturales dans un voisinage (WELCH *et al.*, 1990). Les paramètres de texture (tableau 1 : nouvelle expression) sont calculés pour différentes distances de pixels et permettent d'établir une signature texturale (KOURGLI and BELHADJ-AISSA, 1999). Sur la figure 2, on présente les signatures texturales de trois échantillons pris de notre image test (figure 1).

Pour l'image-test utilisée, nous avons pris 9 échantillons (classes) de taille 15 x 15 pour lesquels les signatures texturales ont été calculées. Pour chaque pixel central d'une fenêtre

Tableau 2. Comparaison des temps de calcul et de l'allocation-mémoire, pour une image de taille 512 x 512 avec une fenêtre d'analyse de taille 5 x 5 suivant R (1,0°).

	Temps de calcul		Allocation-mémoire (x nombre d'octets)	
Paramètre	Méthode classique	Méthode proposée	Méthode classique	Méthode proposée
Moyenne	2 min. 27 s	5 s	256256	256
Variance	2 min. 30 s	10 s	//	256
Inertie	2 min. 35 s	8 s	//	512
Corrélation	4 min. 54 s	11 s	//	256
Groupe de nuances	4 min. 54 s	16 s	//	512
Groupe de prédo.	5 min. 09 s	22 s	//	768



(1 cm = 85 pixels)

Figure 1. Image-test et sites-échantillons. L'image-test utilisée est extraite d'une scène de TM de Landsat du sud de l'Algérie avec les 9 sites-échantillons de taille 15 x 15 utilisés pour la classification texturale à partir des signatures texturales.

T x T de l'image, la signature texturale est établie et comparée à celles des échantillons. Le pixel est alors affecté à la classe la plus proche (KOURGLI and BELHADJ-AISSA, 1999). Il est important de noter que le regroupement se fait sur la base de similarité texturale : cela signifie que des zones sont identiques parce qu'elles présentent la même texture même si leur réponse spectrale est différente. Concernant la classification à partir du paramètre

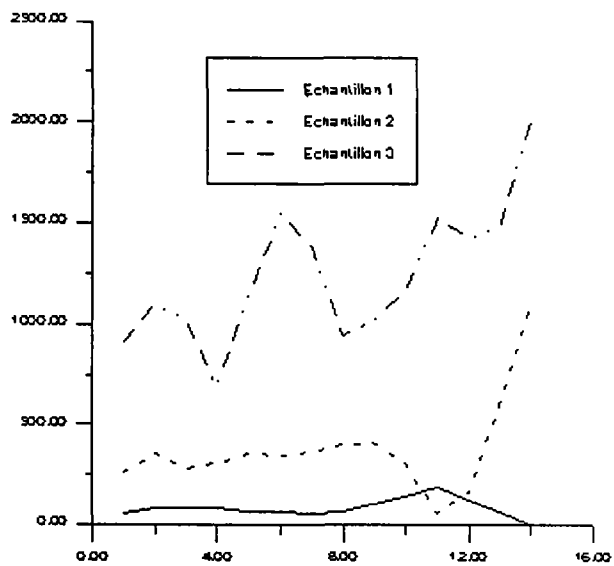


Figure 2. Signature de l'indice d'inertie texturale des sites-échantillons 1, 2 et 3 par le paramètre inertie

moyenne (figure 3a), le spectre tient compte de l'intensité des pixels (de par son expression). Nous remarquons que les limites entre les différentes zones sont bien apparentes. Ainsi, pour tout autre élément que la moyenne, on ne repère qu'une information texturale, le calcul de ces paramètres étant basé sur les variations des intensités d'une zone plutôt que sur les intensités propres. Pour les images classifiées par les signatures texturales des paramètres inertie (figure 3b), groupe de nuances (figure 3c), et groupe de prédominances (figure 3d), les zones les plus homogènes possèdent une signature dont les valeurs sont faibles et qui évoluent peu en fonction de la distance. Ainsi, les images présentent les zones correspondant à une palette allant de zones plus ou moins homogènes aux zones hétérogènes (noir au blanc).

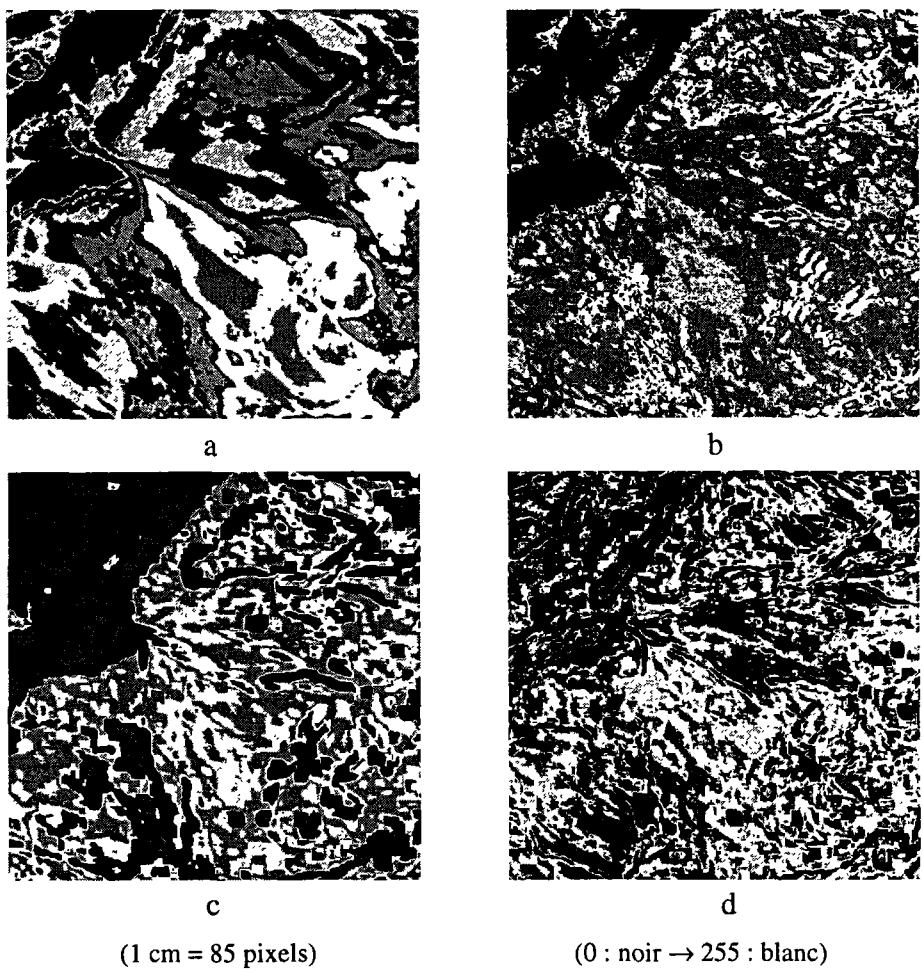


Figure 3. Résultats de classification de l'image-test par les signatures texturales des paramètres : a) moyenne, b) inertie, c) groupe de nuances et d) groupe de prédominances sur la base des 9 sites-échantillons.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un nouvel algorithme permettant de calculer six paramètres de texture déduits de la MCNG en réduisant considérablement le temps de calcul et la taille-mémoire requise pour les différents programmes. Cet algorithme est basé sur le calcul de fréquences d'occurrence simples au lieu des co-occurrences classiques et la nouvelle formulation des paramètres est une sommation de ces occurrences permettant de manipuler des vecteurs au lieu de matrices.

Cette nouvelle formulation nous a permis d'utiliser les signatures de texture dans un processus de classification texturale. En effet, le programme a un temps d'exécution de 3 à 7 min. sur un Pentium II 350, alors que, suivant l'ancienne formulation, il aurait pris des heures. Les résultats obtenus permettent d'identifier des textures similaires. En effet, deux zones peuvent présenter une même texture sans pour cela qu'il s'agisse du même thème. Il reste à interpréter les résultats obtenus afin d'identifier les zones de l'image suivant leur texture et à évaluer l'apport d'une telle classification dans la caractérisation thématique des états de surface.

6. Références

CONNERS, R.W. and HARLOW, C.A. 1980. A theoretical comparison of texture algorithms. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-2, no 3, p. 204-222.

GOOL, L.V., DEWAEL, P. and AOOSTERLINCK, A. 1985. Texture analysis anno 1983 survey. Computer Vision Graphics and Image Processing, vol. 29, p. 336-357.

GOTLIEB, C.C. and KREYSZIG, H.E. 1990. Texture descriptors based on co-occurrence matrices. Computer Vision Graphics and Image Processing, vol. 51, p. 70-86.

HARALICK, R.M., SHANMUGAM, K. and DINSTEIN, I. 1973. Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-3, n° 6, p. 610-621.

HARALICK, R.M. 1979. Statistical and structural approaches to texture. Proceedings IEEE, vol. 67, p. 786-804.

HARALICK, R.M. 1986. Statistical image texture analysis. Chapter 11, Handbook of pattern recognition and image processing. Academic Press, p. 247-279.

KOURGLI, A. et BELHADJ-AISSA, A. 1997. Approche structurale de génération d'images de texture. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n° 17, p. 3611-3627.

KOURGLI, A. and BELHADJ-AISSA, A. 1999. Textural classification using textural signatures. EARSel 19th symposium 'Economic an environmental applications' 31 May-2 June 1999, Valladolid, Spain, Sous-presse.

MARCEAU, D.J., HOWARTH, P.J., DUBOIS, J-M. and GRATTON, D.J. 1990. Evaluation of the grey-level co-occurence matrix method for land cover classification using SPOT imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, n° 4, p. 513-518.

PECKINPAUGH, S.H. 1991. An improved method for computing grey-level co-occurence matrix based texture measures. CVGIP : Graphical Models and Image Processing, vol. 53, n° 6, p. 574-580.

REED, T.R. and HANS DU BUF, J.M. 1993. A review of recent texture segmentation and feature extraction techniques. CVGIP : Image Understanding, vol. 57, n° 3, p. 359-372.

UNSER, M. 1986. Sum and difference histogram for texture classification. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-8, n° 1, p. 118-125.

WELCH, R.M., KUO, K.S., and SENGUPTA, S.K. 1990. Cloud and surface textural feature in polar regions. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, n° 4, p. 520-527.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 395-403

40

Utilisation des images TM de Landsat pour estimer la variabilité spatiale de l'humidité du sol destinée aux modèles hydrologiques spatialisés : application au delta du Sénégal

MEDOU LO [1] et INGE SANDHOLT [2]

[1] *Centre de suivi écologique, B.P. 15530, Dakar, Sénégal; téléphone : +221 825-80-66, télécopieur +221 825-81-68; courriel : medou@cse.sn*

[2] *Institut de géographie de l'Université de Copenhague, Ostervoldgade, 10, DK-1350, Copenhague, Danemark; téléphone : +45 35-32-25-00; télécopieur : +45 35-32-25-01; courriel : is@geogr.ku.dk*

Résumé

Sont présentés dans cet article les premiers résultats de l'estimation de la variabilité spatiale d'un indice de sécheresse (TVDI : *Temperature-vegetation-dryness index*) basé sur une relation entre la température de surface (Ts) et un indice de végétation par la différence normalisée (NDVI : *Normalized difference vegetation index*). Le TVDI fait référence aux conditions d'humidité du sol et les informations utilisées pour son estimation sont obtenues uniquement par télédétection. L'évolution spatiale de cet indice est analysée en utilisant une image TM de Landsat du 4 avril 1994 couvrant une partie du delta du fleuve Sénégal et ses environs dans la zone nord semi-aride du Sénégal. La dualité entre le delta proprement dit et ses bordures est nettement ressortie par les résultats de l'analyse. Dans les terres sableuses qui bordent le delta, les valeurs du TVDI sont élevées avec une variation spatiale très faible. Par contre, dans le delta proprement dit ces valeurs sont relativement faibles avec une variation spatiale plus ou moins importante. La méthode utilisée est très simple et semble prometteuse au vu des informations pertinentes qu'elle fournit. Elles seront utilisées dans le modèle hydrologique spatialisé MIKE SHE (système hydrologique

européen). Le TVDI peut également être utilisé dans les modèles d'estimation de la biomasse ou comme paramètre dans les systèmes d'alerte précoce.

1. Introduction

La gestion de larges bassins versants requiert l'établissement de modèles hydrologiques, permettant de simuler les conséquences de modification des conditions physiques. Les modèles hydrologiques, et particulièrement les modèles spatialisés, exigent un apport régulier de nombreuses données d'entrée. Généralement, ces demandes ne peuvent être entièrement satisfaites, notamment lorsqu'il s'agit d'un bassin versant qui traverse plusieurs pays où les informations environnementales, si elles existent, sont à des niveaux de détails différents. Il est possible de contourner cette difficulté majeure en travaillant sur la base des enregistrements standardisés et réguliers des satellites d'observation de la Terre. C'est ainsi que le Centre de suivi écologique (CSE), l'Institut de géographie de l'Université de Copenhague (IGUC), le Département d'hydrodynamique et des ressources en eau de l'Université Technique de Copenhague (ISVA, DTU) et l'Institut d'hydraulique danois (DHI) ont élaboré un projet de recherche (INTEO : *Integration of Earth Observation data in hydrological models*) consacré à l'intégration des données de télédétection au modèle hydrologique spatialisé MIKE SHE (système hydrologique européen) pour le suivi du bassin du fleuve Sénégal.

L'approche de INTEO s'effectue à deux échelles. Un modèle basé sur l'utilisation des données satellitales à moyenne et basse résolutions est en train d'être calibré à l'échelle de l'ensemble du bassin versant du fleuve Sénégal partagé entre le Sénégal, la Mauritanie, le Mali et la Guinée. Par contre, à l'échelle de la vallée où l'agriculture irriguée est une activité importante, sera développé un modèle plus détaillé basé sur l'utilisation des données satellitales à haute résolution en combinaison avec les données AVHRR de NOAA.

C'est à l'échelle de la vallée du fleuve Sénégal, et plus précisément dans la partie est du delta (figure 1), que nous avons analysé la relation entre la température de surface (Ts) et l'indice de végétation (NDVI : *Normalized difference vegetation index*) pour estimer la variabilité spatiale de l'humidité du sol par télédétection. Pour cela, nous avons utilisé une image TM de Landsat du 4 avril 1994.

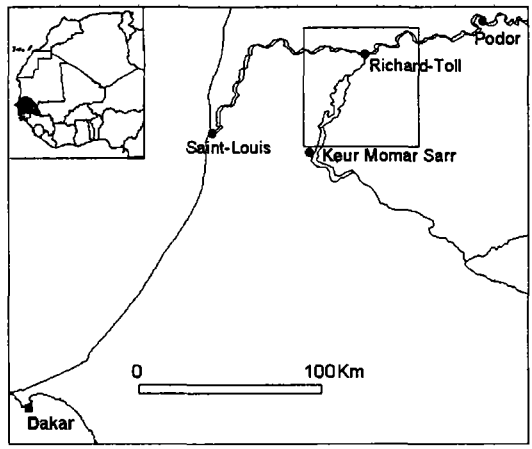


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

2. Revue bibliographique

De nombreuses publications ont porté sur l'importance de la relation Ts/NDVI pour obtenir des informations sur les différents états de surface du sol. Il ressort de la revue bibliographique de SANDHOLT *et al.* (1999) que les informations complémentaires du canal thermique et ceux du visible/proche infrarouge s'avèrent bien convenir pour le suivi de l'état de la végétation, particulièrement en rapport avec l'humidité du sol. L'indice NDVI est un indicateur classique pour étudier le stress de la végétation. En effet, la sénescence de la végétation est en étroite relation avec la quantité d'eau disponible dans le sol. La température de surface du sol constitue également un indicateur pertinent pour estimer l'humidité du sol. Pour un même type de sol ayant la même couverture, la température de surface décroît avec l'augmentation de l'humidité du sol.

Plusieurs études ont mis l'accent sur la pente de la courbe Ts/NDVI (NEMANI and RUNNING, 1989; SMITH and CHOUDHURY, 1991; MORAN *et al.*, 1994; FRIELD and DAVIS, 1994). Cette pente est relative à l'évapotranspiration (figure 2) et elle a été utilisée pour estimer la température de l'air (PRIHODKO and GOWARD, 1997) et PRINCE *et al.* (1998). Sur la figure 2, on montre l'espace conceptuel Ts/NDVI comme étant un triangle dans lequel Ts est une fonction de NDVI. En effet, à mesure que la biomasse augmente le long de l'abscisse (NDVI), la température maximale de surface diminue. Ainsi, la bordure correspondant au côté du triangle représente les sols nus, répartis des plus secs aux plus humides suivant le sens descendant. Et à mesure que l'on avance vers la partie droite du triangle, la couverture végétale du sol augmente. Les isolignes illustrent l'évolution de

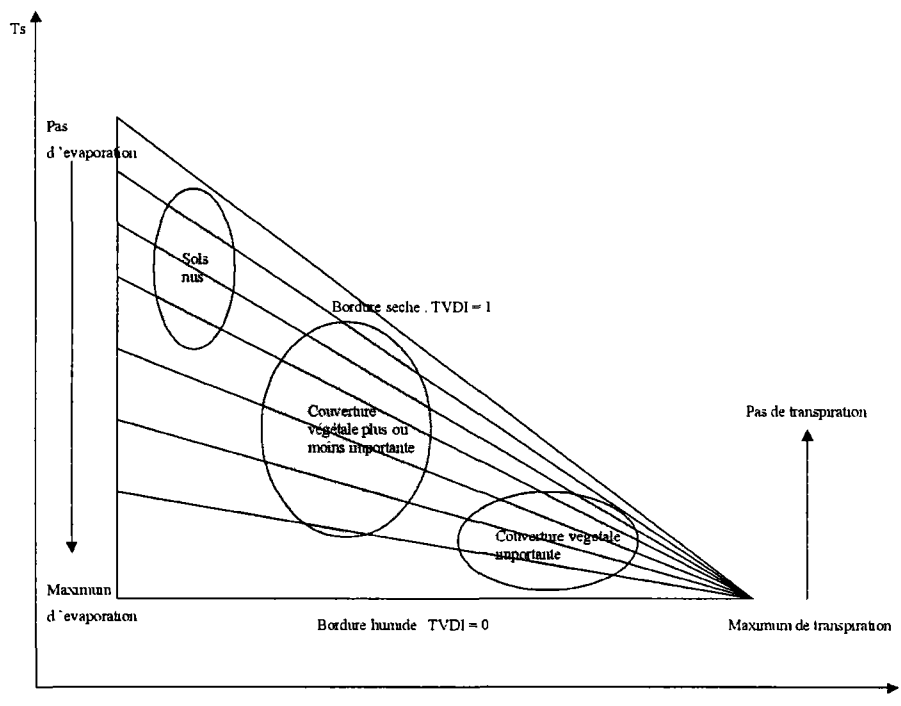


Figure 2. Schéma conceptuel de l'indice de sécheresse (TVDI) d'après LAMBIN et EHRLICH (1996) repris par SANDHOLT *et al.* (1999).

l'indice de sécheresse dans l'espace. Elles montrent également que l'indice de sécheresse est plus sensible à l'évolution de la température de surface dans les milieux où le NDVI est élevé.

3. Méthode

Suivant le schéma conceptuel de la figure 2, la limite supérieure du triangle définit les types de surface où la réserve en eau du sol est limitée (bordure sèche); par contre, la limite inférieure correspond aux types de surface où les conditions d'alimentation en eau sont bonnes (bordure humide). Ainsi, pour avoir des informations relatives à l'humidité du sol, un indice de sécheresse (TVDI : *Temperature-vegetation-dryness index*), ayant la valeur 1 sur la bordure sèche et la valeur 0 sur la bordure humide, peut être défini comme suit :

$$TVDI = (Ts - Ts_{min})/(aNDVI + b - Ts_{min})$$

où :

Ts est la température de surface du pixel;

Ts_{min} est la température de surface minimum dans le triangle;

NDVI est l'indice de végétation du pixel;

a et b sont les coefficients de l'équation définissant la droite de régression qui constitue le bord supérieur du triangle (Ts = aNDVI + b).

La température de surface est calculée à partir du canal thermique du TM en utilisant l'algorithme suivant (WUKELIC *et al.*, 1989) :

$$Ts = K2 / Log(K1/R+1)$$

où :

K2 = 1260,56 (pour TM);

K1 = 607,76 (pour TM);

R = 0,0056322*DN+0,1238 (DN est la valeur du pixel).

L'indice de végétation par la différence normalisée (NDVI) est calculé en utilisant le canal rouge (R) et celui du proche infrarouge (PIR) du TM selon la formule classique :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R).$$

Afin de mieux estimer les paramètres *a* et *b*, on doit travailler sur une zone suffisamment large regroupant plusieurs types d'état de surface (sec, humide, présence et absence de végétation, etc.).

Cette méthode d'estimation de l'indice de sécheresse est fondée sur les hypothèses suivantes :

- le volume de la réserve en eau du sol est le facteur principal dans la variation de la température de surface;
- TVDI est relatif aux variations d'humidité du sol liées à l'inertie thermique, à l'évaporation et à l'évapotranspiration.

Cette méthode d'estimation de l'indice de sécheresse montre un avantage particulier : elle n'exige pas de données auxiliaires alors que d'autres approches, comme celle décrite par MORAN *et al.* (1994), demandent des informations assez détaillées concernant les conditions météorologiques et aérodynamiques pour définir la limite du triangle Ts/NDVI.

4. Zone d'étude

Le secteur étudié de la vallée alluviale du Sénégal est situé entre les territoires du Sénégal et de la Mauritanie et il est centré sur la ville de Richard-Toll, à l'extrême est du delta du fleuve. Le climat est du type sahélien avec une pluviosité irrégulière et mal répartie dépassant rarement 200 mm. Malgré ces conditions climatiques défavorables, les apports permanents du fleuve offrent à cette région, isolée au milieu d'une zone aride, d'importantes potentialités agricoles.

Dans le delta proprement dit, les milieux surprennent par leur variété et leurs potentiels : levées et terrasses fluviales anciennes ou récentes, certaines limoneuses et d'autres sablonneuses, vastes cuvettes argileuses et avancées sableuses en provenance des bordures nord et sud. Les principales cultures sont la canne à sucre et le riz, pratiquées toute l'année dans les parties argilo-limoneuses.

Les bordures nord et sud de ces aménagements hydro-agricoles correspondent aux terres sableuses, développées sur d'anciens cordons dunaires. Ces milieux sont monotones : dunes et interdunes se succèdent, avec des formes plus ou moins émoussées, parfois ravivées par la sécheresse récente. Elles portent une steppe à épineux très dégradée. Traditionnellement, ces étendues sableuses étaient le domaine de la culture sous pluie du mil.

5. Résultats

L'image utilisée dans le cadre de cette étude n'a subi aucune correction radiométrique. Elle a cependant était géoréférencée après les différentes analyses afin de la rendre superposable avec d'autres documents existants.

La représentation graphique de la température de surface en fonction de l'indice de végétation a effectivement donné un triangle (figure 3). Les paramètres décrivant la bordure sèche du triangle ont été obtenus de la façon suivante : les valeurs NDVI sont subdivisées en petits intervalles (0,01) et, dans chaque intervalle, la valeur maximale de Ts est extraite dans un autre triangle (figure 4); les paramètres a et b ont été obtenus par la méthode de régression linéaire en cherchant comment évolue la température de surface en fonction de l'indice de végétation. La droite ainsi constituée forme la bordure sèche du triangle. La température de surface minimum dans l'équation décrivant l'indice de sécheresse est la moyenne des minima de température dans chaque intervalle de NDVI. La figure 5 illustre la variabilité spatiale de l'indice de sécheresse : les parties les plus claires sont les plus sèches (TVDI plus élevé) et les parties les plus sombres correspondent aux zones plus humides.

Dans la zone d'étude, la valeur TVDI moyenne est de 0,69 avec une variance de 0,046. Cette moyenne est de 0,32 dans les parcelles occupées par la canne à sucre où l'indice TVDI ne varie pas beaucoup (variance de 0,005). Cette moyenne est encore plus faible dans les rizières sous culture (0,12); mais comparées aux casiers de canne à sucre, les variations de TVDI dans l'espace sont plus sensibles dans les rizières (variance de 0,007). Si l'on compare les résultats de l'analyse dans ces deux types de cultures irriguées, la valeur moyenne TVDI plus élevée dans les casiers de canne à sucre se justifie. En effet, à la date de prise de vue de l'image (4 avril 1994) dans la plupart des casiers de canne à sucre, l'irrigation est arrêtée pour la préparation des récoltes. Dans les casiers séchés et récoltés,

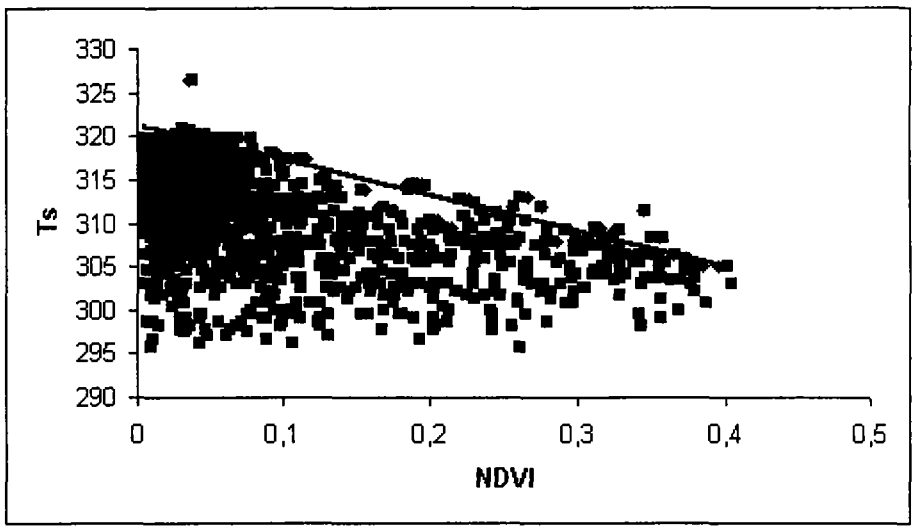


Figure 3. Évolution de la température de surface (Ts) en fonction de l'indice de végétation (NDVI) à partir de l'image TM du 4 avril 1994.

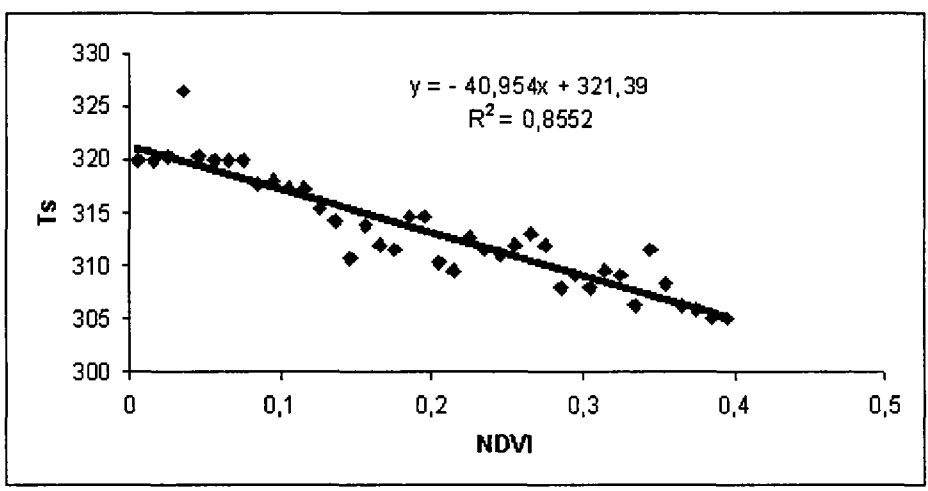


Figure 4. Détermination de la bordure sèche du triangle pour l'estimation de l'indice de sécheresse (TVDI). La valeur maximale de Ts est extraite dans les intervalles de NDVI et la bordure sèche est obtenue par la méthode de régression linéaire.

Figure 5. Répartition spatiale de l'indice de sécheresse (TVDI) à partir de l'image TM du 4 avril 1994. Les parties les plus claires sont les plus sèches (TVDI plus élevé) et les parties les plus sombres correspondent aux zones plus humides.

la valeur moyenne TVDI est de 0,62 avec un maximum de 0,77.

Les valeurs TVDI sont plus élevées dans les autres parties du delta, constituées de levées et de terrasses fluviales. La moyenne y est de 0,68 avec un maximum de 0,77 et une variance de 0,001. Sur les terres sableuses des bordures nord et sud du delta, les valeurs du TVDI sont encore plus élevées avec une faible variation spatiale : le maximum observé est de 0,9 avec une moyenne de 0,77 et une variance de 0,002.

6. Conclusion

Il est possible de conclure que les premiers résultats de l'indice de sécheresse (TVDI) calculé à partir de la température de surface et de l'indice de végétation, obtenus par télédétection, ont donné des résultats satisfaisants dans le delta du fleuve Sénégal et ses environs. L'analyse montre non seulement une différenciation de l'indice de sécheresse entre les différents milieux, mais également une variabilité de TVDI dans un même milieu. Toutefois, il est souhaitable de poursuivre l'étude sur des espaces beaucoup plus vastes, surtout en utilisant des images de saison des pluies de différentes dates.

L'indice de sécheresse obtenu par télédétection peut être calibré par rapport à la réserve en eau du sol. Mais ce travail d'étalonnage requiert de nombreuses mesures d'humidité du sol ou des simulations. Dans le cadre du projet INTEO, la réflexion continue et l'objectif final est de pouvoir utiliser cet indice de sécheresse comme donnée d'entrée spatiale de l'humidité du sol pour la mise à jour du modèle hydrologique MIKE SHE.

Il est possible d'examiner les autres possibilités offertes par l'indice de sécheresse. En effet, le TVDI peut être utilisé dans les modèles d'estimation de la biomasse comme paramètre mesurant le stress hydrique des plantes. Il peut également être utilisé comme paramètre dans les systèmes d'alerte précoce, ou dans l'estimation des risques de feu de brousse.

7. Remerciements

Nous tenons à remercier le Conseil de recherches du Danemark qui a accepté de financer le projet de recherche INTEO. Nous saluons également la sincère collaboration de tous les membres de l'équipe INTEO.

8. Références

FRIELD, M. A. and DAVIS, F. W. 1994. Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie. Remote Sensing of Environment, n° 48, p. 1-17.

LAMBIN, E. F. and EHRLICH, D. 1996. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 3, p. 463-487.

MORAN, M. S., CLARKE, T. R., INOUE, Y. and VIDAL A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote Sensing of Environment, n° 49, p. 246-263.

NEMANI, R. R. and RUNNING, S. W. 1989. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. Journal of Geographical Research, n° 89, p. 7231-7237.

PRIHODKO, L. and GOWARD, S. N. 1997. Estimation of air temperature from remptely sensed surface observations. Remote Sensing of Environment, vol. 60, n° 3, p. 335-346.

PRINCE, S. D., GOETZ, S. J., DUBAYAH, R.O., CZAJKOWSKI, K. P. and THAWLEY, M. 1998. Inference of surface and air temperature, atmospheric precipitable water and vapor deficit using AVHRR satellite observations : comparison with field observations. Journal of Hydrology, vol. 212-213, n° 1-4, p. 230-249.

SANDHOLT, I., RASMUSSEN, K. and ANDERSEN, J. 1999. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. (Sous presse).

SMITH, R. C. G. and CHOUDHURY, B. J. 1991. Analysis of normalized difference and surface temperature observations over southeastern Australia. International Journal of Remote Sensing, vol. 12, n°10, p. 2021-2044.

WUKELIC, G. E., GIBBONS, D. E., MARTUCCI, L. M., and FOOTE, H. P 1989. Radiometric calibration of Landsat thematic mapper thermal band. Remote Sensing of Environment, n° 28, p. 339-347.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 405-411

41

Utilisation de la durée d'ensoleillement et des images visibles du VISSR de METEOSAT pour le calcul du coefficient de réflexion du sol

AMMAR MOKHNACHE

Département de physique, Faculté des sciences, Université Mentouri,25000 Constantine, Algérie; téléphone : 213 4 61 43 42; télécopieur : 213 4 61 43 42; courriel : a.mokhna@caramail.com

Résumé

Le signal mesuré par le capteur visible VISSR de METEOSAT est perturbé par la présence de l'atmosphère; il est atténué soit par absorption soit par diffusion. Le coefficient de réflexion du sol est important pour le calcul du bilan radiatif à l'interface sol-atmosphère et pour l'étude des changements de l'état de surface, la désertification par exemple. La diffusion par les aérosols est caractérisée par le coefficient de trouble atmosphérique β d'Angström. Nous proposons dans cet article une méthode pour estimer β à partir de la durée d'ensoleillement mesurée par l'héliographe Campbell-Stokes. Nous savons que, par ciel clair, la décoloration du carton commence lorsque l'intensité du rayonnement solaire directe atteint 120 w/m^2, ce qui correspond à une hauteur angulaire du Soleil de 5° au-dessus de l'horizon. Le seuil de brûlure du carton, d'après certains auteurs, varie entre 120 et 200 w/m^2. Connaissant l'heure de lever du Soleil mesurée par l'héliographe, nous pouvons calculer l'épaisseur optique des aérosols et ensuite en déduire le coefficient β. Nous avons utilisé une série d'images du capteur visible VISSR de METEOSAT pour le calcul du coefficient de réflexion du sol correspondant aux trois heures 8 h 30, 11 h 30 et 14 h 30 TU des mois mai, juin, août et septembre 1986. Le site-test est la région de Constantine (est de l'Algérie) où nous avons une station météorologique. Nous avons obtenu un β qui varie de 0,04, pour les jours de bonne visibilité au printemps, à 0,39, pour

les jours de brume sèche en août. Le coefficient de réflexion du sol varie entre 0,2 (sol couvert) à 0,3 (sol nu). Nous avons aussi comparé l'épaisseur optique des aérosols calculée avec les mesures de la station météorologique de Tamanrasset.

1. Introduction

La connaissance avec précision du coefficient de réflexion du sol nous permettrait de suivre les changements de l'état de surface du sol. Il y a deux méthodes pour la détermination du coefficient de réflexion du sol : la première méthode est la mesure directe, qui est la plus précise et la deuxième méthode est l'estimation à partir de l'imagerie satellitaire (ARINO, 1990). Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'utiliser les lois de transfert radiatif. Les constituants gazeux et particulaires modifient qualitativement et quantitativement le rayonnement solaire direct. Ces modifications sont dues essentiellement à l'absorption et à la diffusion. Le paramètre le plus important dans ce phénomène d'atténuation est le trouble atmosphérique (KAUFFMAN, 1987), qui est caractérisé par le coefficient β d'Angström. Angström, Linke et Schüepp sont les premiers à essayer de le mesurer (BAILLE et MERMIER, 1977). Dans le cas où les mesures de l'épaisseur optique sont inexistantes, nous proposons une méthode pour l'estimer à partir de la durée d'ensoleillement mesurée au moyen de l'héliographe Campbell-Stokes. Nous savons que le seuil de décoloration du carton de l'héliographe commence lorsque l'intensité du rayonnement direct atteint 120 w/m^2 (PERRIN de BRICHAMBAUT, 1975). Donc, si on a une quantité importante d'aérosols, l'intensité du rayonnement direct atteint 120 w/m^2 quelques minutes après le lever du soleil et la hauteur solaire sera supérieure à 5° (JAENICKE and KASTEN, 1978; KASTEN, 1980).

1.1. Images satellitaires

Le satellite METEOSAT est situé à une altitude voisine de 36 000 km au-dessus du golfe de Guinée de coordonnées géographiques (0, 0). La résolution sous satellite est de (2,5 x 2,5 km^2). Les images que nous avons utilisées dans notre travail, sont les images réduites B2 de l'année 1986. Ces images sont codées en huit bits et donc les valeurs sont de 0 à 255, ces valeurs sont appelées luminances. La réduction est obtenue en faisant une moyenne sur 4 pixels de l'image primaire 5 000 x 5 000 pixels puis un échantillonnage de 1/36, c'est à dire une ligne sur 6 et un pixels sur 6. L'image complète est de 416 x 416 pixels.

1.2. Description du site

La méthode a été testée pour deux sites différents. Le premier site est la région de Constantine au nord-est de l'Algérie, qui est caractérisée par un climat méditerranéen. Cette zone est formée de plaines, sont des terres de culture de céréales traversées par de petits chaînons calcaires allongés SO-NE. Le deuxième site est la région de Tamanrasset au sud-est, une zone sous le tropique du Cancer; elle est la plus aride du désert Algérien. Cette zone est constituée de montagnes et de plateaux gréseux de 1 000 m d'altitude. Les montagnes renferment des plaines de sable et de cailloux.

2. Méthode de calcul

Dans cette méthode, nous utilisons un modèle analytique simple, où nous avons introduit les corrections atmosphériques. La luminance mesurée par le capteur VISSR est égale à la luminance du sol mois la partie absorbée ou diffusée plus la luminance de l'atmosphère.

2.1. Estimation de l'épaisseur optique des aérosols

Le rayonnement direct normal est donné par la formule de Bouguer :

$$I = I_0 \times s \times \exp\left[-(\tau_{ae} + \tau_r + \tau_{ve} + \tau_{03}) \times m\right] \quad (1)$$

cette formule peut être écrite de la manière suivante :

$$I = I_0 \times s \times T_{ae} \times T_r \times T_{ve} \times T_{o3} \quad (2)$$

où

I_0 est la constante solaire hors atmosphère, égale à 1 353 w/m^2;

s est le facteur de correction de la distance moyenne Terre-Soleil;

T_{ae}, T_r, T_{ve}, T_{o3} sont la transmission des aérosols, de Rayleigh, de la vapeur d'eau et de l'ozone.

Après plusieurs tests, nous avons pris l'intensité du rayonnement direct avec un seuil égal à 120 w/m^2, la transmission des aérosols sera donc calculée par la formule suivante :

$$T_{ae} = \frac{120}{1353 \times s \times T_{03} \times T_{ve} \times T_r} \quad (3)$$

La transmission des aérosols est exprimée par la formule de Bouguer :

$$T_{ae} = \exp(-\tau_{ae} \times m) \quad (4)$$

où

m est la masse d'air;

t_{ae} est l'épaisseur optique des aérosols calculé par :

$$\tau_{ae} = (\frac{-1}{m}) \times \ln(T_{ae}) \quad (5)$$

et β peut être obtenu à partir de la formule suivante (MUHAMMAD, 1983) :

$$T_{ae} = [-0{,}914 + 1{,}909267 \times \exp(-0{,}667023 \times \beta)]^m \quad (6)$$

2.2. Calcul du coefficient de réflexion du sol

Nous supposons que, par ciel clair de bonne visibilité, le trouble atmosphérique ne change pas pendant la journée et que le coefficient de réflexion du sol ρ_s peut être exprimé par la relation suivante :

$$\rho_s = \frac{\pi \times c \times (B_{sat} - B_{atm})}{\int_{0.4}^{1.1} gl_\lambda \times \varepsilon_\lambda \times T_\lambda^v \times d\lambda} \quad (7)$$

où

c est la constante de calibration du capteur VISSR et ε_λ sa réponse spectrale;

gl_λ est le rayonnement global au sol;

T_λ^v est la transmission directe dans la direction du satellite;

Les luminances B_{sat} et B_{atm} sont en compte numérique;

B_{atm} est la luminance atmosphérique, qui est calculée avec la formule donnée par VERMOTE *et al.* (1996).

3. Analyse des résultats

Dans ce travail, nous avons utilisé, l'imagerie satellitaire pour estimer le coefficient de réflexion du sol pour les régions où les mesures sont inexistantes. La connaissance du trouble atmosphérique est nécessaire pour introduire les corrections atmosphériques. Sur la figure 1, nous avons représenté la variation du coefficient de trouble atmosphérique β d'Angström en fonction de la hauteur angulaire du soleil, mesurée par l'héliographe pour des jours clairs sans nuage à la station de Constantine. Nous remarquons que la variation est linéaire avec un coefficient de corrélation égal à 0,99. Sur la figure 2, on a comparé l'épaisseur optique des aérosols mesurée à 9 h 00 TU à la station de Tamanrasset, avec l'épaisseur optique estimé au lever du Soleil mesuré. La variation est linéaire et le coefficient de corrélation est de 0,96. Nous pouvons donc en déduire que le trouble n'a pas changé entre l'heure de lever du Soleil et l'heure des mesures. Sur la figure 3, on représente l'évolution du coefficient de réflexion du sol pour la région de Constantine, en fonction du sinus de la hauteur solaire, calculée pour les heures 8 h 30, 11 h 30 et 14 h 30 TU, pour quatre

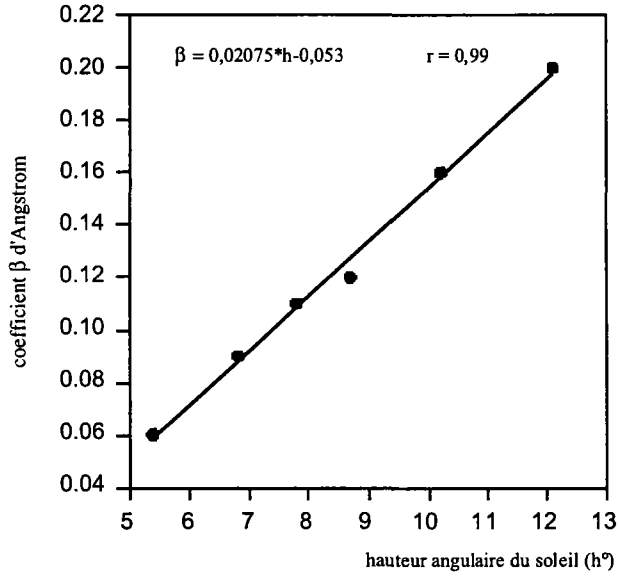


Figure 1. Variation du coefficient de trouble atmosphérique β en fonction de la hauteur du lever de soleil mesuré par l'héliographe à la station météorologique de Constantine pour quelques jours de ciel clair sans nuage pour le mois de juin 1986.

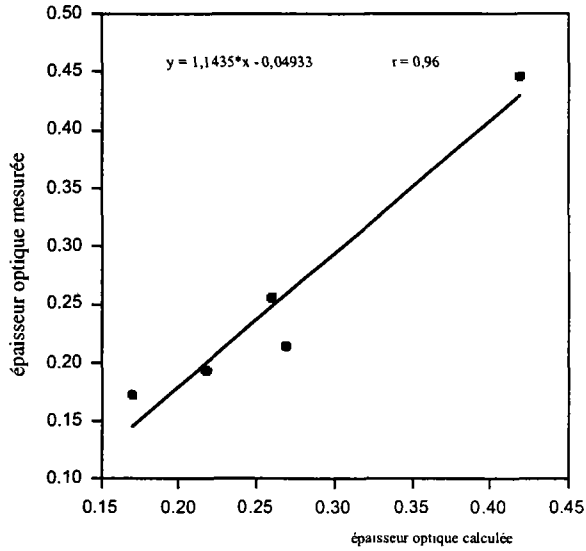


Figure 2. Comparaison entre l'épaisseur optique mesurée et calculée à la station de Tamanrasset pour quelques jours de ciel clair des mois de juin et juillet 1986.

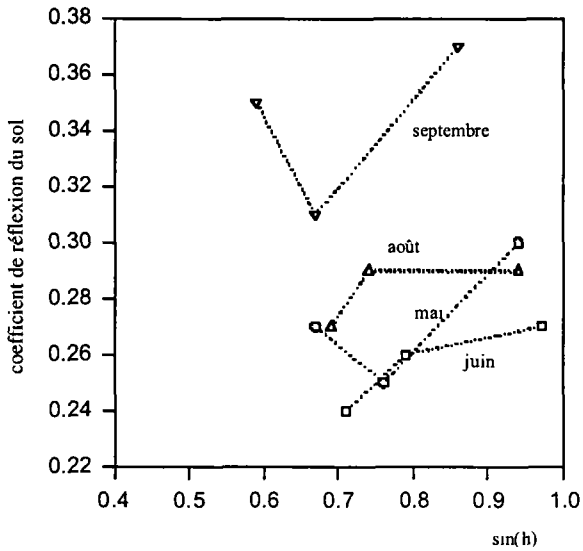


Figure 3. Évolution journalière du coefficient de réflexion du sol en fonction du sin(h) de quatre jours de ciel clair, des mois de mai, juin, août et septembre 1986.

jours de ciel clair des mois de mai, juin, août et septembre. Nous remarquons que les courbes des mois de mai et de septembre sont inversées par rapport à celles des mois de juin et d'août; cela est dû au changement de l'état de surface. Sur la figure 4, on représente l'évolution du coefficient de réflexion du sol pour les mêmes jours. Nous constatons que la réflectance du sol augmente lorsque l'état de surface passe du couvert au nu.

4. Discussion

Nous avons essayé dans ce travail de montrer que la durée d'ensoleillement est un paramètre important pour l'estimation du coefficient de trouble β d'Angström, qui est important dans les corrections atmosphériques. Le bon coefficient de corrélation obtenu entre β et la hauteur angulaire du soleil au lever, montre que l'hypothèse est vérifiée. L'incertitude sur β est de ± 3 %, cela montre que la méthode proposée pour estimer le coefficient de réflexion du sol nous permettrait d'obtenir des résultats acceptables.

5. Conclusion

Nous pensons avoir montré la possibilité d'utiliser la durée d'ensoleillement et l'imagerie satellitaire pour estimer le coefficient de réflexion du sol. Les résultats obtenus sont encourageants. Pour plus de précision, il faut tenir compte de la nature des aérosols car, pour certains jours même de ciel clair, on a plusieurs types d'aérosols présents dans l'atmosphère, on aura donc plusieurs β, ce qui rend difficile l'utilisation de la formule de Bouguer pour la transmission des aérosols.

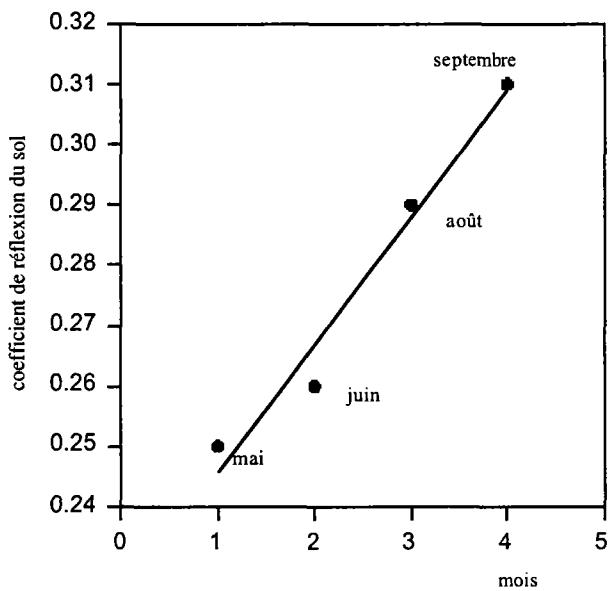


Figure 4. Évolution du coefficient de réflexion du sol à 8 h 30 TU pour les même jours de la figure 3.

6. Références

ARINO, O. 1990. Albédo de surfaces et bilan radiatif de courtes longueurs d'ondes , contribution satellitaire. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 182 p.

BAILLE, A. et MERMIER, M. 1977. Étude du trouble atmosphérique en zone semi-rurale (Montfavet). Annales Agronomiques, vol. 28, n° 5, p. 543-560.

JAENICKE, R. and KASTEN, F. 1978. Estimation of atmospheric turbidity from the burned traces of the Campbell-Stokes sunchine recorder. Applied Optics, vol. 10, n° 16, p. 2617-2621.

KASTEN, F. 1980. A simple parameterization of the pyrheliometric formula for determining the Linke turbidity. Meteorol. Rdsch, vol. 33, p. 124-127.

KAUFFMAN, Y.-J. 1987. Measurement of the aerosol optical thickness and the path radiance-implications on aerosol remote sensing and atmospheric corrections. Journal of Geophysical Research, vol. 28, p. 2677-2692.

MUHAMMAD, I. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press, 390 p.

PERRIN de BRICHAMBAUT, C. 1975. Estimation des ressources énergétiques en France Supplément n°1, cahier de l'Association Française pour l'étude et le développement de l'énergie solaire. Edition Européennes Thermique et Industrie, Paris, 60 p.

VERMOTE, E., TANRÉ, D., DEUZÉ, J. L., HERMAN, M. and MORCRETTE, J. J. 1996. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S), 6s User's guide version 1. Laboratoire d'optique atmosphérique, Lille, France, 214 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 413-419

42

Essai de mise en place d'une base de données de signatures spectrales standard : application à la vallée de la Garonne (France)

ÉTIENNE MULLER

Centre d'écologie des systèmes aquatiques continentaux (CESAC), UMR C.5576-C.N.R.S./Université Paul Sabatier-Toulouse III, 29, rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse Cedex 4, France; téléphone : 33 5 62 26 99 81; télécopieur : 33 5 62 26 99 99; courriel : muller@cesac.cemes.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est de montrer, dans le cas précis de la vallée de la Garonne, en France, les contraintes liées à la mise en place d'une base de données de signatures spectrales (calibration, corrections atmosphériques et géométriques, intégration des dimensions temporelle et multicapteur des données). La méthode a consisté à utiliser une série temporelle de 20 images HRV de SPOT et TM de Landsat et à proposer une solution simple et robuste pour la normalisation de ces données. La définition de signatures spectrales standard a porté sur les sols et les boisements. Pour les sols, le modèle s'appuie sur quatre grandes catégories de texture (sableux, limoneux, argilo-limoneux et argileux), identifiables sur les images et faisant l'objet chacune d'une modélisation spécifique des relations humidité-réflectance. Pour les boisements, le rythme phénologique de 9 catégories (ripisylve, peupliers, chênes, charmes, pins, etc.) a été intégré dans le modèle, l'ensemble étant géré dans l'environnement du logiciel ACCESS. Une telle base de données pourrait être intégrée aux systèmes de traitement d'images et servir d'aide à l'interprétation ponctuelle d'un élément d'image ou à une classification de l'ensemble de l'image. On entrevoit aussi d'intéressantes perspectives pour des comparaisons inter-régionales et pour la mise en place d'une base de données plus vaste avec des mises à jour via Internet.

1. Introduction

Lors d'une classification dirigée d'images, tout télédétecteur admet implicitement que les objets qui l'intéressent dans le paysage ont des signatures spectrales spécifiques. Au cours de la phase d'apprentissage, tout l'art consiste précisément à définir les caractéristiques spectrales représentatives de ces objets. Cette phase est déterminante sur le résultat final. On peut bien sûr se demander s'il n'est pas utopique d'essayer de définir ainsi chaque objet du paysage par sa seule signature spectrale et de limiter l'essentiel de la démarche à un problème de discrimination de signatures spectrales entre elles. Toutefois, il faut reconnaître qu'avec les méthodes habituelles de classification, on analyse les images pixel par pixel indépendamment de leurs voisins. Ainsi, l'un des paradoxes de la télédétection est de tout miser sur la dimension spectrale des objets et de négliger, de fait, les autres dimensions, en particulier leur dimension spatiale. En poussant cette logique spectrale à fond, il est possible de formuler deux hypothèses de travail :

- chaque objet peut être défini par une signature spectrale standard, mesurée dans des conditions standard;
- tout objet observé en condition non standard a une signature spectrale particulière qu'il est possible de modéliser par référence à sa signature standard.

Nous nous proposons d'examiner la validité de ces deux hypothèses en nous intéressant au cas des boisements et des sols, dans la vallée de la Garonne, au nord de Toulouse, que nous avons eu l'occasion d'étudier au cours des 10 dernières années à l'aide d'une série de 20 images HRV de SPOT et TM de Landsat.

2. La normalisation des données

2.1. Difficultés et incertitudes de la calibration absolue

La mise en évidence de signatures spectrales standard et de changements significatifs dans les études diachroniques soulève le délicat problème de la comparaison multidate/ multicapteur des données et, par suite, de la correction radiométrique des images. Ces corrections s'effectuent généralement dans le cadre d'une calibration absolue où les comptes numériques bruts de chaque pixel sont transformés en réflectance puis corrigés des effets atmosphériques. Cette approche est toutefois loin d'être opérationnelle et sûre.

Le décodage consiste d'abord à transformer les comptes numériques en luminances en utilisant les coefficients de calibration absolue fournis avec les images numériques. Ensuite, le passage en réflectance consiste à normaliser la luminance par l'éclairement solaire effectif pondéré par le cosinus de l'angle zénital solaire. À Toulouse, cet angle zénital varie de 30° en juin à 70° en décembre. L'éclairement solaire effectivement reçu sur un sol horizontal est donc environ 2,5 fois plus important en juin qu'en décembre.

Les perturbations atmosphériques peuvent être très importantes car les ondes électromagnétiques traversent deux fois l'atmosphère. La correction des effets d'absorption et de diffusion est possible avec les modèles de type 5 S ou 6 S, initialement développés par TANRÉ *et al.* (1986). Toutefois, en l'absence de mesures précises sur l'atmosphère au moment de l'acquisition des images, il est nécessaire de simplifier ces modèles, d'où d'inévitables imprécisions sur l'efficacité globale des corrections.

2.2. Simplicité et robustesse du calage radiométrique

Sous sa forme simplifiée, la calibration absolue est quasi linéaire et se rapproche de certains modèles empiriques dans lesquels les effets atmosphériques sur le signal s'expriment sous la forme d'une composante additive (essentiellement liée aux phénomènes de diffusion) et d'une composante multiplicative (plutôt liée aux phénomènes d'absorption). Ces modèles consistent souvent à soustraire, aux données satellitaires, une valeur qui est déduite soit de la réflectance de l'eau, soit des radiométries les plus basses observées dans chaque bande spectrale (AHERN *et al.*, 1977). Une autre technique consiste à utiliser des objets urbains à reflectance stable (CHAVEZ, 1989).

L'idée que les images renferment les données nécessaires à leur propre correction est séduisante. En effet, s'il est possible de trouver dans un paysage des objets radiométriquement invariants, ces objets devraient pouvoir être utilisés comme référence absolue pour calibrer les images. Sachant que de tels objets ne sont pas rigoureusement invariants, les résultats ne sont pas toujours concluants. Nous avons cependant montré qu'une solution consistait à considérer comme radiométriquement stable dans une image non pas une seule catégorie d'objets mais la moyenne et l'écart type d'un ensemble varié d'objets pseudo-invariants très contrastés : sites urbains, aéroport, gros bâtiment, vieille plantation de pins, lac (MULLER, 1993). Dans une bande spectrale donnée, le calage radiométrique consiste en une transformation linéaire des comptes numériques bruts (CN) en comptes numériques calés (CNC) selon l'équation CNC = a + b * CN. Les paramètres (a et b) de la transformation linéaire sont calculés à partir de la moyenne et de l'écart type des comptes numériques des objets pseudo-invariants dans l'image de référence (indice 0) et dans l'image à corriger :

$$a = \overline{CN}_0 - \overline{CN} * \frac{\sigma_0}{\sigma} \qquad b = \frac{\sigma_0}{\sigma}$$

Ce calage s'est révélé plus efficace que la calibration absolue pour normaliser des images multidates des capteurs HRV et TM. Pour travailler en réflectance, nous proposons d'effectuer d'abord un calage radiométrique puis une calibration absolue sur l'ensemble des données calées. Les paramètres de correction absolue sont alors ceux de l'image qui a servi de référence au calage. On évite ainsi les incertitudes et les erreurs de la calibration absolue à chaque date.

3. Application à la vallée de la Garonne

3.1. Cas des boisements

En zone tempérée, les boisements sont caractérisés par des rythmes phénologiques qui modifient de façon spectaculaire l'aspect des paysages d'une saison à l'autre. Dans la vallée de la Garonne, les signatures spectrales des 9 catégories de boisements les plus représentatives ont été suivies dans une série quasi-mensuelle d'images TM (MULLER, 1995). Le résultat le plus surprenant de cette analyse a été l'absence d'onde verte au printemps liée à l'apparition des feuilles et d'onde jaune en automne liée à la sénescence de ces mêmes feuilles (figure 1). Dans les bandes TM1, TM2 et TM3, on ne retrouve donc pas les modifications spectrales saisonnières qui sont pourtant nettement visibles à l'œil nu au niveau des feuilles. Une grande confusion persiste tout au long de l'année entre les différents boisements (sauf en hiver avec les pins) avec des réponses spectrales moyennes

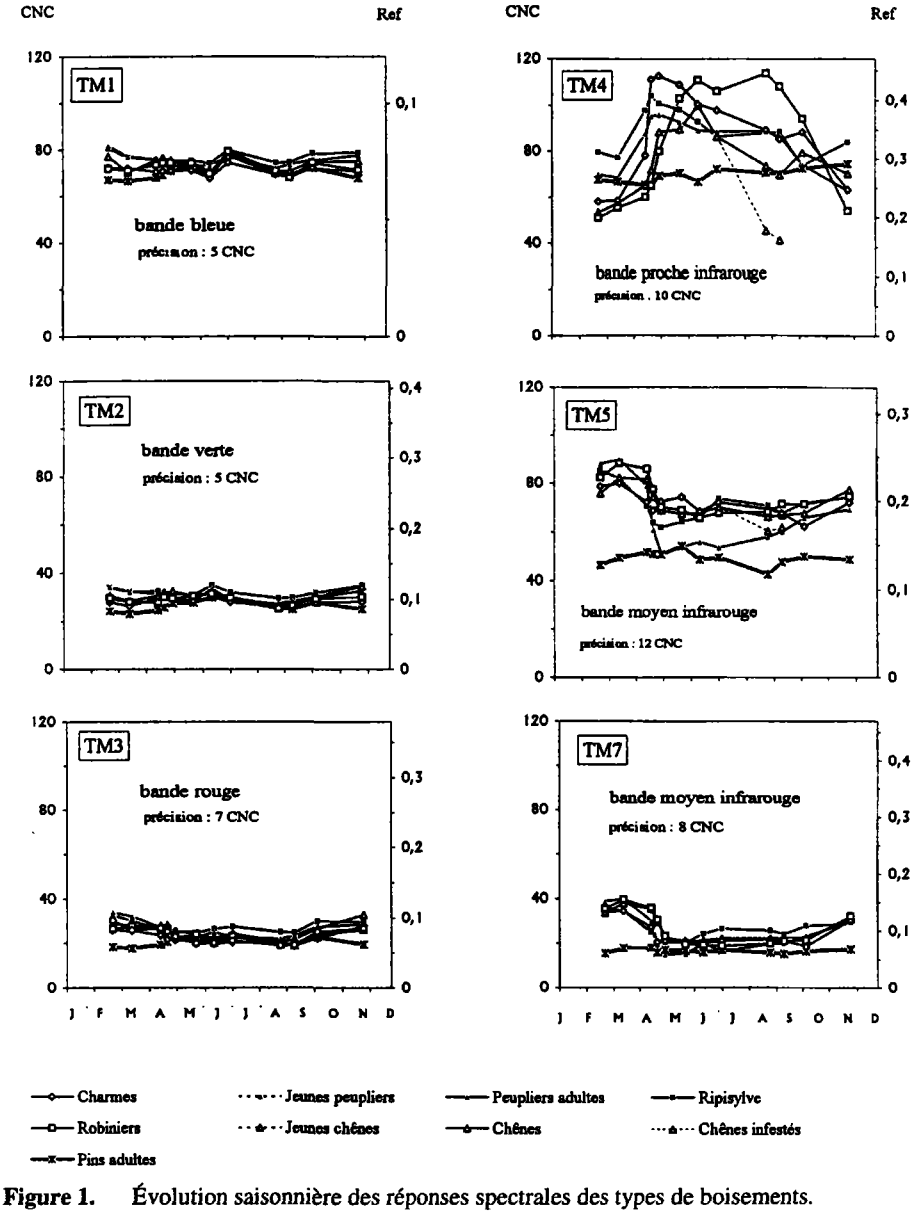


Figure 1. Évolution saisonnière des réponses spectrales des types de boisements.

quasi invariantes d'un mois à l'autre. Au contraire, dans les bandes infrarouges, apparaissent de fortes variations d'un mois à l'autre et entre catégories de boisement. Dans TM4, trois grands groupes de comportements phénologiques peuvent être identifiés : un groupe à feuillaison rapide (ripisylve, peupliers, charmes), un groupe à feuillaison tardive (chêne, robinier) et un groupe à feuillage persistant (pins).

La réponse spectrale d'un couvert végétal donné est donc fortement influencée par son rythme phénologique propre, d'où l'impossibilité de caractériser un boisement par une

signature spectrale standard sans tenir compte de la saison. Les autres facteurs (état sanitaire, caractéristiques du milieu, âge) peuvent être responsables de modifications importantes dans ces signatures spectrales d'où la nécessité de spécifier aussi dans quelles circonstances stationnelles ont été déterminées ces signatures.

3.2. Cas des sols

L'évolution spectrale saisonnière des sols est un paramètre rarement analysé. Nous l'avons examiné en détails (MULLER and JAMES, 1994; MULLER et JAMES, 1995). Les unités géomorphologiques de la vallée de la Garonne, réparties en 6 classes d'alluvions (3 sur les terrasses et 3 dans la plaine d'inondation) présentent des comportements spectraux homogènes qui peuvent être regroupés en quatre types de texture nettement différenciés entre eux sur les images : sols sableux, sols limoneux, sols argilo-limoneux et sols argileux. Cette typologie texturale du corridor fluvial apparaît le mieux lors de la préparation du lit de semences pour les cultures de printemps, en avril ou mai. Les sols sont alors nus, uniformes et finement grumeleux en surface. Le reste de l'année, les labours, les cultures en phase de croissance ou les résidus de cultures empêchent une observation directe des sols. Ces quatre catégories de sols correspondent à une structure spectrale stable dans le paysage qu'il est donc facile d'analyser sur les images. Lorsque les sols sont analysés au printemps, donc à un moment idéal, l'humidité et la texture sont les deux seuls facteurs déterminants du signal. Il est alors possible de modéliser les relations humidité-réflectance (MULLER et JAMES, 1998). Les modèles exponentiels sont les plus efficaces (figure 2), sauf dans le cas des sols limoneux où toute tentative de modélisation est vouée à l'échec par suite de l'existence de croûte de battance. Les signatures spectrales standard des sols dans la vallée de la Garonne ne peuvent donc être déterminées qu'en avril ou mai et doivent tenir compte de l'état hydrique de ces sols.

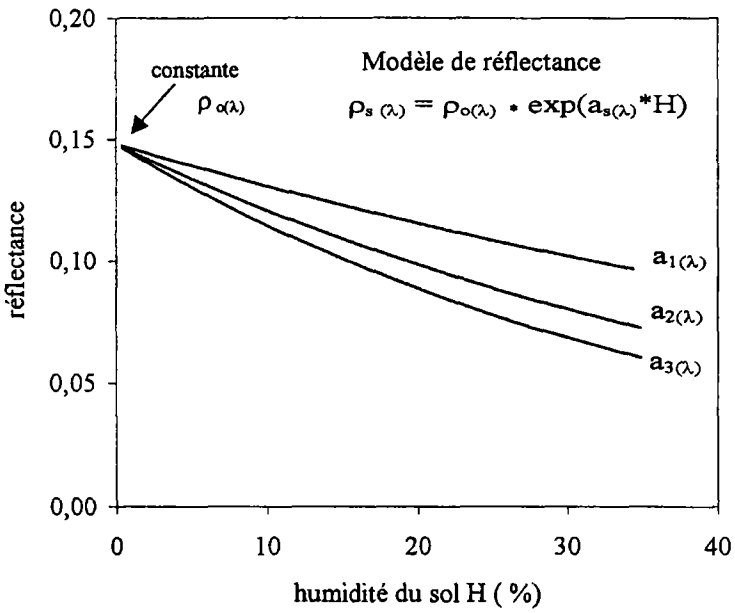


Figure 2. Modèle de réflectance des sols en fonction de la texture (ai) et de l'humidité (H).

3.3. Création d'une base de données sous ACCESS

L'environnement Microsoft ACCESS, offre de nombreuses possibilités pour gérer et analyser une base de données numériques comme les signatures spectrales standard de thèmes présents dans une image. Les données sont emmagasinées sur des tables et des requêtes peuvent être effectuées dans un environnement de type formulaire ou de type menu. L'intérêt d'un formulaire réside dans le fait qu'il permet d'affiner la requête de proche en proche ainsi que la saisie et l'affichage personnalisé de données. À chaque étape, un choix est explicitement coché parmi une liste de possibilités. On peut ainsi choisir de travailler en comptes numériques bruts, en comptes numériques calés, en luminance ou en réflectance. L'absence de choix déclenche un message d'avertissement.

Trois procédures ont été testées :

- la comparaison des signatures spectrales (à une date donnée) de thèmes choisis *a priori*; un graphique ou un tableau s'affiche alors pour les bandes spectrales ou les indices sélectionnés;
- la comparaison des profils temporels, dans une bande spectrale donnée, de thèmes choisis *a priori*; un graphique ou un tableau s'affiche alors pour la période choisie;
- l'interprétation d'une signature spectrale dont le thème est inconnu; une liste de thèmes est proposé par ordre croissant d'éloignement par rapport aux signatures standard; l'algorithme utilisé est simplement basé sur la distance euclidienne.

4. Conclusion

Une telle base de données de signatures spectrales standard pourrait être intégrée directement dans les logiciels de traitement d'images via une icône ou un menu spécifique, soit pour être consultée soit pour être enrichie progressivement. On pourrait imaginer d'afficher, en temps réel, à l'aide du curseur non seulement les coordonnées (longitude/latitude) et les valeurs radiométriques de chaque pixel désigné par le curseur mais aussi les thèmes les plus probables correspondant à ces valeurs, grâce à un lien permanent avec la base de données standard.

L'intérêt le plus évident réside sans doute dans l'utilisation de la base de données dans la phase d'apprentissage des algorithmes de classification qui seraient alors plus ou moins automatiques. Il est cependant trivial de remarquer que, pour pouvoir fonctionner correctement, la plupart des algorithmes paramétriques exigent des informations sur les valeurs centrales des classes (valeurs moyennes par exemple) mais aussi sur leur dispersion (écart type par exemple). Ce simple constat montre que la collecte de signatures spectrales sans appréciation sur le domaine de variation de ces valeurs réduit la portée des applications potentielles. Il permet toutefois de poser dans toute son acuité le problème de l'échantillonnage des données pour une évaluation non biaisée d'un thème. Pour chaque donnée entrée dans la base, il serait donc utile de préciser la taille de l'échantillon et la méthode d'échantillonnage.

La collecte de signatures spectrales standard trouve facilement une justification à un niveau local pour faciliter l'étude d'une zone géographique déterminée ou l'étude de thèmes particuliers, par exemple des statistiques agricoles. Toutefois, il semble légitime d'essayer d'étendre cette collecte à une échelle plus vaste, non seulement pour caractériser des thèmes d'une plus grande diversité, mais aussi pour confronter des thèmes identiques d'une zone géographique à une autre. L'enjeu serait alors de développer une véritable

télédétection comparative. Un projet dans ce sens pourrait être envisagé par la mise en place progressive d'une base francophone accessible sur le réseau Internet, avec des possibilités de consultation et de mise à jour. À l'issue de nos travaux menés sur la vallée de la Garonne au cours des dix dernières années, nous pensons que cette notion de signature spectrale standard, loin d'être utopique, mérite d'être développée car elle permet une réflexion globale dans un cadre conceptuel fédérateur qui justifie et stimule les efforts pour l'amélioration de la normalisation des données et pour la modélisation des réflectances.

5. Références

AHERN, F.J., GOODENOUGH, D.G., JAIN, S.C., RAO, V.R. and ROCHON, G. 1977. Use of clear lakes as standard reflectors for atmospheric measurements. Proceedings of the 11th International Symposium on remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, p. 731-755.

CHAVEZ, P.S. Jr. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic mapper multispectral images. Photogrammetric Enginering and Remote Sensing, vol. 55, p. 1285-1294.

MULLER, É., 1993. Evaluation and correction of angular anisotropic effects in multidate SPOT and Thematic Mapper data. Remote Sensing of Environment, vol. 45, p. 395-309.

MULLER, É. 1995. Phénologie forestière révélée par l'analyse d'images Thematic Mapper. Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, Série Sciences de la Vie, n° 318, p. 993-1003.

MULLER, É. and JAMES, M. 1994. Seasonnal variation and stability of soil spectral patterns in a fluvial landscape. International Journal of Remote Sensing, vol. 15, n° 9, p. 1885-1900.

MULLER, É. et JAMES, M. 1995. Caractérisation du comportement hydrique des sols dans un couloir fluvial à l'aide de données multidates TM de Landsat : vallée de la Garonne (France). *in* J.-M. DUBOIS, M.R. BOUSSEMA, F. BOIVIN et P. LAFRANCE (réd.) Télédétection des ressources en eau. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, p. 181-192.

MULLER, É. et JAMES, M. 1998. Validation d'une stratégie d'échantillonnage pour l'estimation de l'humidité des sols alluviaux par télédétection. *in* J.-M. DUBOIS, M. BERNIER, J.P. FORTIN et F. BOIVIN (réd.) La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Agence universitaire de la Francophonie, Montréal. p. 73-79.

TANRÉ, D., DEROO, C. and DUHAUT, P. 1986. Simulation of the satellite signal in the solar spectrum (5 S). Laboratoire d'optique atmosphérique, Université de Lille, France, 147 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUPELF-UREF. 2000. p. 421-426

43

Corrections atmosphérique et topographique par la méthode des points noirs améliorée et par intégration d'un modèle numérique d'altitude : application à la région de Florence (Italie)

MOUNIRA OUARZEDDINE ET AICHOUCHE BELHADJ-AISSA

Laboratoire de traitement d'images et télédétection, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (USTHB), B.P. 32, EL Alia 16111, Alger, Algérie; téléphone : (213) 2 24 79 12 (poste 806); télécopieur : (213) 2 24 28 02; courriel: n.ouarab@mailcity.com

Résumé

Les dégradations radiométriques des images satellitaires dues aux effets atmosphériques et topographiques ont fait l'objet de nombreux travaux. Dans ce contexte, nous présentons dans cet article la méthode des points noirs améliorée (MPNA) qui permet la correction radiométrique des images représentant des régions montagneuses. La correction radiométrique de ces images nécessite l'intégration des descripteurs topographiques. L'équation générale de transfert radiatif a été établie, permettant ainsi l'estimation de l'effet des aérosols ainsi que le calcul de l'irradiance. Les résultats de la MPNA sont donnés par la comparaison des signatures spectrales de la végétation de conifères. Ces signatures sont tracées à partir d'images de luminances corrigées de l'effet atmosphérique en intégrant les paramètres atmosphériques calculés par la MPNA et ceux calculés par le modèle 5S. Une évaluation visuelle de l'effet de la topographie est illustrée sur des images obtenues après correction topographique. Nous avons aussi évalué la correction topographique par composition colorée. La composition colorée des images corrigées nous a permis de mieux discriminer les thèmes

1. Introduction

Le problème majeur dans la correction atmosphérique des images satellitaires est l'estimation de l'effet de diffusion et d'absorption des molécules et des aérosols dans l'atmosphère terrestre. Dans la méthode que nous avons développée, nous supposons que l'atmosphère est homogène et que les éléments de la surface terrestre sont des diffuseurs parfaits. Nous donnons le principe de la méthode et les étapes de détermination des paramètres de l'atmosphère. Enfin nous terminerons par présenter les résultats obtenus.

2. Méthode de correction

La MPNA (méthode des points noirs améliorée) est basée sur la méthode du minimum d'histogramme ou méthode des points noirs (CHAVEZ, 1988). C'est une version améliorée de la méthode des points noirs en choisissant deux longueurs d'ondes appropriées. La détermination des caractéristiques atmosphériques pour toutes les bandes, se fait donc en passant par deux étapes essentielles qui sont :

- sélection du point noir;
- détermination des paramètres atmosphériques.

2.1. Sélection du point noir

La sélection du point noir se fait à partir de l'histogramme des niveaux de gris de l'image satellitaire. Sur les histogrammes des différentes bandes spectrales, on observe toujours une augmentation brusque du nombre de pixels au niveau d'une valeur non nulle de DN (*Digital Number*) (CHAVEZ, 1988). C'est cette valeur qui est prise comme étant le point noir désigné par DN* de ce type de bandes spectrales sélectionnées. Notons que, lorsqu'on a choisi convenablement le point noir, on se rapproche mieux des caractéristiques réelles de l'atmosphère.

2.2. Détermination des paramètres atmosphériques

Par définition, l'expression de la luminance au niveau du satellite est donnée par RAHMAN (1996) et PUTSAY (1992) :

$$L_{sat} = L_a + E_g \frac{T^{\uparrow} \rho_{suf}}{\pi(1 - s\rho_{suf})} \qquad (1)$$

où

L_{sat} est la luminance au niveau du capteur;
L_a est la luminance du chemin atmosphérique;
E_g est l'irradiance globale;
ρ_{suf} est la réflectance de la surface;
s est l'albédo sphérique.

En négligeant l'effet de l'environnement représenté par le terme sr_{surf}, on a alors :

$$L_{sat} + L_a + \frac{E_g.T^{\uparrow}\rho_{surf}}{\pi} = L_a + L_{suf}T^{\uparrow} \quad (2)$$

où L_{surf} est la luminance de la surface. Celle-ci s'écrit :

$$\rho_{suf} = \frac{(L_{sat} - L_a)\pi}{T^{\uparrow}E_g} \quad (3)$$

Dans l'équation (3), le paramètre qui n'est pas déterminé, est la luminance du chemin atmosphérique. Pour un objet noir, la luminance détectée L_{surf} est théoriquement nulle. Elle correspond alors à 0 % de réflectance,

d'où $$L^*_{sat} \cong L_a \quad (4)$$

où L^*_{sat} est la luminance correspondant au nombre numérique DN* de la surface noire, estimée à partir de l'histogramme de l'image considérée. Pour estimer cette valeur, on choisit deux longueurs d'onde correspondant, respectivement, aux canaux TMl et TM3 de Landsat. Ce choix est ustifié par le fait que la zone de test présente de la végétation. Les luminances L^*_{sat} des points noirs choisis dans les deux canaux sont données en fonction des paramètres de calibration par l'équation suivante :

$$L_{sat}(\lambda_{1,3}) = A_o(\lambda_{1,3}) + A_1(\lambda_{1,3}).DN^*(\lambda_{1,3}) \quad (5)$$

Comme $L^*_{sat} = L_a$, on a donc, pour les deux canaux :

$$L_a(\lambda_{1,3}) = A_o(\lambda_{1,3}) + A_1(\lambda_{1,3}).DN^*(\lambda_{1,3}) \quad (6)$$

La luminance intrinsèque de l'atmosphère est donnée par HILL et STURM (1991) :

$$L_a = L_R + L_A \quad (7)$$

où L_R est la composante de Rayleigh et L_A celle des aérosols.

2.3. Calcul de la luminance due aux aérosols

Le paramètre caractéristique des aérosols est leur épaisseur optique $\tau_A(\lambda)$. Pour le calcul de ce paramètre, nous nous sommes servis de la relation d'Angström (IQBAL, 1983 :

$$\tau_A(\lambda) = a\lambda^{-a} \quad (8)$$

où a et a sont des paramètres qui caractérisent la taille et la distribution des aérosols dans l'atmosphère. L'épaisseur optique en aérosols se déduit de l'équation (6) en l'appliquant aux deux canaux.

Si on admet qu'il y a une dépendance linéaire entre la luminance du chemin atmosphérique et l'épaisseur optique en aérosols (ARANUVACHAPUN, 1986), nous avons alors :

$$L_A(\lambda) = f(\tau_A(\lambda)) = C.\tau_A(\lambda) \quad (9)$$

d'où $$L_A(\lambda) = \Gamma\lambda^{-a} \quad (10)$$

Le calcul de L_A revient à évaluer Γ et α. Ces paramètres dépendent de la taille et de la distribution des aérosols dans l'atmosphère lors de la prise de vue d'une image.

Comme on suppose que l'atmosphère est homogène pour une scène donnée, l'équation (10) peut être alors généralisée à tous les canaux de la même image.

Par conséquent, nous obtenons pour les deux canaux TM1 et TM3 :

$$L_A(\lambda_1) = \Gamma\lambda_1^{-a} \qquad \text{et} \qquad L_A(\lambda_3) = \Gamma\lambda_3^{-a}$$

où L_A se déduit de l'équation (7), d'où, le calcul des paramètres G et a. Les autres facteurs peuvent être calculés en utilisant les expressions et les coefficients publiés par la NASA (EPEMA, 1990).

3. Résultats

3.1. Signatures spectrales des types de couverts

Les courbes de la figure 1 indiquent les signatures spectrales de la végétation de type conifère extraites des images de réflectance apparente et des images de réflectance calculées au sol. En particulier ces courbes montrent une réduction de la dynamique de la réflectance estimée.

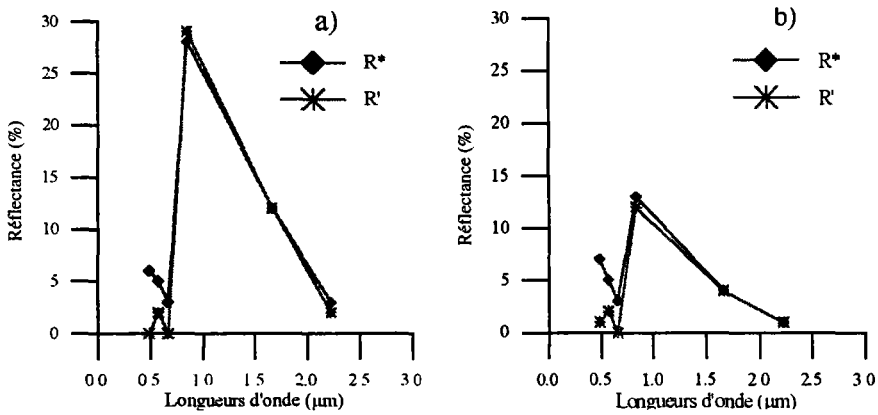


Figure 1. Signatures spectrales des forêts de conifères en juin (a) et en novembre (b) déterminées en utilisant la réflectance apparente (R') et la réflectance corrigée (R*) à l'aide du modèle MPNA.

3.2. Comparaison avec le modèle 5S

Sur la figure 2, on donne une comparaison des signatures spectrales de la végétation de conifère générées par la MPNA et des signatures spectrales générées par l'équation de transfert radiatif dans laquelle les paramètres atmosphériques déduits du modèle 5S ont été intégrés. Nous remarquons une différence nette des réflectances au niveau des courtes longueurs d'ondes. Cette différence est due aux variations des effets atmosphériques avec la longueur d'onde, ainsi qu'aux données introduites pour générer les paramètres atmosphériques du modèle 5S, tel la visibilité, et à l'hypothèse que nous avons une surface lambertienne et une homogénéité dans l'atmosphère.

3.3. Résultats de la correction topographique

Les résultats obtenus à partir de la correction atmosphérique montrent qu'il est essentiel de prendre en compte l'effet de l'angle d'incidence. Cet effet représente l'une des perturbations les plus importantes dans la télédétection des zones montagneuses ou accidentées. L'expression de la correction topographique est identique à celle déjà mentionnée dans la correction atmosphérique. La seule différence réside dans le fait que l'irradiance globale E^*_g dépend de la nature topographique du terrain et varie pour chaque pixel.

4. Évaluation

Une évaluation visuelle de l'effet de la topographie est illustrée par la figure 43-3 (voir cahier couleur). Cette dernière montre des images obtenues, après correction topographique, pour les mois de juin et de novembre. Pour le mois de juin, les thèmes sont mieux différenciés. Rappelons que l'effet topographique est faible au mois de juin. Ceci est dû à l'angle zénithal qui est faible pour ce mois.

Nous avons ensuite évalué la correction topographique par composition colorée. Pour cela, nous avons procédé à une présélection des canaux de façon pour n'en retenir que trois :

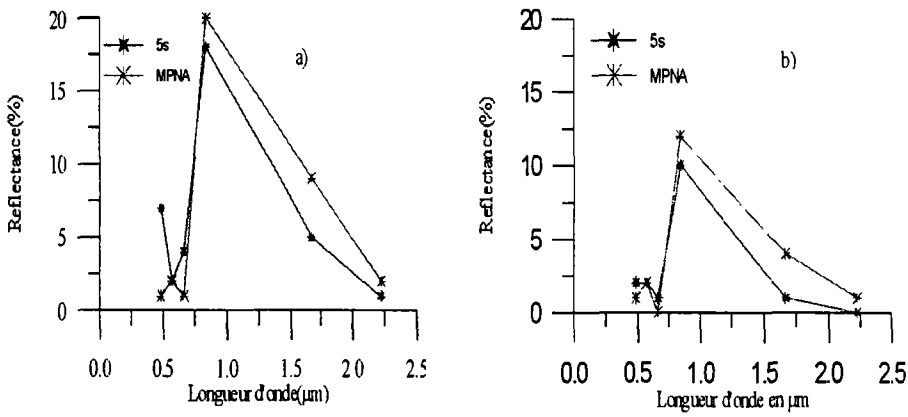


Figure 2. Comparaison des résultats du modèle 5S et de la MPNA obtenus pour une végétation de type conifère aux mois d'août (a) et de novembre b)

les canaux TM3, TM4 et TM5. La composition colorée a été appliquée simultanément aux images brutes et aux images corrigées. Sur la figure 43-4 (voir cahier couleur), on montre la composition colorée des images prises au mois de juin, obtenues avant et après correction topographique. Sur cette figure, on constate que la composition colorée des images corrigées fait beaucoup mieux ressortir les thèmes que la composition colorée des images brutes.

5. Conclusion

Nous avons présenté une méthodologie de correction radiométrique des effets atmosphériques et topographiques des images acquises par télédétection. La méthode MPNA que nous avons développée est basée sur le critère d'absorption des objets au sol dans certaines bandes spectrales du visible ou du proche infrarouge pour générer les caractéristiques de l'atmosphère relatives aux aérosols. Pour notre cas, nous avons utilisé les bandes du bleu et du rouge du spectre électromagnétique car la zone test est une zone de végétation. Pour le calcul des réflectances de surface, nous nous sommes basés sur la MPNA où nous avons pris l'hypothèse d'une surface lambertienne. Les résultats fournis par la MPNA sont jugés bons comme le montrent les estimations graphiques obtenues lors de la correction atmosphérique et sont acceptables concernant la correction topographique.

Nous comptons améliorer la MPNA dans d'autres études en prenant par exemple le cas réel d'un sol non lambertien ou même intégrer quelques paramètres, tel que l'albédo sphérique que nous avons négligé par manque de données méthéorologiques.

6. Références

ARANUVACHAPUN, S. 1986. The atmospheric optical depth spectrum determined from CZCS radiance. International Journal of Remote Sensing, vol. 7, n° 1, p. 105-118.

CHAVEZ, P. S. 1988. An improved dark-object substraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environnement, vol. 24, p. 459-479.

EPEMA, G.F. 1990. Determination of planetry reflectance for Landsat 5 Thematic Mapper tapes processed by Earthnet (ITALY). ESA Journal, vol. 14, p. 101-108.

HILL, J. and STURM, B. 1991. Radiometric correction of multitemporal Thermal Mapper data for use in agricultural land cover classification and vegetation monitoring. International Journal of Remote Sensing., vol. 12, n°7, p. 1471-1491.

IQBAL, M. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press, New York. p. 107-167

PUTSAY, M. 1992. A simple atmospheric correction method for the short wave satellite images. International Journal of Remote Sensing, vol. 30, p. 21-32.

RAHMAN, H., 1996. Atmospheric optical depth and water vapor effects on the angular characteristics of surface reflectance in NOAA AVHRR. International Journal of Remote Sensing, vol., 17, n° 15, p. 2981-2999.

PARTIE V

Bilans régionaux de la télédétection

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 429-438

44

La télédétection en Amérique du Nord de 1985 à 1999 : un bilan régional

FERDINAND BONN

Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1; téléphone : +1 819 821 8000 poste 2964; télécopieur : +1 819 821 7944; courriel : fbonn@courrier.usherb.ca

1. Le contexte

En 1985, la télédétection satellitale civile venait d'entrer dans sa deuxième génération, celle qui a été dominée par l'utilisation des capteurs satellitaires HRV de SPOT et TM de LANDSAT. La première génération avait auparavant incité la communauté à découvrir les images d'observation de la Terre fournies par MSS de LANDSAT et les satellites météorologiques. Elle avait habitué le public à considérer comme normal le fait que l'on puisse observer la Terre de haut et d'une manière systématique et répétitive. Les données n'étaient alors souvent analysées que de manière visuelle seulement car les outils de traitement d'images étaient encore réservés à quelques laboratoires privilégiés, à cause de leur lourdeur et de leur coût important. Ceci s'est traduit par la mise en place de centres nationaux et régionaux un peu partout dans le monde, avec à la fois un mandat de coordination et un mandat de support technique.

Toutefois, dès 1985, les bases du développement des quinze années suivantes étaient jetées et les agences spatiales annonçaient leurs intentions, qui peuvent se résumer comme suit :

- transfert accru à l'entreprise privée,
- démarche plus commerciale de la distribution des images,
- accent mis davantage sur les produits dérivés que sur les images brutes,
- mise en évidence de l'information extraite et non des données.

Ce mouvement a été amorcé par le programme SPOT, dont l'approche commerciale intégrée pilotée par la France a fait l'envie des milieux nord-américains. Sur ce continent,

le développement des applications de la télédétection était jusque-là confié aux agences spatiales (NASA, NOAA) et à des ministères dont le mandat était la gestion et la cartographie des ressources naturelles. Les images étaient alors vendues à un coût nettement inférieur au coût de production, essentiellement à celui de la reproduction et de la distribution.

Mais le modèle SPOT, avec ses prix de vente élevés, a fait miroiter aux décideurs politiques la possibilité de récupérer une partie importante des coûts de développement et d'opération des satellites d'observation de la Terre. Les nord-américains se sont donc empressés d'imiter ce modèle et de mettre en place des entreprises destinées à la commercialisation des données. La création de ces entreprises s'est faite aussi bien aux États-Unis (EOSAT) qu'au Canada (RADARSAT International). Cela correspondait aussi aux tendances politiques de droite qui était au pouvoir à ce moment-là (Reagan aux USA, Mulroney au Canada). Dans le cas du Canada, la possibilité d'une rentabilité commerciale a été un des arguments majeurs pour la mise en place du programme RADARSAT. Les études de marché faites à ce moment-là prévoyaient des revenus très importants à partir des seules ventes d'images.

Parallèlement, on a pu voir le développement prodigieux de la micro-informatique qui s'est progressivement amorcé au début de la décennie, ce qui a permis de mettre les outils de traitement d'images à la disposition d'un plus grand nombre d'utilisateurs et dans des institutions de plus en plus petites. Le besoin de données numériques a donc augmenté considérablement dans de plus en plus d'institutions, créant ainsi un marché potentiel important.

Enfin, à cause de la nature même des données de télédétection de première génération, les secteurs d'application se sont d'abord développés dans les domaines où la résolution spatiale n'avait pas un rôle trop critique : statistiques agricoles dans les grandes plaines de l'ouest américain, cartographie à petite échelle dans les pays en développement par le biais de programmes d'aide et d'opérateurs nord-américains, étude des courants marins principaux, etc.

C'est à partir de ce contexte que les technologies de deuxième génération et les méthodes d'exploitation correspondantes se sont mises en place. Nous verrons donc, dans l'ordre, l'évolution des technologies nord-américaines de télédétection, l'intégration de l'observation de la Terre à la géomatique, l'évolution du contexte politico-commercial et le rôle des francophones dans cette évolution.

2. Évolution des technologies

Au fur et à mesure du développement de la télédétection, on a toujours cherché à concilier deux objectifs opposés : voir le plus grand territoire possible, mais avec la meilleure précision possible. Bien qu'il soit techniquement possible d'obtenir des limites de résolution plus fines (et cela existe, bien sûr, chez les militaires), il a semblé pendant longtemps que 5 m soit la limite compatible avec une politique d'accès universel aux données à l'échelle internationale, compte tenu des réglementations restrictives de certains pays sur l'usage public des cartes et des photographies aériennes.

Les objectifs d'une limite de résolution spatiale de plus en plus fine interdisent à la fois une vision détaillée du paysage et une grande répétitivité des observations : plus l'image est à petite échelle, moins souvent le satellite pourra repasser au-dessus d'un même site. De plusieurs images par jour pour les satellites météorologiques ou NOAA, on passe à une

image aux 16 jours pour LANDSAT et à une image aux 26 jours pour SPOT. Sur la figure 1, on représente les échelles spatiales et temporelles d'un certain nombre de processus éco-géographiques, adaptés de Earth System Science (NASA, 1988), en les combinant avec les résolutions spatiales et temporelles des principaux satellites d'observation de la Terre. On voit que les deux ensembles se recoupent perpendiculairement dans l'espace-temps, en mettant ainsi en évidence une apparente opposition entre les échelles des phénomènes naturels et les capacités spatio-temporelles des outils de télédétection.

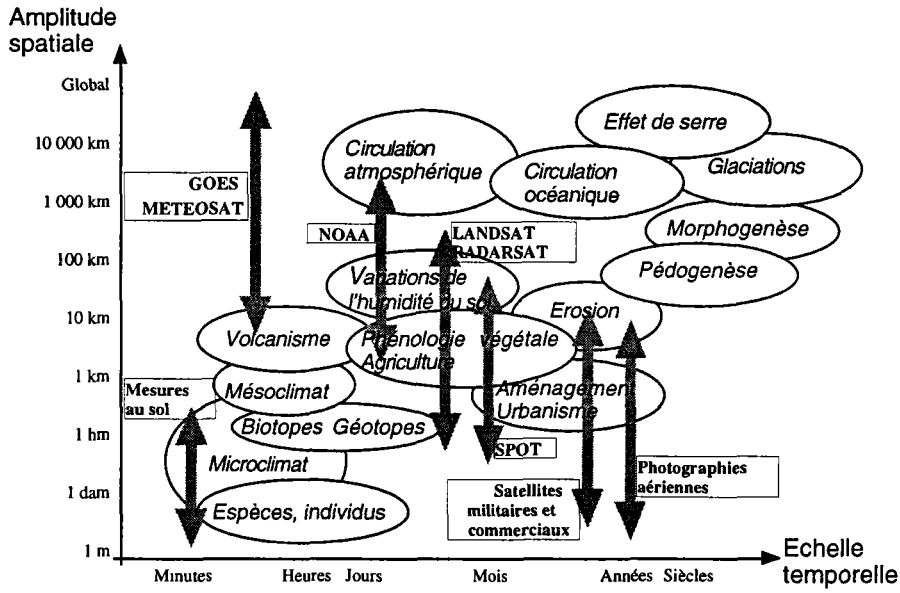
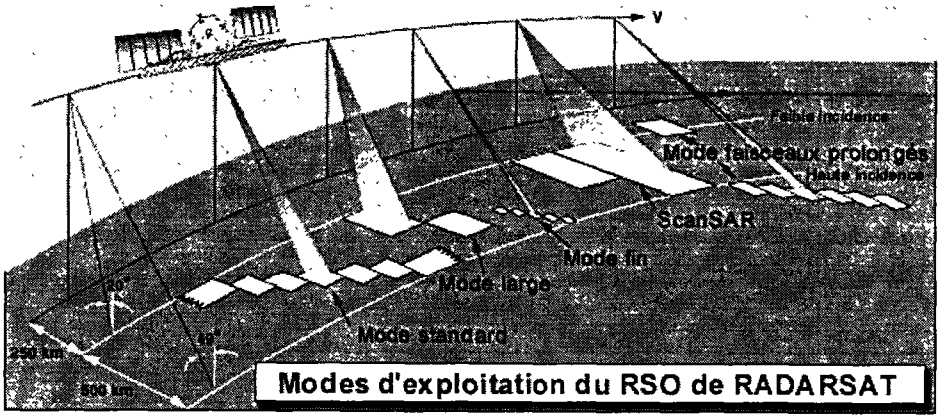


Figure 1. Échelles de temps et d'espace des paysages et de leur dynamique, combinées avec celles des principaux outils d'observation de la Terre

La répétitivité des observations est inversement proportionnelle à la finesse de la résolution recherchée alors que, dans les paysages, ce sont souvent les plus petites unités qui évoluent le plus vite. La haute résolution et la répétitivité à haute fréquence ne peuvent être combinés que par une multiplication des capteurs sous la forme d'une grappe de satellites. Les satellites agiles ou dépointables permettent de contourner partiellement le problème, mais cela se fait au détriment d'autres sites qui pourraient être d'intérêt pour les utilisateurs.

Les capteurs TM de LANDSAT et RSO de RADARSAT illustrent cette limite. L'utilisation de TM pour des phénomènes à évolution rapide ou saisonnière est limitée par cette fréquence temporelle et par la couverture nuageuse. RSO n'est pas limité par les nuages et offre en plus l'accès flexible dans l'espace et dans le temps par les possibilités de dépointage et de programmation, ce qui permet d'avoir deux images du même site le même jour, en combinant les orbites ascendantes et descendantes. Sur la figure 2, on illustre les différents modes d'acquisition des données RSO de RADARSAT.



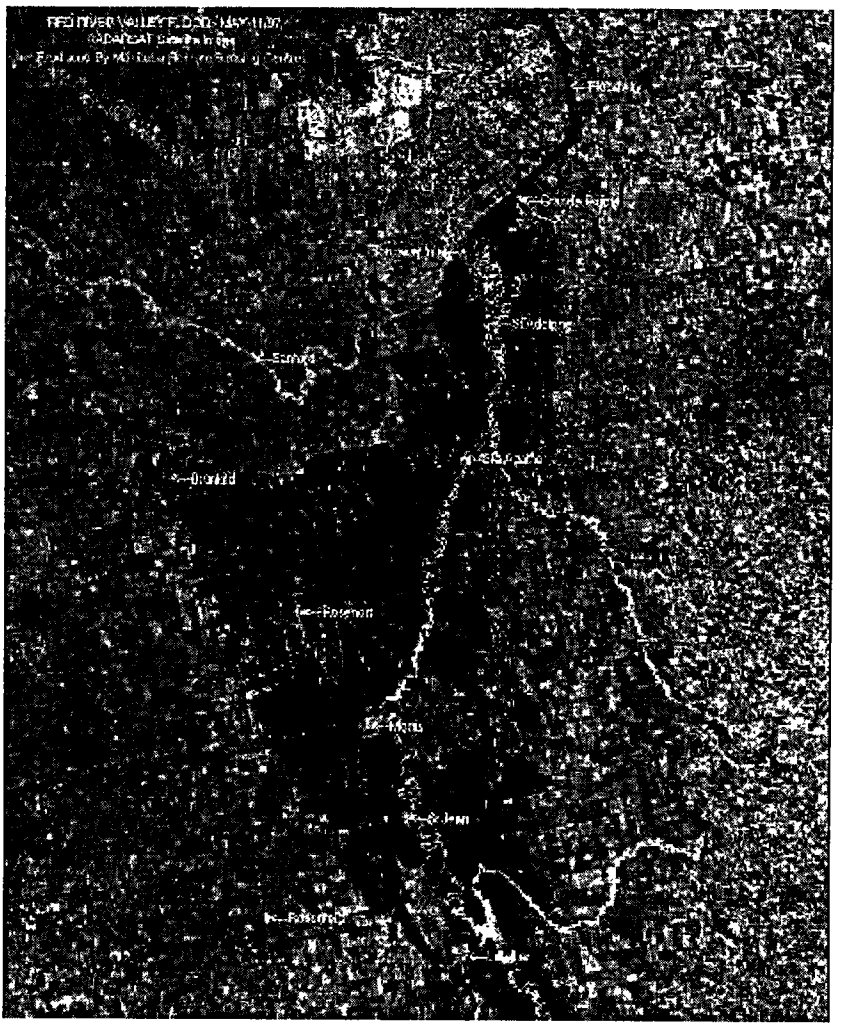
(CD du CCT, 1998)

Figure 2. Les modes d'acquisition du satellite RADARSAT.

Mais l'expérience montre que les conflits d'acquisition entre usagers sont souvent présents, et les opérateurs du satellite doivent faire des choix qui répondent souvent à des priorités économiques. Cette flexibilité, qui, en plus, n'est pas gênée par les nuages, a cependant permis à RSO d'assurer en temps quasi-réel le suivi des glaces flottantes pour la navigation. Lors d'une crue exceptionnelle de la rivière Rouge au Manitoba en 1997, RSO a permis de fournir une information de première main aux équipes de secours et d'intervention sur le terrain, en leur donnant plusieurs fois par jour des cartes spectaculaires des secteurs touchés par l'inondation. Dans ce cas, pour des raisons de rapidité, les traitements appliqués ont été très simples, du type seuillage d'histogramme et rehaussement visuel simple. Sur la figure 3, on montre une de ces images traitées.

Les promoteurs de satellites privés issus de l'industrie militaire américaine proposent des limites de résolution de l'ordre du mètre pour les prochaines années sur des satellites commerciaux, ce qui ouvre la porte à toute une série d'applications autrefois réservées aux photographies aériennes, comme la cartographie topographique ou les études urbaines. Le satellite IKONOS, lancé en 1999, est le premier satellite de cette série. La recherche d'une limite de résolution spatiale de plus en plus fine a cependant des inconvénients : la quantité de données générées augmente en fonction du carré du nombre d'éléments d'image (ou pixels) par côté de celle-ci, ce qui pose un problème sérieux au niveau de la transmission, du stockage et du traitement de l'information. De plus, les images à limite de résolution très fine soulèvent des problèmes d'échelle qui rendent caduques les méthodes d'analyse et de traitement développées avec des données plus grossières. Cela demandera donc le développement de nouvelles approches au niveau du traitement des images, mais aussi au niveau de notre compréhension de la dimension spatiale et temporelle des paysages (SCOTT *et al.*, 1993).

Dans le domaine du traitement des données et de l'extraction de l'information, dans la période concernée, on a vu le développement de nouvelles méthodes d'analyse, dans la foulée de ce qui se passait ailleurs dans le monde. Tout l'art de la télédétection consiste en effet à extraire l'information utile à partir de données qui sont de plus en plus nombreuses et de plus en plus complexes. D'une part, on assiste à une augmentation quasi exponentielle de la quantité d'information disponible, par la multiplication des satellites et la variété des capteurs. Celle-ci s'accompagne d'une amélioration des limites des résolutions spatiale, spectrale et temporelle, cette dernière étant surtout obtenue par la combinaison de données



(CD du CCT, 1998)

Figure 3. Image RSO de RADARSAT de la rivière Rouge au Manitoba durant la crue de 1997. Les secteurs inondés sont représentés par une texture lisse. La ville de Winnipeg est au nord et le secteur inondé se draine vers le canal de dérivation qui contourne la ville par l'est.

venant de plates-formes différentes. D'autre part, nos capacités d'analyse et de traitement des données ne cessent d'augmenter; l'information extraite des images reflète des réalités de plus en plus complexes et nuancées. La multiplication des stations de réception et des réseaux de communications permet une plus grande diffusion de ces informations, mais la complexité croissante des logiciels et des données exige une formation des usagers de plus en plus souvent remise à jour.

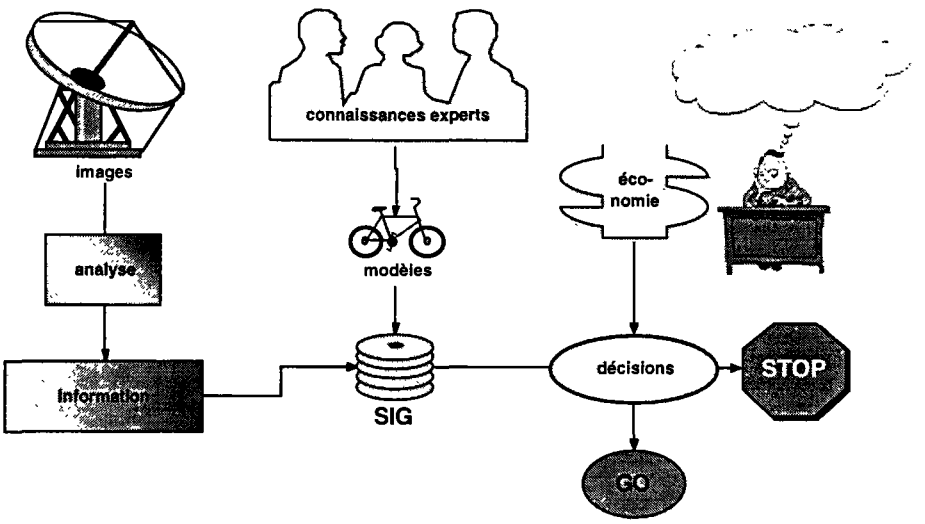
D'un autre côté, cette avalanche de données et de systèmes ne répond pas toujours aux besoins des usagers. Elle correspond à une poussée technologique vers des marchés qui ne sont pas toujours très bien définis et elle ne répond que partiellement aux besoins en

information des gestionnaires des ressources. Le temps très long, souvent de l'ordre de la dizaine d'années, requis pour la conception, la fabrication et le lancement d'un gros système spatial d'observation de la Terre a pour effet que les solutions technologiques qu'on y trouve sont souvent dépassées au moment de leur mise en orbite. On n'a qu'à penser au développement rapide durant les dernières années des télécopieurs et des tables de numérisation dont la technologie est très voisine des capteurs imageurs à barrettes que l'on trouve sur des satellites comme SPOT, mais à une infime fraction du coût. Les nouveaux micro-ordinateurs portatifs graphiques et les caméras vidéo miniaturisées ont atteint un développement tel que leur technologie pourrait être facilement adaptée sur de très petits satellites à coût réduit. Il faut s'attendre à des développements rapides dans ce secteur au cours des prochaines années, et donc, à une nouvelle accélération de la quantité de données disponibles à des coûts de plus en plus bas. Les utilisateurs ont cependant changé leurs approches vis-à-vis de l'analyse des données de télédétection. À la fin de la décennie actuelle, un plus grand nombre d'entre eux se soucie de la qualité des données, de leur représentativité et de leur étalonnage radiométrique. L'information extraite devient donc meilleure et plus fiable et peut être intégrée à des systèmes d'information.

3. L'intégration de l'observation de la Terre à la géomatique

Dans la foulée du développement accéléré de l'informatique, les systèmes d'information géographique (SIG) ont pris beaucoup d'ampleur comme outils d'analyse spatiale, alimentés par les données de télédétection et des données connexes de plus en plus fréquemment disponibles sous forme numérique. Les systèmes voient leur puissance et le nombre de leurs fonctions augmenter régulièrement, tant au niveau du matériel que des logiciels. Les utilisateurs sont de plus en plus conscients des coûts et des bénéfices des SIG pour la mise à jour des grandes bases de données à références spatiales. Les scientifiques et les gestionnaires s'interrogent davantage sur la qualité et la précision des données, en posant des questions sur la propagation des erreurs dans les systèmes d'information (HEUVELINK *et al.*, 1989). La non-réversibilité de certaines opérations, comme les conversions des données matricielles à vectorielles et la multitude de formats variant d'un système à l'autre posent cependant encore des problèmes aux utilisateurs pour le transfert des données (VAN DER KNAAP, 1992). Malgré les progrès réalisés dans les affichages par icônes, l'interface avec l'usager est encore loin d'être convivial pour la plupart des systèmes. Souvent les commandes ne suivent pas une démarche intuitive ou logique, les mêmes fonctions pouvant porter des noms différents selon les fabricants. Mais la situation s'améliore sous l'effet de la demande des usagers et de la pression de la concurrence.

De plus en plus d'applications de la télédétection se développent dans le contexte de la modélisation environnementale, où les données obtenues par les satellites d'observation de la Terre ne sont qu'un des éléments d'une démarche plus large s'appuyant sur l'application et la spatialisation de modèles décrivant le fonctionnement des écosystèmes. Ces modèles peuvent être des modèles de croissance végétale, des modèles de pertes de sol, des modèles de variations climatiques à long terme, ou, plus récemment, des modèles qualitatifs ou semi-quantitatifs laissant une place à l'incertitude. La combinaison des modèles et des SIG constitue un outil puissant d'aide à la décision (GOODCHILD *et al.*, 1993), qui permet d'étendre à un ensemble régional des modèles qui ont été mis au point sur des sites limités. Sur la figure 4, on montre la constitution d'un modèle d'aide à la décision centré sur un SIG, où la télédétection n'intervient que pour évaluer l'utilisation du sol dans la région étudiée.



(adapté de BONN, 1998)

Figure 4. Exemple de conception d'un modèle d'aide à la décision basé sur un SIG et utilisant la télédétection.

Au besoin, les modèles peuvent s'appuyer sur des systèmes experts qui permettent de mettre à profit l'expérience gagnée par des décisions prises antérieurement dans des conditions analogues. Ils constituent donc le support privilégié d'une aide à la prise de décision que l'on retrouve dans des grands projets interdisciplinaires comme le projet BOREAS (Boreal Ecosystem and Atmosphere Study) en Amérique du Nord ou MEDALUS (Mediterranean Desertification and Landuse) en Europe.

Ces projets sont caractérisés par une intégration poussée des composantes physiques, socio-économiques et politiques, sous la forme d'un système informatisé d'aide à la décision (SIAD) dont la partie visible pour les décideurs utilise un niveau de langage simple et non technique qui réfère en arrière-plan à une base de données spatiales et à des systèmes experts utilisant les informations extraites des images aéroportées ou satellitales. Des exemples d'applications pour ce type de systèmes sont le choix de tracés d'autoroutes, de trains à grande vitesse ou de lignes électriques, la gestion de l'évacuation des populations en cas de catastrophe naturelle ou la planification de la lutte contre les incendies de forêt.

4. L'évolution du contexte politico-commercial et du marché des applications

Le développement des applications de la télédétection se situe donc dans un contexte en évolution rapide, où l'on sort de plus en plus des laboratoires de recherche pour intégrer l'information extraite des images dans des mécanismes de gestion et de compréhension du fonctionnement des écosystèmes. Les applications opérationnelles sont toutefois encore peu nombreuses et répondent habituellement à des problèmes simples, comme le calcul des surfaces agricoles et forestières, l'observation des glaces flottantes sur la mer et l'étendue

des inondations. Dans ces deux derniers cas, l'utilisation des données radar a démontré un grand potentiel. De plus en plus, le marché des applications de la télédétection et des SIG passe progressivement entre les mains de bureaux d'études qui ne sont plus nécessairement des entreprises spécialisées dans ce domaine, mais plutôt des entreprises de services en environnement, arpentage, agronomie ou foresterie ayant intégré ces techniques à leurs opérations courantes.

Les tentatives pour rentabiliser la vente d'images par la privatisation des agences de distribution sont un demi-échec, car le jeu de la concurrence aura toujours pour effet de faire baisser les prix en dessous du seuil de rentabilité des entreprises, grâce à la multiplication des sources de données. Les prix affichés pour les images sont rarement respectés dans la pratique, sauf pour des données acquises en commande spéciale et livrées dans un laps de temps très court. Les entreprises de distribution d'images doivent donc être soutenues par les gouvernements, que ce soit directement par des contrats fictifs de vente de données et de services ou indirectement par du prêt de personnel détaché. Les gouvernements sont aussi leurs principaux clients, car ce sont eux qui ont le mandat de la gestion de l'environnement et des ressources naturelles.

Plusieurs intervenants commencent d'ailleurs à remettre en cause le mythe de la privatisation et de la rentabilité de la vente des données, issu des courants politiques conservateurs des années 1980, où une agence spatiale appartenant à un gouvernement doit céder gratuitement ses données à une entreprise privée pour que ce même gouvernement puisse ensuite les racheter au prix fort. Cela revient donc à faire payer les contribuables deux fois pour les mêmes données, puisque le gouvernement finance l'agence spatiale et la fabrication des données. Les agences spatiales ont donc été obligées de mettre en place une multitude de programmes de promotion de l'utilisation des images (PEPS, ADRO, PPUR, EDOT) permettant de contourner ces règles commerciales pour fournir des données à prix réduit aux utilisateurs à faible revenu comme les universités. Certains suggèrent donc d'adopter pour les données d'observation de la Terre une politique commerciale qui ressemble à celle qui est utilisée pour les données météorologiques, considérées comme faisant partie du patrimoine public national et vendues à un prix qui couvre essentiellement les frais de reproduction. Les États-Unis sont plus avancés que beaucoup d'autres pays sur cette question en donnant même un accès quasi gratuit aux données topographiques numériques (ROCHON. 1999).

Les données du capteur ETM de LANDSAT-7 seront disponibles au prix raisonnable de 400 $ US pour une image entière, ce qui est abordable même pour des laboratoires universitaires. Les États-Unis ont donc laissé au secteur privé le marché des données à très haute résolution spatiale avec les satellites comme IKONOS et Orbimage qui font concurrence à la photographie aérienne. Les utilisateurs à faible budget pourront donc se payer le luxe d'acheter des images ETM de LANDSAT au prix affiché plutôt que de dépenser leur énergie en formalités administratives pour bénéficier des programmes à prix réduit. Cette politique aura certainement un effet d'entraînement sur les satellites concurrents.

Le programme canadien RADARSAT-2 et la société de distribution RADARSAT International sont passés récemment sous contrôle américain par le biais du rachat de la société MDA par Orbimage. RADARSAT-2 sera donc un satellite américain payé par les contribuables canadiens!

5. Le rôle des francophones dans cette évolution

Les francophones constituent moins de 3 % de la population nord-américaine et ils sont surtout concentrés au Québec. En dehors du Québec, leur présence est plus un élément folklorique qu'une force économique mais, par contre, au Québec leur force économique et leur dynamisme dépassent leur poids démographique. Le Québec a contribué pour un montant important au financement du programme RADARSAT-1. Le Gouvernement fédéral canadien offre des services en français (essentiellement de la traduction, donc une information de deuxième main, retardée et aseptisée) dans les régions « où le nombre le justifie ».

Mais, d'un autre côté, le Gouvernement fédéral invalide régulièrement par ses tribunaux constitutionnels les lois québécoises visant à protéger la langue française, sous la pression des extrémistes de la minorité privilégiée des anglophones du Québec soucieuse de préserver son « apartheid » linguistique. Dans le domaine de la télédétection, les organismes dirigeants du domaine spatial (Agence spatiale canadienne, Centre canadien de télédétection) sont essentiellement issus de la communauté anglophone de l'aviation et des télécommunications. Cette communauté, fortement royaliste et conservatrice (le Duc d'Édimbourg est encore le « patron » de la Société canadienne de télédétection), n'a pas cédé facilement la place aux francophones et ceux-ci occupent presque toujours des postes subalternes dans les organisations fédérales, à moins qu'ils ne renoncent à travailler et à communiquer en français.

Toutefois, les francophones sont très actifs et ont développé un grand nombre des applications innovatrices de la télédétection et de la géomatique au Canada. L'Association québécoise de télédétection, établie en 1974, compte plus de membres que la Société canadienne du même nom. Les québécois sont proportionnellement plus actifs au plan international par le biais de leurs entreprises plus jeunes et plus dynamiques, leur productivité scientifique dans le domaine est supérieure et ils ont développé de nombreux liens entre les universités et les industries. Le Québec offre le seul doctorat en télédétection au Canada (Sherbrooke) et a mis récemment en place un réseau pan-canadien de centres d'excellence en géomatique (GÉOIDE) basé à l'Université Laval. Le CARTEL (Centre d'applications et de recherches en télédétection) de l'Université de Sherbrooke est le plus important centre au Canada dans le domaine (11 professeurs, 50 étudiants de 2ème et 3ème cycle) et il entretient de nombreuses relations internationales, dont la coordination du Réseau de télédétection de l'AUF de 1987 à 1999. Le Précis de télédétection rédigé dans le cadre de ce réseau (BONN et ROCHON, 1992) a été tiré à 6 000 copies et il est utilisé dans tous les pays francophones. Les actions combinées du réseau et de l'AQT ont eu un effet majeur d'internationalisation de la télédétection francophone au Canada.

Plusieurs autres universités québécoises offrent des programmes partiels ou complémentaires en télédétection (Université Laval, INRS-eau, Université de Montréal, UQAM, UQTR, UQAC, UQAR, Université McGill, École de technologie supérieure) et participent activement à des équipes inter-universitaires. Ce dynamisme des institutions québécoises dans le domaine est complété par celui des entreprises, dont les dirigeants et les employés sont souvent issus du réseau universitaire québécois en télédétection. Les intervenants québécois dans le domaine ont donc réussi proportionnellement mieux que leurs concurrents anglophones, malgré un soutien gouvernemental plus limité. Mais ce dynamisme reste fragile malgré tout, à cause de la masse critique toujours faible de la communauté francophone en Amérique du Nord.

6. Références

BONN, F. 1998. La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse, science et changements planétaires*, vol. 9, n° 3, p. 185-192.

BONN, F. et ROCHON, G. 1992. *Précis de Télédétection, Vol. 1, Principes et Méthodes.* Les Presses de l'Université du Québec et AUPELF-UREF, Sainte-Foy, 485 p.

CCT. 1998. RADARSAT Monitors the 1997 Red River Flood in Manitoba. CD-ROM, Centre canadien de télédétection et Agence spatiale canadienne.

GOODCHILD, M.F., PARKS, B.O. and STEYAERT, L.T. 1993. *Environmental modeling with GIS.* Oxford University Press, 488 p.

HEUVELINK, G.B.M., BURROUGH, P.A. and STEIN, A. 1989. Propagation of errors in spatial modelling with GIS. Int. Journ. of GIS, vol. 3, p. 303-322.

NASA, 1988. *Earth system science, a closer view: a program for global change.* 208 p.

ROCHON, G. 1999. L'accès aux données à références spatiales. Conférence invitée, VIII[es] journées scientifiques de l'AUF, Lausanne, Novembre 1999.

SCOTT, J.M., DAVIS, F., CSUTI, B., NOSS, R., BUTTERFIELD, B., GROVES, C., ANDERSON, H., CAICCO, S., D'ERCHIA, F., EDWARDS, T.C., ULLIMAN, J. and WRIGHT, R.G. 1993. Gap analysis: a geographical approach to protection of biological diversity. Wildlife Monographs. n° 123, p. 1-41.

VAN DER KNAAP, W.G.M. 1992. The vector to raster conversion: (mis)use in geographical information systems. Int. Journ. of GIS, vol. 6, p. 159-170.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 439-456

45

Bilan régional de la télédétection en Afrique subsaharienne

EMMANUEL TONYÉ

Laboratoire d'électronique et de traitement du signal, Département de génie électrique, École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé, B.P. 8390, Yaoundé, Cameroun; téléphone : +237 22-86-20; télécopieur: + 237 23-18-41; courriel : etonye@polytech.uninet.cm ou tonyee@hotmail.com

Résumé

Le bilan régional « Afrique subsaharienne » sur le développement de la télédétection au cours de la dernière décennie a été fait et les constats suivants émergent :

1) l'évolution des laboratoires et de la formation universitaire, des agences gouvernementales et des entreprises privées est timide;

2) des instituts nationaux de cartographie affichent une politique volontariste de modernisation de leur appareil de production de cartes faisant recours à l'outil télédétection;

3) les capacités accrues de la microinformatique depuis 1995 permettent l'utilisation des techniques et des méthodes sophistiquées de traitement numérique d'images; certaines équipes développent leur propre outil de traitement d'image ou alors adaptent ceux du marché à leur préoccupation nationale de traitement; en dehors des micro-ordinateurs, très peu d'équipements de terrain et d'édition, notamment de cartes, ne sont disponibles;

4) les perspectives de développement peuvent être identifiées de la manière suivante :

- le besoin en images, notamment multisources, multidates et de haute résolution reste crucial;
- le besoin en formation tant initiale que continue doit s'appuyer sur les possibilités d'enseignement à distance notamment par Internet et aboutir à des actions de mise en œuvre de curricula de formation en télédétection dans le cadre de l'Université virtuelle francophone apparaît comme un objectif majeur;
- le besoin en techniques, méthodes et applications des utilisateurs passe par une

campagne de sensibilisation notamment la tenue régulière des séminaires, de journées scientifiques et autres campagnes d'informations.

1. Introduction

Pour faire le bilan régional « Afrique subsaharienne » sur le développement de la télédétection au cours de la dernière décennie, on peut notamment recourir aux publications des organisations suivantes :

- le Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF) à travers, d'une part, le répertoire des membres et, d'autre part, les actes des journées scientifiques de télédétection;
- l'Agence spatiale européenne à travers les actes des congrès et des séminaires organisés annuellement;
- le Colloque africain de recherche en information (CARI) à travers les communications concernant la télédétection, d'une part, et les travaux du projet VOAR (Vision par ordinateur en Afrique par la recherche) coordonné par l'INRIA français, d'autre part.

De plus, à partir d'une base de données du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et celle de l'Association africaine de télédétection, un échantillon d'une vingtaine de personnes ressources permet de réaliser le bilan en mettant notamment l'accent sur les aspects suivants : 1) la situation des laboratoires et de la formation universitaire; 2) les efforts des instituts nationaux de cartographie; 3) l'évolution de l'utilisation d'images, des techniques et méthodes; 4) les perspectives de développement ainsi que le rôle du réseau télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie.

2. Situation des laboratoires et de la formation universitaire

L'évolution des laboratoires et de la formation universitaire, des agences gouvernementales et des entreprises privées est timide. Dans bien des pays, elle se manifeste par des documents écrits qui ne traduisent pas toujours la même pertinence dans l'action réelle des équipes. Dans la plupart des pays, on compte en moyenne 2 à 3 laboratoires, 1 à 2 formations universitaires ainsi que plusieurs programmes gouvernementaux en relation avec les problèmes environnementaux et l'agriculture. Des entreprises privées, particulièrement celles des industries pétrolières, de production d'énergie électrique et de distribution des eaux développent des programmes de télédétection. Ces études recourent systématiquement à l'expertise internationale et non locale.

3. Instituts nationaux de cartographie

Des instituts nationaux de cartographie affichent une politique volontariste de modernisation de leur appareil de production de cartes faisant recours à l'outil télédétection. Des programmes nationaux notamment de lutte contre les catastrophes, d'aménagement du territoire encouragent l'usage de la télédétection pour l'établissement de spatio-cartes à intégrer dans les systèmes d'information géographique. Le programme régional de gestion

de l'information environnementale en Afrique Centrale avec les appuis du PNUD, des coopérations française, belge, allemande et canadienne est un exemple de vision novatrice, initiée en 1997, faisant recours à l'outil télédétection.

4. Évolution de l'utilisation d'images, des techniques et méthodes

L'évolution de l'utilisation d'images, des techniques et méthodes suit les progrès internationaux à cause de la mobilité des chercheurs. À l'utilisation des images du visible et de l'infrarouge, en 1990, se substitue soit l'utilisation combinée de ces images avec les images radar, soit exclusivement l'utilisation des images radar particulièrement dans les zones à fort couvert nuageux. La disponibilité des images multidates reste assez peu établie ainsi que celle des images à résolution inférieure à 10 m. Les capacités accrues de la microinformatique depuis 1995 permettent l'utilisation des techniques et des méthodes sophistiquées de traitement numérique d'images. Certaines équipes développent leur propre outil de traitement d'image ou alors adaptent ceux du marché à leur préoccupation nationale de traitement. En dehors des micro-ordinateurs, très peu d'équipements de terrain et d'édition, notamment de cartes, ne sont disponibles.

5. Perspectives de développement

Les perspectives de développement peuvent être identifiées de la manière suivante :

a) le besoin en images, notamment multisources, multidates et de haute résolution reste crucial; il faut encourager les partenariats nord/Afrique subsaharienne comme solution à l'acquisition d'images en quantité et en qualité;

b) le besoin en formation tant initiale que continue doit s'appuyer sur les possibilités d'enseignement à distance notamment par Internet;

c) le besoin en techniques, méthodes et applications des utilisateurs passe par une campagne de sensibilisation notamment la tenue régulière des séminaires, de journées scientifiques et autres campagnes d'informations.

6. Rôle du Réseau Télédétection

Le rôle du Réseau Télédétection a été très déterminant. Grâce à l'impulsion du Réseau, des équipes de plusieurs membres ont pu se constituer. Les premiers résultats concernent la formation des formateurs. La mobilité des chercheurs africains en direction du nord pour des stages et l'accueil des chercheurs du nord en Afrique pour animer des séminaires est une nécessité et un impératif qu'il faut continuer à encourager. Aboutir à des actions de mise en œuvre de curricula de formation en télédétection dans le cadre de l'université virtuelle francophone apparaît comme un objectif majeur. Des résultats encourageants apparaissent sur les tableaux 1 et 2 et sur la figure 1. Les résultats des tableaux 3 et 4 et de la figure 2 découlent d'autres initiatives. Ces sources des références ne sont pas les seules; elles sont présentées pour montrer l'effort des chercheurs des pays d'Afrique Subsaharienne.

Tableau 1. Nombre de membres et d'organisations africaines dans le Réseau Télédétection en novembre 1999 et comparaison avec celui de l'AARSE

PAYS	AUF		AARSE	
	Nombre de membres	Nombre d'organismes	Nombre de membres	Nombre d'organismes
ALGÉRIE	44	10	1	1
BÉNIN	13	4	7	2
BOTSWANA			1	1
BURKINA FASO	17	14	7	2
BURUNDI	1		1	
CAMEROUN	19	15		
CAP VERT	1	0		
COMORES			1	
CONGO	5	5		
CÔTE D'IVOIRE	66	18	11	4
DJIBOUTI		1		
ÉGYPTE	3		20	
ÉTHIOPIE		1	4	1
GABON	5	5		
GAMBIE			1	1
GHANA			13	4
GUINÉE	5	4		
ILE MAURICE	2			
KENYA	1	1	4	1
MADAGASCAR	24	8	2	1
MALAWI			4	2
MALI	5	11	2	
MAROC	50	16	1	
MAURITANIE	5	3	1	
MOZAMBIQUE			1	1
NIGER	7	3	8	1
NIGERIA		1	78	9
OUGANDA			1	1
RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE (RCA)	1			
RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO (RDC)	3	7		
RWANDA	1	1		
SÉNÉGAL	43	15	20	2
SIERRA LEONE			1	
SOUDAN			3	2
TANZANIE			5	2
TCHAD	5	1	6	2
TOGO	7	1		
TUNISIE	34	16	2	2
ZIMBABWE			2	

AUF = Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie
AARSE = Réseau African Association of Remote Sensing of the Environment

Tableau 2. Publications des ressortissants des pays africains subsahariens lors des Journées scientifiques de Télédétection

Thématiques	Pays	Titre des travaux et auteurs
1990 : Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse	Burkina-Faso, Ouagadougou	1. Un exemple de suivi diachronique de milieux saoudano-sahéliens au Burkina-Faso par télédétection. Auteur : JEAN-MARIE OUADBA
	Côte-d'Ivoire, Abidjan	1. Étude de l'évolution de la végétation du "V Baoulé" (contrat forêt/savane en Côte-d'Ivoire) par télédétection. Auteur : KOUAKOU ÉDOUARD N'GUESSAN 2. Étude par télédétection de l'évolution de l'environnement péri-lagunaire de Bingerville, Bassam et Ono. Auteurs : KOUAKOU ÉDOUARD N'GUESSAN, YOUPO OREGA et MAMADOU FOFANA
	Mali, Bamako	1. Évaluation des images TM et SPOT pour le suivi de l'étalement du fleuve Niger (Mali) dans une perspective d'aménagement hydro-agricole. Auteurs : KEITH P. B. THOMSON, PAUL GILBERT, SOUMALIA SAMAKÉ et ANNICK JATON
	Niger, Niamey	1. Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole au Sahel. Auteurs : ABDOUL'RHAMANE IRO, MICHEL YERGEAU et GOZE BERTIN BÉNIÉ 2. Les modelés éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphisme, note préliminaire. Auteurs : SALIFOU KARIMOUNE, ANDRÉ OZER et MICHEL ERPICUM
	Sénégal, Dakar	1. L'approche du Centre de recherches pour le développement international dans la lutte contre la désertification en Afrique et l'apport de son programme en cartographie et télédétection. Auteurs : ALIOUNE B. CAMARA, GILLES CLICHE et ROBERT VALANTIN 2. Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal, par imagerie satellitaire. Auteurs : BERNARD MOUGENOT, PATRICK ZANTE et JEAN-PIERRE MONTOROI

Thématiques	Pays	Titre des travaux et auteurs
	Sénégal, Dakar (suite)	3. Analyse spatiale de la pression animale comme facteur de désertification dans le nord du Sénégal. Auteur : YVES PRÉVOST
1991 : Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique	Burkina-Faso, Ouagadougou	1. Les facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina-Faso : l'exemple de Pobé-Mengao. Auteurs : SAMUEL NAKOLENDOUSSE, ALAIN NINDAOUA SAVADOGO et A. ROULEAU 2. Inventaire cartographique des ressources renouvelables du Burkina-Faso par télédétection. Auteurs : JACQUES FONTÉS et SITA GUINKO
	Côte d'Ivoire, Abidjan	1. Suivi par télédétection spatiale d'une forêt dense tropicale humide soumise à des pressions agricoles. Auteur : KOUAKOU ÉDOUARD N'GUESSAN
	Mali, Bamako	1. Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour une meilleure évaluation des formation végétales actives. Auteurs : PHILIPPE CHAMARD, MARIE-FRANÇOISE COUREL, MICHELE DUCOUSSO, MARIE-CLAIRE GUÉNEGOU, JEANNINE LE RHUN, JACQUES-ÉDOUARD LEVASSEUR, CATHERINE LOISEL et MEME TOGOLA
	Niger, Niamey	1. Suivi par télédétection de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger). Auteurs : SALIFOU KARIMOUNE, JEAN ALEXANDRE et ANDRÉ OZER
	Sénégal, Dakar	1. Contribution de l'imagerie satellitaire à l'optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal. Auteurs : LUC SÉGUIS, HERVÉ CHEVILLOTTE, CHANTAL GASCUEL, PASCAL BOIVIN et ÉRIK BRAUDEAU
	Zaïre, Buta	1. La carte morphostructurale de l'Ituri oriental (nord-est du Zaïre) : étude à partir de données satellitaires TM de Landsat. Auteurs : MOKILI MBULUYO, ANDRÉ OZER et JOHAN LAVREAU

Thématiques	Pays	Titre des travaux et auteurs
1993 : Télédétection des ressources en eau	Burkina Faso, Ouagadougou	1. Cartographie opérationnelle des ressources en eau de surface au Burkina Faso. Auteurs : YAZON GNOUMOU, MICHEL YERGEAU, GOZE BERTIN BÉNIÉ, KARIM TRAORÉ, HÉDIA CHAKROUN, KALIFA GOITA et ABDOULRASMANE TAO
	Côte d'Ivoire, Abidjan	1. Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu cristallin : cas d'Odienné, Côte d'Ivoire. Auteurs : ISSIAKA SAVANE, GOZE BERTIN BÉNIÉ, Q. HUGH J. GWYN et JEAN BIÉMI 2. Caractérisation du panache turbide d'un fleuve en zone intertropicale à l'aide d'une image HRV de SPOT : cas du Bandama en Côte d'Ivoire. Auteurs : KOUAKOU AFFIAN, PATRICE JOURDA, KOUAMÉ AKA et JACQUES ABE
	Niamey, Niger	1. Contribution de la télédétection et des mesures spectrales à l'étude de la désertification dans le secteur sahélien du Niger. Auteurs : SALIFOU KARIMOUNE, ANDRÉ OZER, PHILIPPE TREFOIS et ELS GOOSSENS
	Sénégal, Dakar	1. Modélisation de la signature spectrale d'eau continentale par prise en compte de l'épaisseur de la tranche d'eau, de la nature du fond et de la concentration de matières en suspension : exemple du fleuve Sénégal. Auteur : LUC SÉGUIS 2. Evolution morphodynamique et suivi par télédétection de l'embouchure du fleuve Sénégal. Auteur : ALIOUNE KANE
1995 : Télédétection des milieux urbains et périurbains	Bénin, Cotonou	1. Application de la télédétection à l'étude des changements urbains et des transformations du littoral à Cotonou (Bénin). Auteur : CLAUDE LUCIEN CODJIA
	Burkina Faso Ouagadougou	1. Apport de la télédétection et des SIG à la gestion urbaine : cas de Ouagadougou (Burkina Faso). Auteurs : NOUROU MOUCHARAF PADONOU, MAMADOU SINE CAMARA et MAMADOU SEKOU KEITA

Thématiques	Pays	Titre des travaux et auteurs
	Cameroun, Yaoundé	1. Identification des acteurs de la production de l'espace en milieu africain à partir de l'imagerie satellitaire : exemples de Bamako (Mali) et de Maroua (Cameroun). Auteur : MICHEL SIMEU KAMDEM
	Mauritanie, Nouakchott	1. Technique d'élaboration d'une spatiocarte de la région de Rosso (Mauritanie). Auteur : CHEIKH SOW
	Sénégal, Dakar-Fann	1. Détermination d'indices pluvieux de perturbations d'hiver sur le Sénégal, entre 1989 et 1991, par une combinaison de données radiométriques et de mesures pluviométriques. Auteurs : AMADOU THIERNO GAYE et SIMÉON FONGANG
1997 : La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes	Bénin, Cotonou	1. Méthode pratique d'amélioration des classifications dirigées dans l'étude de l'habitat de la ville de Cotonou (Bénin). Auteurs : CLAUDE LUCIEN CODJIA et ÉTIENNE DOMINGO 2. Utilisation des mesures au sol et des données satellitaires pour l'étude de la dynamique du trait de côte de la ville de Cotonou. Auteurs : CLAUDE LUCIEN CODJIA et ÉTIENNE DOMINGO
	Cameroun, Yaoundé	1. Analyse comparée de la dynamique spatiale des villes de Bamako (Mali) et de Garoua (Cameroun) à partir d'images satellitaires et de données auxiliaires. Auteurs : JACQUES CHAMPAUD, RÉGINE CHAUME, NADINE DESSAY, BALLA DIARRA, et MICHEL SIMEU KAMDEM 2. Application de la réalité de terrain et de l'imagerie radar à la cartographie des mangroves de la région de Douala (Cameroun). Auteurs : EMMANUEL TONYÉ et ALAIN AKONO
	Côte d'Ivoire, Abidjan	1. Techniques de prétraitement des données photométriques. Auteurs : ABDOURAHAMANE KONARE, JEAN BERTRAND, MICHEL LEGRAND, CLAUDE DEVAUX et IROPLO CLARK

Thématiques	Pays	Titre des travaux et auteurs
	Côte d'Ivoire, Abidjan (suite)	2. Exemple de traitement numérique de données auxiliaires du type photographies aériennes : étude de la dynamique côtière en liaison avec le canyon du Trou Sans Fond au droit du port d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Auteurs : KOUADIO AFFIAN, JEAN BIÉMI et PIERRE GIOAN 3. Système d'information hydrogéologique pour une évaluation du potentiel hydrique en milieu cristallophyllien fissuré : la région de Biankouma-Man (ouest de la Côte d'Ivoire). Auteurs : JEAN BIÉMI, PIERRE GIOAN, KOUADIO AFFIAN, JEAN PATRICE JOURDA ET FERNAND KOUAMÉ
1999 : La télédétection en Francophonie : analyse et perspectives	Bénin, Cotonou	1. Évaluation du couvert végétal par télédétection : expériences acquises par le CENATEL de 1993 à 1998. Auteur : V. J. MAMA
	Burkina Faso, Ouagadougou	1. Inventaire des plans d'eau de surface et évaluation des zones inondées par télédétection (HVR de SPOT et RSO de ERS) dans le bassin du Nakambé au Burkina Faso. Auteurs: A. NONGUIERMA et A. ROYER 2. La télédétection comme moyen d'étude préliminaire du système hydrogéologique des bassins versants dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. Auteur : K. TRAORÉ 3. Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso : cas du bassin versant de Bidi (province du Yatenga). Auteurs : Y. KOUSSOUBÉ et A. N. SAVADOGO 4. Suivi diachronique des feux de brousse à l'aide des épreuves-minutes MSS de Landsat : région centre-ouest du Burkina Faso. Auteurs : F. L. TRAORÉ et J. PARNOT

Thématiques	Pays	Titre des travaux et auteurs
	Cameroun, Yaoundé	1. Contribution de la morphologie mathématique à la cartographie automatique de l'occupation du sol (région de l'extrême-nord du Cameroun). Auteur : E. FOTSING 2. Télédétection radar et reconnaissance des formes urbaines : application à la ville de Douala au Cameroun. Auteur : D. MOUAFO 3. Combinaison de perceptrons multicouches appliquées à la classification des textures en milieu urbain à partir d'images RSO de ERS-1 : ceas de la ville de Ngaoundéré au Cameroun. Auteurs : A. NDI NYOUNGUI, M. TCHOTSOUA, L. BITJOKA et A. AYISSI 4. Extraction du périmètre urbain sur une image radar à synthèse d'ouverture par analyse de texture et morphologie mathématique : application à une image ERS-1 de la ville de Yaoundé (Cameroun). Auteurs : E. TONYÉ, A. AKONO, A. NDI NYOUNGUI et R.-J. ASSAKO 5. Suivi des milieux urbains et périurbains par interférométrie radar : application à l'étude de la zone littorale du sud-est du Cameroun et de la ville de Paris (France). Auteurs : B. FRUNEAU, J. MVOGO et J.-P. RUDANT 6. Bilan régional de la télédétection en Afrique subsaharienne. Auteur : E. TONYÉ
	Côte d'Ivoire, Abidjan	1. Mailles paysagiques et zonalités hydrogéologiques en zone semi-montagneuse par télédétection satellitale : deux paramètres-clés de développement régional dans l'ouest de la Côte d'Ivoire. Auteurs : A. T. TOURÉ, JEAN BIÉMI, PIERRE GIOAN, KOUADIO AFFIAN, FERNAND KOUAMÉ et O. BIH 2. Inventaire qualitatif par télédétection satellitale du parcellaire situé en bordure de rivières : un outil d'appui à un programme de développement agricole de la région de Man (ouest de la Côte d'Ivoire). Auteurs : PIERRE GIOAN, JEAN BIÉMI, : A. TOURÉ, KOUADIO AFFIAN, FERNAND KOUAMÉ et M. SALEY

Thématiques	Pays	Titre des travaux et auteurs
	Côte d'Ivoire, Abidjan (suite)	3. Nouvelle approche de la géométrie des aquifères en milieu cristallophyllien fissuré par les analyses statistique et fractale de données linéamentaires extraites des images satellitales : cas de la région semi-montagneuse de l'ouest de la Côte d'Ivoire. Auteurs : F. K. KOUAMÉ, PIERRE GIOAN, JEAN BIÉMI et T. LASM 4. Détermination de "couloirs" de circulation potentielle des eaux souterraines en milieu chrystallophyllien dans la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest Côte d'Ivoire) : application de la télédétection et d'un modèle de simulation d'écoulement des eaux. Auteurs : F.K. KOUAMÉ, P. GIOAN, J. BIÉMI, K. AFFIAN et K. COULIBALY 5. Cartographie des aquifères de fissures en milieu cristallin du nord-ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection. Auteurs : A. SAVANÉ et J. BIÉMI 6. Exploitation d'images numériques vidéographiques prises d'avion pour l'étude d'un environnement lagunaire : cas de la lagune Ebrié (Abidjan, Côte d'Ivoire). Auteurs : K. AFFIAN, P. GIOAN, J. BIÉMI et E. DJAGOUA 7. Essai de corrélation par traitement d'une image HRV 5XS° DE SPOT entre la dégradation des milieux naturels et les densités de population autour du Parc national du mont Péko en Côte d'Ivoire forestière. Auteurs : Y. B. KOUADIO, A. T. TOURÉ et B. Z. KOLI 8. Apport de la télédétection et des SIG pour l'étude d'impact de la typologie de l'habitat sur l'extension des capitales de l'Afrique subsaharienne héritées de la colonisation : cas d'Abidjan. Auteur : A. KONÉ
	Madagascar, Antananarivo	1. Télédétection appliquée à l'étude de l'érosion hydrique et de l'ensablement des rizières dans la région sud du lac Alaotra (Madagascar). Auteurs : L. J. RAHARIJAONA RAHARISON, T. A. RAMERISON et R. M. ANDRIANILAINA

Thématiques	Pays	Titre des travaux et auteurs
	Madagascar, Antananarivo (suite)	2. Évolution du couvert végétal de la cuvette d'Andaga (nord de Madagascar) et intégration des données satellitaires (HRV de SPOT et TM de Landsat) dans un SIG. Auteurs : S. RANDRIAMANGA, D. RANONROMBOLATIANA et M. R. RAHARISON 3. Fusion d'images de télédétection à l'aide de l'analyse multirésolution par ondelettes. Auteurs : S. RAKOTONIAINA, C. COLLET et J. B. RATSIMBAZAFY
	Mali	1. Contribution de la télédétection à l'étude de la désertification : exemples choisis en Afrique de l'Ouest. Conférencière invitée : M.-F. COUREL 2. Utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'étude diachronique de l'occupation du sol dans une région sahélienne : cas du cercle de Kolokani au Mali. Auteur : M. S. KEITA 3. Etude préalable du potentiel d'intégration des données du capteur VEGETATION dans les systèmes d'alerte précoce utilisés en région sahélienne. Auteurs : P . OZER, Y. CORNET et B. TYCHON 4. Méthode d'évaluation de la production fourragère à l'aide d'images AVHRR de NOAA au Sahel malien. Auteur : I. TOUNSI 5. Impact de la croissance spatiale de Bamako sur celle des localités périurbaines : apport des images HRV de SPOT pour le suivi de leur dynamique comparée. Auteurs : B. DIARRA et J. CHAMPAUD
	Mauritanie, Nouakchott	1. Contribution à l'étude et au suivi de la désertification en Mauritanie : caractérisation et cartographie des écosystèmes de la zone littorale à l'aide des données RSO de ERS. Auteur : C. SOW 2. Diagnostic par la télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne en Mauritanie : entropie de la désertification. Auteurs : M. MAINGUET, F. DUMAY, M. L. OULD EL HACEN et A. MAHFOUDH

Thématiques	Pays	Titre des travaux et auteurs
	Niger, Nyamey	1. Apport de la télédétection à l'étude de la dégradation du bassin versant, à l'envasement de la retenue et au suivi diachronique du plan d'eau du barrage de Dakiri (Burkina Faso). Auteurs : N. M. PADONOU et M. CHAIBOU 2. Apport des données de la télédétection multi-échelle à l'étude des paysages d'érosion au Niger. Auteurs : R. HOUSSA et J.-C. PION
	Sénégal, Dakar	1. Utilisation des images TM de Landsat pour l'estimation de la variabilité spatiale de l'humidité du sol destinée aux modèles hydrologiques de distribution. Auteurs : M. LO et I. SANDHOLT 2. Utilisation de la télédétection et des SIG pour l'étude de la dégradation par salinisation des terres agricoles de la vallée du fleuve Sénégal. Auteurs : L. MANE et P. DEFOURNY 3. Caractérisation du milieu et utilisation des données numériques de télédétection pour la cartographie de l'évapotranspiration : un exemple sur le Sénégal. Auteur : C. MBAYE
	Tchad, N'Djaména	1. Utilisation de l'imagerie aérienne et satellitaire pour l'analyse de la mutation des espaces ruraux : cas du canton Madiago dans la préfecture du Chari-Baguirmi au Tchad. Auteurs : O. H. N'DJAFA et M. F. COUREL

Tableau 3. Exemples de travaux lors du colloque Africain de recherche en informatique (CARI) en 1998 (Dakar au Sénégal)

Auteur	Titre
OLIVIER THÉPAUT, KIDIYO KPALMA AND JOSEPH RONSIN	Géocorrection et récalage d'images ERS et SPOT dans un contexte de fusion de données
RAKOTONIAINA SOLOFOARISOA	Fusion d'image de télédétection par la transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution
HENNI ABDERRAZAK SAOULI RACHIDA	Une méthode de parallélisation des algorithmes du traitement d'images
EMMANUEL TONYE ANDRÉ NDI NYOUNGUI ALAIN AKONO	Evaluation comparative de plusieur méthodes de réduction du chatoiement et de plusieurs méthodes d'analyse de texture pour la classification des images RSO

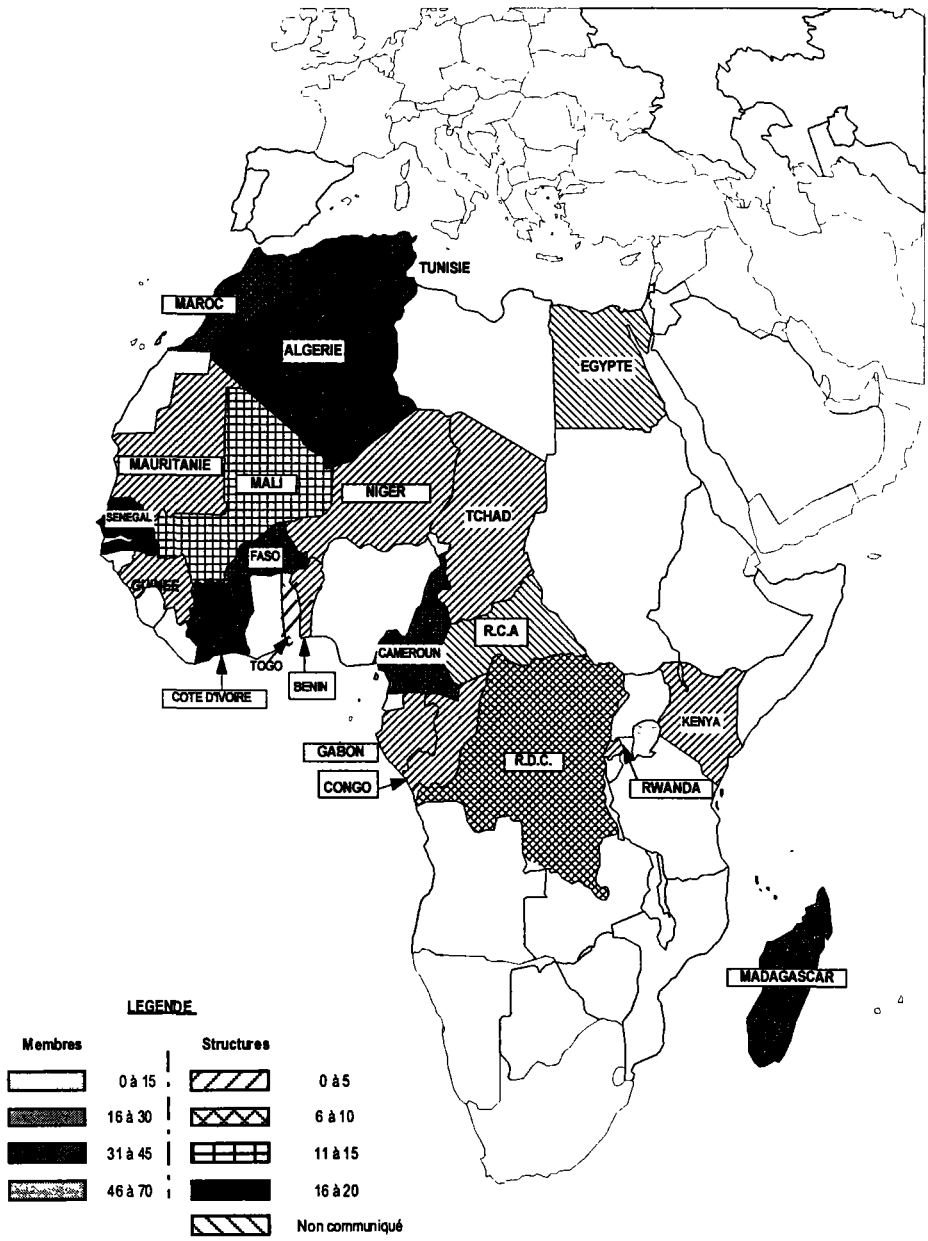


Figure 1. Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la francophonie (AUF) en Afrique (données de novembre 1999) : structures ou organismes et membres ou personnes ressources.

Tableau 4. Exemples de travaux tirés des Actes du *3rd ERS Symposium on Space at the Service of our Environment,* Florence, Italie, 17-21 mars 1997.

Auteur	Titre
P.C. SMITS, A. TRUCCO, G. VERNAZZA	Iterative Model reconstruction for phase unwrapping
JOHN L. VAN GENDEREN YONGHONG HUANG RÜDIGER GENS BOUDEWIJN S. VAN VEEN AND GERRIT HUURNEMAN	The ITC filters for improving ERS SAR interferograms
F.ROCCA, C. PRATI, A. FERRETTI	An overview of ERS-SAR interferometry
AGNÉS BÉGUÉ, SERGE GUILLOBEZ, JACQUES IMBERNON, ANDRÉ BEAUDOIN, YANN KERR	Characterization of the land use/cover in the Congo rainforest with optical and microwave data
F. DE GRANDI, J.P. MALINGREAU, M. LEYSEN, Y. RAUSTE, M. SIMARD, P. MAYAUX	Wither Radar Global Mapping of the tropical forest : New Avenues from the trees ERS-1 Central Africa Mosaic
FLORENCE RIBBES, THUY LE TOAN, JÉRÔME BRUNIQUEL, NICOLAS FLOURY, NICOLAS STUSSI, SOO CHIN LIEW ET UPIK ROSALINA NASRIN	Forest mapping in tropical region using multitemporal and interferometric ERS-1/2 data
VERA DE CAUWER ROBERT DE WULF	Potential use of ERS SAR data to discriminate natural and degraded woody vegetation types in Central Africa
Y. SMARA, BELHADJ-AISSA, B SANSAL, J. LICHTENEGGER, A. BOUZENOUNE	Multisource Ers-1 and optical data for vegetal cover assessment and monitoring in semi arid region of Algeria
WILLIAM STROOBANTS, MRILINE BÀ, CLAUDE PÉNICAND, JEAN PAUL RUDANT, EDITH THÉODORAKOPOULOS	Apports de la fusion multidate pour l'interprétation des images ERS-1 en milieu tropical
H YÉSOU, MBAIRNNADJI L , A BOLLEY, L TEZENAS DU MONTCEL ET P DE FRAIPONT	Pastures monotoring and landsurface characteristics analysis in sahelian region using multitemporal SAR data the Chad case of study
A. SHEPHERD, J.B. STEWART, M. LUPANKWA	Angular dependence of radiometric surface temperature for sparse vegetation.

Tableau 4. Exemples de travaux tirés des Actes du *3rd ERS Symposium on Space at the Service of our Environment,* Florence, Italie, 17-21 mars 1997. (suite)

ÉRIC MOUGIN, PIERRE LOUIS FRISON, PIERRE HIERNAUX	Monitoring seasonal vegetation dynamics in the Sahel with ERS wind scatterometer data
AUQUIÉRE ÉRIC, DEFOURNY PIERRE, BALTAZART VINCENT, GUISSARD ALBERT	ERS-SAR Time series analysis for maize monitoring using experimental and modeling approaches
PHILIPS D. WATTS, ANTHONY J. BARAN	A survey of tropical cirrus particle size and shape using ATSR-2 visible/near-infrared data
HAFEDH HAJJI, DENIS BONICEL, ALFRED RAMAMONJIARISOA, MANIRINA JOELSON	Use of SAR images to study coastal processes
RUDANT JEAN PAUL, BALTZER FRÉDÉRIC, TUPIN FLORENCE, ABATA THOMAS, AMOUGOU AKOA, NDONGO DIN, AKONO ALAIN, TONYÉ EMMANUEL	Distinction entre les formations végétales littorales et continentales dans leur rapport avec la géomorphologie : Intérêt des, images ERS1.(Projet AOL-F203, Cameroun)
ANNICK LEGELEY-PADOUANI, ANISAIT BEAUVAIS, EMMANUEL TONYÉ, ALAIN AKONO, JEAN PAUL RUDANT	Classification d'une image radar : application à la cartographie automatique de la mangrove autour de la région de Douala (Cameroun)

7. Remerciements

Je remercie l'Agence universitaire de la francophonie pour son appui financier et matériel. Je remercie par ailleurs les rapporteurs, et plus particulièrement messieurs François Boivin et Jean-Marie Dubois pour leurs suggestions appropriées.

8. Conclusion

Les pays africains subsahariens affichent une volonté à maîtriser les outils et méthodes de télédétection pour la connaissance et le suivie et la protection de leur environnement. Dans ce bilan, nous avons constaté que leur effort dépende fortement des pays occidentaux notamment à travers les programmes de la Francophonie, des Nations-Unies et de l'Union Européenne. Certains centres de recherche africains créés il y a une dizaine d'années, ont un développement peu conséquent une fois cessés les financements extérieurs notamment occidentaux. De nouveaux centres émergent concernent les laboratoires associés francophones de l'Agence Universitaire de la Francophonie. La nécessité de formation reste un impératif ainsi que l'acquisition d'images multisources et de hautes résolutions.

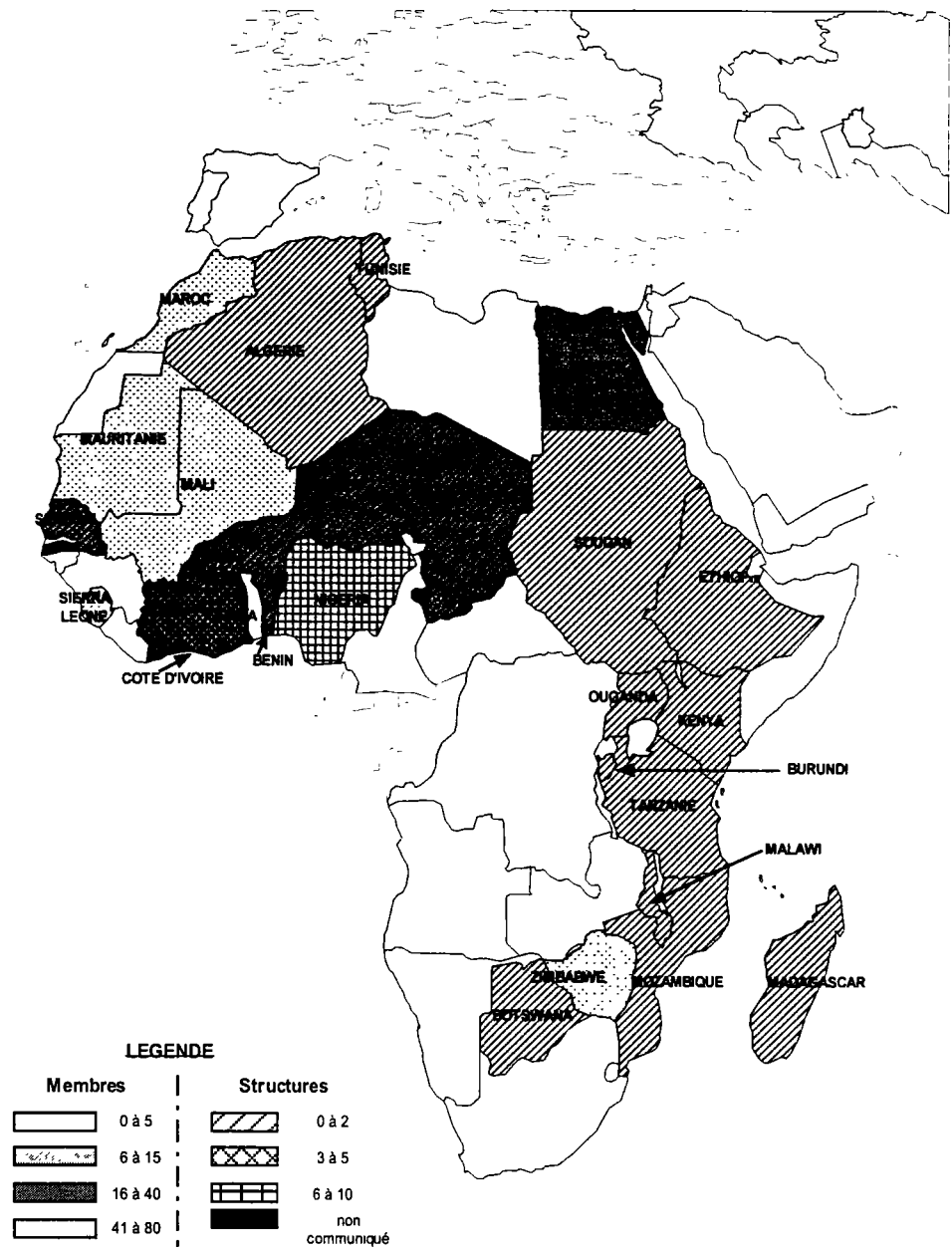


Figure 2. Réseau de Télédétection de l'African Association of Remote Sensing and Environment (AARSE) : structures ou organismes et membres ou personnes ressources.

9. Références

AGENCE SPATIALE EUROPÉENNE. 1997. Actes du 3rd ERS Symposium on space at the service of our environment, Florence, Italy, 17-21 mars 1997.

ANONYME. 1998. Actes du colloque africain de recherche en informatique (CARI) en 1998, Dakar, Sénégal.

ANONYME. 1999a. Comité du Réseau Télédétection, documents de travail, répertoire des membres

ANONYME. 1999b. African Association of Remote Sensing of the Environment (AARSE), répertoire des membres.

DUBOIS, J.-M. et LAFRANCE, P. (réd.). 1989. Télédétection en francophonie : bilan régionaux et thématiques. Collection Universités francophones – Actualité scientifique, Édition AUPELF et John Libbey Eurotext, Paris, 123 p.

DUBOIS, J.-M. et BLASCO, F. (réd.). 1993. Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Collection Universités francophones - Actualité scientifique, Édition AUPELF et PUQ, Sainte-Foy, 444 p.

DUBOIS, J.-M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (réd.). 1993. Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Collection Universités francophones – Actualité scientifique, Édition AUPELF et PUQ, Sainte-Foy, 366 p.

DUBOIS, J.-M., BOUSSEMA, M.R., BOIVIN, F. et LAFRANCE, P. (réd.). 1995. Télédétection des ressources en eau. Collection Universités francophones – Actualité scientifique, Édition AUPELF et PUQ, Sainte-Foy, 304 p.

DUBOIS, J.-M., DONNAY, J-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.). 1997. Télédétection des milieux urbains et périurbains. Collection Universités francophones – Actualité scientifique, Édition AUPELF, Montréal, 361 p.

DUBOIS, J.-M., FORTIN, J-P., BERNIER, M. et BOIVIN, F. 1998. La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Collection Universités francophones – Actualité scientifique, Édition AUPELF, Montréal, 356 p.

LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. (réd.) 1990. Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Collection Universités francophones – Actualité scientifique, Édition AUPELF et John Libbey Eurotext, Paris, 317 p.

La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives. Éd. AUF. 2000. p. 457-463

46

Situation actuelle et perspectives de développement des laboratoires de télédétection de l'Europe Centrale et de l'Europe de l'Est

FLOREA ZAVOIANU[1], VASILE GRAMA[2] et VASSO BARBAROUSSI[3]

[1] *Université technique de constructions de Bucarest, 124, boul. Lacul Tei, Sector 2, Bucuresti, Roumanie; téléphone : + 40-1-242 12 08; télécopieur : +40-1-242 07 81; courriel : fzavoian@pcnet.pcnet.ro*

[2] *Université technique de Moldavie, 41, boul. Dacia, Chisinau, République de Moldavie; téléphone : + 022-77 39 92*

[3] *École polytechnique d'Athènes, 27, rue Sirion, 16231 Athènes, Grèce; téléphone : +30-1-76 52 299; télécopieur :+ 30-1-76 54 619*

Résumé

Dans ce bilan du développement des laboratoires francophones au cours de la dernière décennie de leur évolution, sont présentés des aspects concernant : l'accroissement des capacités des laboratoires locaux en matière de traitement et d'analyse d'images de télédétection et des techniques de SIG; la formation professionnelle des étudiants par le perfectionnement des programmes d'enseignement et des cours universitaires; les besoins réels et les problèmes des étudiants concernant l'assimilation des techniques de télédétection; la formation continue des ingénieurs et des techniciens travaillant dans ce domaine par des stages de courte durée; les thèmes prioritaires abordés par la télédétection au niveau national; les directions et intérêts de l'État concernant le développement technologique et les programmes de recherche en matière de télédétection. Dans sa stratégie pour l'Europe Centrale et l'Europe de l'Est, le Réseau Télédétection de l'AUF doit poursuivre les objectifs suivants : promouvoir et encourager le transfert de technologies entre ses laboratoires;

créer un centre régional de formation professionnelle; renforcer la coopération entre ses laboratoires par suite des difficultés budgétaires auxquelles doivent faire face les pays de cette zone. La coopération Ouest-Est dans le cadre de ce Réseau peut répondre aux intérêts de tous ces laboratoires et satisfaire à leurs exigences.

1. Introduction

Jusqu'en 1989, dans les pays de l'Europe de l'Est, l'enseignement a été entièrement la responsabilité de l'État; il servait une économie centralisée et était subordonné à des objectifs et à des principes politiques. L'activité de recherche en télédétection a été organisée, pour les instituts de recherche académiques et pour l'enseignement supérieur, dans le cadre du programme régional INTERCOSMOS. Tous les matériels cartographiques et de télédétection (cartes, photographies aériennes, etc.) étaient classés secrets et n'avaient qu'une circulation restreinte et bien contrôlée. Dans ces conditions, la thématique des ouvrages de recherche était établie par les instituts académiques et par les universités, et elle ne visait que la recherche fondamentale. Les événements politiques de 1989 qui ont eu lieu dans les pays de l'Europe de l'Est ont entraîné une transformation progressive de l'économie centralisée vers l'économie de marché. Cela a eu un impact particulier sur tous les secteurs de l'économie : industrie, agriculture, pisciculture, etc. Ces dix dernières années, l'enseignement privé est apparu et s'est développé notamment au niveau universitaire. L'enseignement d'État subit sans cesse une transformation profonde, tendant vers des normes européennes et internationales. L'activité de recherche des instituts académiques et des universités s'est orientée vers la pratique. Entre la recherche universitaire et académique, d'une part, et le processus didactique, d'autre part, il y a des rapports étroits établis dans le cadre des programmes opérationnels de recherche et des projets-pilotes conçus par les agences gouvernementales. La recherche et l'enseignement doivent surmonter certaines difficultés liées aux ressources financières limitées. Les budgets insuffisants alloués à l'enseignement entraînent des difficultés concernant l'équipement des laboratoires spécialisés, l'accroissement du nombre d'étudiants, l'attirance des nouveaux spécialistes vers l'enseignement et la recherche technologique ainsi que l'acquisition d'images satellitaires. Le transfert technologique entre les institutions gouvernementales et l'industrie est limité à cause du caractère non compétitif de cette dernière. Mais, le processus d'enseignement ne vise pas seulement les jeunes. En ce qui concerne les laboratoires francophones des pays de l'Est, aucun centre destiné à la formation continue des ingénieurs et techniciens n'a été créé. La formation par des études approfondies et par le doctorat n'y a pas été largement utilisée. Toutes les universités d'Europe de l'Est sont ouvertes au progrès technique et encouragent la recherche scientifique, la qualité du processus d'enseignement et le transfert technologique. La coopération ainsi que les échanges Est-Ouest peuvent répondre aux intérêts de tous les laboratoires francophones du réseau, tout en étant profitables à toutes les parties.

2. Méthodologie

Pour élaborer ce rapport, on a utilisé comme source d'information les visites effectuées à l'Université technique de Moldavie (UTM) de Chisinau de même que les documents écrits publiés ainsi que les discussions directes avec les représentants des diverses institutions

concernées de Roumanie. On a également consulté les distributeurs de données de télédétection et de SIG (Geosystem, Cruta, Intergraf, etc.), les utilisateurs de ces produits et les responsables de thèmes de recherche des instituts académiques et des universités. Ces données ont été analysées en fonction des facteurs suivants : potentiel technique et humain et difficultés locales; nécessité et désir de coopérer entre l'Est et l'Ouest ainsi que perspectives des applications thématiques de télédétection.

2.1. Analyse des données

L'analyse est effectuée pour chacun des pays, soit de la République de Moldavie et la République de Roumanie.

Jusqu'en 1989, la République de Moldavie a fait partie de l'URSS. Dans ces républiques, la photogrammétrie, la géodésie, la cartographie et la télédétection étaient considérées comme des disciplines stratégiques et les matériels de ces spécialités étaient classés secrets. Les spécialistes en ces domaines étaient formés à Moscou. Les cours dans les universités de la Moldavie, pour d'autres spécialités, étaient donnés en russe, par des spécialistes venus de Moscou.

Après 1989, ces spécialistes ont quitté la Moldavie. Pendant la période de transition, la langue roumaine et la graphie latine furent adoptées. Aujourd'hui, les langues officielles sont le roumain et le russe. En ce qui concerne l'enseignement supérieur, on a développé les structures héritées tout en créant des filières nouvelles. Des facultés et des spécialités nouvelles sont apparues. La réforme agraire a rendu nécessaire la formation de spécialistes en géodésie, en cartographie et en cadastre. C'est pourquoi, à Chisinau, on a créé un Institut national de recherche coordonnant l'activité dans ce domaine. La thématique de recherche de cet institut est présentée sur le tableau 1 et son équipement technique sur le tableau 2

À l'Université technique de Moldavie de Chisinau, sur la base des programmes d'enseignement de la faculté de géodésie de l'Université technique de constructions de Bucarest, on a créé la filière de géodésie et du cadastre. Sa première promotion comprend 22 étudiants qui finiront leurs études en l'an 2000; ils ont étudié en roumain mais 30 % de ceux-ci maîtrisent également le français. Les cours de spécialité, soit la photogrammétrie, la télédétection, le cadastre etc. ont été donnés par des professeurs de Roumanie. On n'a pas disposé d'équipement technique hérité.

Tableau 1. Domaines prioritaires d'application de la télédétection

Application	Roumanie	Rép. de Moldavie
Occupation du sol	oui	oui
Agriculture (statistique agricole y compris)	oui	oui
Géologie	oui	-
Géologie-géotechnique	oui	-
Domaine forestier	oui	oui
Protection de l'environnement	oui	oui
Éducation, formation des cadres	oui	oui
Cadastre général et de spécialité	oui	oui

Tableau 2. Produits et systèmes de télédétection utilisés

Produits/ Système	Roumanie	République de Moldavie	Total
	Images numériques		
MSS/TM de Landsat	17	-	17
HRV de SPOT	25	-	25
KFA-1 000	2	-	2
Saliut	2	-	2
Cartes aux échelles : 1 : 200 000; 1 : 100 000; 1 : 50 000 ; 1 : 25 000 ; 1 : 10 000	Tout le pays	Tout le pays	-
Plans topographiques : 1 : 5 000	Tout le pays (sauf les zones de montagne)		
Plans topographiques ; 1 : 1 000 et 1 : 500	Toutes les zones urbaines		
Cartes thématiques	Tous les domaines		
	Systèmes de prélèvement		
Avions photogrammétriques	3	-	3
Chambres de prise de vues : WILD RC-20, LMK, MRK,	6	-	6
MSK-4 chambre multispectrale	1	-	1
Radiomètres, spectroradiomètres (EXOTEC et autres)	5	-	5
Systèmes de réception images météorologiques (AVHRR de NOAA)	2	-	2
	Systèmes de traitement d'image		
Stations SUN	6	-	6
Systèmes photogrammétriques : Phodis, Intergraf , etc.	4	2	2
Systèmes de traitement d'images : ER Mapper 5.0, EASE/PACE ; ERDAS, Multiscope	6	1	7
Appareils stéréo-photogrammétriques analogiques	plusieurs	4	plusieurs

Aujourd'hui, la section possède un centre de calcul avec 10 PC Pentium 2 qui, lors de la rentrée universitaire, sont équipés de logiciels de télédétection et de SIG. Des échanges d'étudiants ont été réalisés avec la Roumanie; les quatre dernières années, tous les étudiants de la section ont effectué des stages pratiques de trois semaines à Bucarest, les bourses étant offertes par l'État roumain. Dans la République de Moldavie, la télédétection est également enseignée à l'Université agraire de Chisinau; en province, elle est enseignée dans les instituts universitaires de Cahul et de Balti. La politique d'État prévoit également

l'introduction d'un système de projection cartographique et l'élaboration des cartes de base pour le territoire du pays, c'est-à-dire des cartes numériques à l'échelle du 1 : 200 000 et du 1 : 50 000, la réglementation par des normes de l'activité en photogrammétrie, en télédétection, en cadastre, etc., l'utilisation des techniques de télédétection et de SIG en cartographie, l'introduction d'un système de cadastre moderne pour toute la superficie du pays, le développement de l'enseignement en roumain et la formation de spécialistes et, enfin, l'aide et l'encouragement de la coopération internationale dans le domaine de la recherche et de l'enseignement.

En Roumanie, avant 1989, la télédétection était enseignée dans trois universités, la faculté de géodésie de Bucarest et aux facultés de géographie de Bucarest et Iassy. Les thèmes de recherche dans ce domaine étaient abordés dans quatre instituts académiques et deux universités. Il n'y avait pas de distributeurs d'images satellitaires. Après 1989, quatre distributeurs se sont installés à Bucarest. Certains desservent aussi la République de Moldavie. La télédétection est enseignée dans six facultés d'ingénieurs de Bucarest et, en province, dans les universités de Iassy, Timisoara, Oradea, Petrosani, Brasov, Craiova et Suceava. Sur le nombre total d'étudiants (environ 200), 35 % à 40 % parlent le français. La thématique de la recherche a été diversifiée (tableau 1). L'équipement technique des instituts est décrit sur le tableau 2.

3. La fonction formative pendant la période de transition

Les tâches de la période de transition dépendent de la situation héritée qui se caractérisait par un conservatisme accentué à tous les niveaux : méthodologie, disciplines et programmes de cours.

Dans les conditions actuelles, tous ces éléments doivent s'adapter aux exigences de l'économie de marché. Ce processus s'avère lent et difficile. La différence entre les universités et les instituts académiques d'Europe de l'Est réside dans le fait que les universités ont une double fonction. Dans les universités, l'enseignement est la principale fonction tandis que la recherche représente la fonction secondaire. Par contre, les instituts académiques ne font que de la recherche en raison de la situation héritée de l'ancien régime. Compte tenu des exigences de l'économie de marché, la méthodologie utilisée dans le processus didactique connaît une transformation continue. Les programmes universitaires ainsi que les cours post-universitaires pour les SIG et la télédétection ont dû être modernisés.

Après les événements de 1989, toute une série d'universités privées est apparue dans tous les domaines socio-économiques. Il faut mentionner que, dans le domaine de la technique, le nombre d'universités privées est de beaucoup inférieur. Les besoins réels et les problèmes des étudiants concernant l'assimilation des techniques de télédétection sont liés aux aspects suivants : insuffisance des images satellitaires et du nombre d'heures d'étude, absence de documentation adéquate et absence d'échanges internationaux d'étudiants. L'accroissement de la capacité des laboratoires locaux en matière de traitement et d'analyse des images de télédétection et des techniques de SIG s'est réalisé par l'acquisition d'équipements performants munis de logiciels appropriés. On a assisté à une diversification des utilisateurs en mettant l'accent sur les programmes de gestion, de surveillance et de planification des ressources naturelles ainsi que sur la protection de l'environnement. Les images satellitaires sont de plus en plus utilisées par les chercheurs et acceptées par les autres utilisateurs comme documents de travail. L'actualisation des cartes topographiques aux échelles inférieures au 1 : 50 000 se fait sur la base des

enregistrements HRV de SPOT. Des études spécialisées effectuées dans divers domaines utilisent souvent les enregistrements de télédétection : agriculture, foresterie, géologie, occupation du sol (le projet européen CORINE, 1994). Les thèmes gouvernementaux prioritaires pouvant être abordés par télédétection sont les suivants : prévision des récoltes, statistiques et cadastre agricoles, études d'inventaires, de surveillance, de gestion et de conservation du milieu, études d'occupation, d'utilisation et de conservation du sol, études d'urbanisme, du cadastre urbain, modernisation des systèmes de surveillance des eaux du bassin inférieur du Danube et de la mer Noire, reconstruction biologique de la réserve de la biosphère du delta du Danube, atténuation des processus d'acidification et de désertification de la plaine du Danube, création du zonage et des cartes de risque de tremblement de terre, de glissement de terrain, d'inondation, d'érosion et de désertification du sol. Les aspects ci-dessus mentionnés sont interdépendants et sont en étroite corrélation avec la réforme agraire initiée dans les pays de l'Europe de l'Est.

4. Directions du processus de formation des cadres

Les directions prioritaires pour le Ministère de l'enseignement de Roumanie en vue d'améliorer l'enseignement de spécialités sont les suivantes : assurer une compétition entre les meilleurs étudiants, améliorer l'organisation des études universitaires, investir pour équiper les laboratoires d'appareils spécialisés et d'ordinateurs, parachever le système de crédits transférables initié pendant l'année universitaire 1997-1998, renforcer le rôle des stages pratiques organisés en fin de chaque année universitaire et le rôle des projets de fin d'études; soutenir l'intensification des relations internationales par des échanges d'enseignants et d'étudiants dans le cadre de projets européens comme TEMPUS, SOCRATES, etc. Dans le cadre de l'examen de licence, on a introduit un test de langue étrangère (l'anglais, l'allemand, le russe et le français) où 35 % des étudiants choisissent le français.

5. Rôle du Réseau Télédétection en Europe Centrale et de l'Est

Le Réseau Télédétection de l'AUF a milité, dès sa création, pour le développement de la télédétection en Europe de l'Est.

La bibliothèque minimale offerte aux laboratoires partiellement ou entièrement francophones s'avère d'une très grande utilité. La participation aux symposiums de spécialités et aux actions de recherche partagée (il y en a eu deux) et les stages de courte durée effectués par les chercheurs de l'Est dans les laboratoires de l'Ouest ne sont que quelques-unes des activités soutenues avec succès par l'association. Dans le futur proche, le Réseau pourrait participer à l'organisation d'un centre régional à Bucarest destiné à la formation, avec des programmes spécialisés, des chercheurs et des utilisateurs d'images satellitaires en contribuant ainsi à la formation d'experts. L'attention devrait être également orientée vers les utilisateurs et vers le développement d'un marché de SIG et de télédétection dans cette partie de l'Europe. Avec l'ouverture des frontières, les contacts internationaux sont possibles et les moyens électroniques de communication permettent une liaison Est-Ouest plus étroite. Par une assistance technique, économique et financière, les universités de l'Est peuvent renforcer leur compétence et compétitivité.

7. Références

VOUTE, C. 1994. Needs for co-operation between Eastern and Western Europe. International Journal of Remote Sensing, vol.15, n° 15, p. 2973-2994.

KRAUS, K. 1996. Archives internationales de photogrammétrie et de télédétection. Vol. XXXI, Tome B6, Commission VI, Publié par le Comité du XVIII[e] Congrès ISPRS, Vienne, Autriche.

Imprimé par
MULTICOPIE ESTRIE - SHERBROOKE

La collection *Universités francophones,* créée en 1988 à l'initiative de l'UREF, propose des ouvrages de référence, des manuels spécialisés et des actes de colloques scientifiques aux étudiants des 2e et 3e cycles universitaires ainsi qu'aux chercheurs francophones et se compose de titres originaux paraissant régulièrement.

Les auteurs appartiennent conjointement aux pays du Sud et du Nord et rendent compte des résultats des recherches et des études récentes entreprises en français à travers le monde. Ils permettent à cette collection pluridisciplinaire de couvrir progressivement l'ensemble des enseignements universitaires en français.

Enfin, la vente des ouvrages à un prix préférentiel destinés aux pays du Sud tient compte des exigences économiques nationales et assure une diffusion adaptée aux pays francophones.

Ainsi la collection *Universités francophones* constitue une bibliothèque de référence comprenant des ouvrages universitaires répondant aux besoins des étudiants de langue française.

Le Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie a déjà plus de 10 ans d'existence. Les thématiques de recherche qui y ont été privilégiées sont la télédétection des milieux urbains et périurbains, la télédétection et la désertification, la télédétection des ressources en eau ainsi que les paramètres de surface et les signatures spectrales. Les *Huitièmes journées scientifiques du « Réseau Télédétection »* de l'AUF ont permis de faire le point sur tous ces thèmes avec des spécialistes tant des pays développés que des pays en développement. De plus, ces journées scientifiques ont permis de tracer des bilans du développement de la télédétection francophone en Amérique du Nord, en Afrique subsaharienne ainsi qu'en Europe Centrale et en Europe de l'Est. En tout, les actes comprennent 46 articles de chercheurs de disciplines très diverses des sciences fondamentales et appliquées.

Prix : 50 $ CAN • Prix préférenciel UREF : 25 $ CAN

9 782920 021921 ISBN 2-920021-92-3