UNIVERSITÉS FRANCOPHONES

Sous la direction de

Jean-Marie M. Dubois

Jean-Paul Donnay

André Ozer

François Boivin

André Lavoie

TÉLÉDÉTECTION DES MILIEUX URBAINS ET PÉRIURBAINS

Actes des Journées scientifiques
de Liège
1995

actualité scientifique

AUPELF·UREF

AUPELF

TÉLÉDÉTECTION
DES MILIEUX URBAINS ET PÉRIURBAINS

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

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, Québec, 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, Québec, 422 p.

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, Québec, 304 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

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

Europe et autres pays :

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

Diffusion des actes des Journées scientifiques de Liège (1995) :

Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF
CARTEL, Université de Sherbrooke
Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1
Téléphone : +1 (819) 821-7925
Télécopieur : +1 (819) 821-7944

TÉLÉDÉTECTION DES MILIEUX URBAINS ET PÉRIURBAINS

Sixièmes journées scientifiques
du « Réseau Télédétection » de l'AUPELF-UREF,
Liège, 2-5 octobre 1995

COMITÉ SCIENTIFIQUE ET DE LECTURE :
- Jean-Marie Dubois (coresponsable de l'édition)
- Jean-Paul Donnay (coresponsable de l'édition)
- André Ozer (coresponsable de l'édition)
- François Boivin (coresponsable de l'édition)
- André Lavoie (coresponsable de l'édition)
- Abdelkader Abdellaoui
- Yves Baudot
- Régis Caloz
- Claude Collet
- Denis Morin
- Istvan Nadasdi
- Jean-Paul Rasson
- Diadié Traoré
- Fernand Verger
- Christiane Weber

1997

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

Données de catalogage avant publication (Canada)

UREF. Réseau de télédétection. Journées scientifiques (6es : 1995 : Liège, Belgique)

Télédétection des milieux urbains et périurbains : sixièmes Journées scientifiques du Réseau télédétection de l'AUPELF-UREF, Liège, 2-5 octobre 1995

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

ISBN 2-920021-74-5

1. Urbanisme – Télédétection – Congrès. 2. Sol, Utilisation urbaine du – Télédétection – Congrès. 3. Villes – Cartes – Congrès. 4. Satellites artificiels en télédétection – Congrès. 5. Images-satellite – Congrès. 6. Télédétection – Congrès. I. Dubois, J. M. M. (Jean Marie Maurice), 1944- . II. Titre. III. Collection.

HT166.U74 1995 307.1'216'028 C97-941370-2

ISBN 2-920021-74-5
Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés © 1997
AUPELF-UREF

Dépôt légal – 4e trimestre 1997
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
Imprimé au Canada

Sommaire

Liste des participants et auteurs XIII

Introduction Jean-Marie Dubois XXIII

Partie I. **Techniques spéciales de télédétection urbaine** 1

1. **L'influence de la résolution effective des données télédétectées sur les possibilités d'analyse des milieux urbains complexes.**
   Yves Baudot 3
2. **Études multi-échelles : application aux agglomérations du nord-ouest de l'Europe.**
   Marc Binard, Istvan Nadasdi, Michel Lambinon, Denis Marchal et Jean-Paul Donnay 15
3. **Étude des structures urbaines de l'agglomération de Mexico à l'aide d'une image HRV de SPOT.**
   Jean-Michel Eberhard 25
4. **Cartographie des modes d'utilisation du sol à Conakry (Guinée) par intégration de données multisources.**
   Emmanuelle Renard, Yves Baudoin et Prita Pourouchottamin 35
5. **Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide des indices de végétation dérivés à partir des données de hautes résolutions spatiale et spectrale.**
   Abderrazak Bannari, Denis Morin et Dong-Chen He 47
6. **Cartographie écologique par télédétection d'agglomérations urbaines : cas de Namur et de Charleroi (Belgique).**
   Isabelle Reginster 65
7. **Caractérisation de la réponse du bâti : application au complexe urbain de Blida (Algérie).**
   Abdelkader Abdellaoui et Abderrazak Rougab 75

8. **Processus d'intégration de données TM de Landsat et SAR de ERS-1 appliqué à un site urbain et périurbain algérien.**
Youcef Smara, Juerg Lichtenegger, Aichouche Belhadj-Aissa et Mohamed Mahrour 85

9. **Segmentation d'images satellitaires par analyse spectrale et mesures texturales appliquées à des sites urbains algériens.**
Aichouche Belhadj-Aissa, Mostefa Belhadj-Aissa et Youcef Smara 93

10. **Transformée de Hough et morphologie mathématique : amélioration et performances.**
Farid Alilat et Saliha Loumi 103

11. **Application d'un processus itératif de classification dirigée à un site urbain et périurbain algérien.**
Nadia Ouarab et Youcef Smara 113

Partie II. **Télédétection et urbanisme** 121

12. **Différenciation des tissus résidentiels à l'aide de l'indice PVI, de la morphologie mathématique et du filtrage contextuel : exemple de Genève (Suisse).**
Pierre Terrettaz et Claude Collet 123

13. **Reconnaissance des formes : transfert méthodologique Nord-Sud.**
Christiane Weber, Jean-Paul Donnay et Claude Collet 133

14. **Essai de différenciation des quartiers de Yaoundé (Cameroun) à l'aide d'une image HRV de SPOT.**
René-Joly Assako Assako 145

15. **Apport de la télédétection et des SIG à la gestion urbaine : cas de Ouagadougou (Burkina Faso).**
Nourou Moucharaf Padonou, Mamadou Siné Camara et Mamadou Sékou Kéita 155

16. **Processus d'urbanisation et imagerie satellitaire : deux exemples indiens.**
Odette Vaguet, Alain Vaguet et Alban Bourcier 163

17. **Étude de l'occupation du sol et de l'environnement à Cartagena (Colombie) à partir d'une image HRV (XS) de SPOT.**
Juan Francisco Abadia, Anne Collin Delavaud et Jean-Michel Eberhard 173

18. **Utilisation des données de télédétection satellitaire multisources et multibandes ainsi que des photographies aériennes pour l'étude des milieux urbain et périurbain à Bucarest (Roumanie).**
Florea Zavoianu, Calin Nitu et Catalin Nedelcu 181

19. **Étude par télédétection des écosystèmes urbains des grandes agglomérations françaises à l'échelle du 1: 25 000.**
Michel Lenco 191

20. **Apport de l'imagerie multibande HRV de SPOT à l'étude de l'utilisation du sol de l'environnement urbain : cas de la ville de Blida (Algérie).**
Ali Boucherit, Malik Hemis, Mohamed Daoudi et Abdelkader Abdellaoui 207

Partie III. **Statistiques urbaines** 213

21. **La production rapide d'informations démographiques et économiques par sondage aréolaire sur une image satellitaire : application à trois villes de pays en développement (Quito, Bogota et Yaoundé).**
Françoise Dureau 215

22. **Pour une autre approche de la délimitation urbaine : application à Strasbourg (France).**
Christiane Weber, Jacky Hirsch et Aziz Serradj 225

23. **Détermination des limites d'agglomération par télédétection : discussion méthodologique et application au cas de Huy (Belgique).**
Jean-Paul Donnay et Michel Lambinon 239

Partie IV. **Cartographie urbaine** 247

24. **Apport d'une simple composition colorée à l'étude de l'espace urbain : cas de Mexicali (Mexique).**
Anne Collin Delavaud et Djamal Toudert 249

25. **Identification des acteurs de la production de l'espace en milieu urbain africain à partir de l'imagerie satellitaire : exemples de Bamako (Mali) et de Maroua (Cameroun).**
Michel Simeu Kamdem 259

26. **Technique d'élaboration d'une spatiocarte de la région de Rosso (Mauritanie).**
Cheikh Sow 267

27. **Utilisation des images HRV de SPOT pour la détection du changement périurbain à Casablanca (Maroc).**
Malika Azerzaq, Mariem Assafi et Ahmed Fahsi 275

28. **Fusion d'images HRV (P et XS) de SPOT à l'aide de la méthode ARSIS : apports à la cartographie urbaine.**
Thierry Ranchin et Lucien Wald 283

29. **Restitution de photographies satellitaires pour la création d'une banque de données topographiques.**
Fabrice Muller et Pascal Brackman 291

30. **Application de la télédétection à l'étude des changements urbains et des transformations du littoral à Cotonou (Bénin).**
Claude Lucien Codjia 299

31. **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).**
Francisco Guerra, Wuilian Torres, Jesùs Pérez et Ana Maria Martinez 307

32. **Apport de la télédétection à la cartographie de l'espace urbain au 1: 20 000 en terme d'emprise au sol du bâti : cas de la ville d'Oran (Algérie).**
Youcef Messar et Nadia Messar 315

Partie V. **Actions de recherche partagée** 325

33. **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.**
Amadou Thierno Gaye et Siméon Fongang 327

34. **Étude de l'évolution du milieu naturel du delta du Danube.**
Julian C. Barbalata, Ion Ionescu et Ioan Noaje 337

35. **Suivi spectral des rizières dans le delta du fleuve Rouge (Viêt-nam) à l'aide de mesures spectroradiométriques et d'indices de végétation : appui à la compréhension des images satellitaires.**
Nguyen Xuan Dao, Abderrazak Bannari, Pham Van Cu, Ferdinand Bonn, Judith Coulombe-Simoneau, Pierre Lafrance et Patrick Cliche 347

Conclusions Jean-Paul Donnay 357

Avant-propos

La diffusion de l'information scientifique et technique est un facteur essentiel du développement. Aussi dès 1988, l'Agence francophone pour l'enseignement supérieur et la recherche (AUPELF-UREF) 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, Universités francophones vise à instaurer une collaboration entre enseignants et chercheurs francophones en publiant les ouvrages, coédités avec les éditeurs francophones, et largement diffusés dans les pays du Sud grâce à une politique tarifaire préférentielle.

Quatre séries composent la collection :

- Les manuels : cette série didactique est le cœur de la collection. Elle s'adresse à un public de deuxième et troisième cycles universitaires et vise à constituer une bibliothèque de référence couvrant les principales disciplines enseignées à l'université.
- Actualité scientifique : dans cette série sont publiés les actes de colloques organisés par les réseaux thématiques de recherche de l'UREF.
- Prospectives francophones : s'inscrivent dans cette série des ouvrages de réflexion donnant l'éclairage de la Francophonie sur les grandes questions contemporaines.
- Savoir plus Université : cette nouvelle série se compose d'ouvrages de synthèse qui font un point précis sur des sujets scientifiques d'actualité.

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

Professeur Michel GUILLOU
Directeur général de l'AUPELF
Recteur de l'UREF

Liste des participants et auteurs

Abadia, Juan Francisco, 16, rue des Sablons, 75116 Paris, France

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

Alilat, Farid, 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

Andriamanantena, Hortense, Géologie des terrains superficiels, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Aouni, Lamine, Centre national de télédétection, B.P. 200, 1080 Tunis cedex, Tunisie

Assafi, Mariem, Service de topographie de Safi, Safi, Maroc

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

Azerzaq, Malika, Agence foncière, Avenue My Youssef, Rabat, Maroc

Bannari, Abderrazak, SPAR Aérospatiale Limitée, 21025, route Transcanadienne, Sainte-Anne-de-Bellevue (Québec), Canada H9X 3R2

Barbalata, Julian C., Laboratoire de photogrammétrie et de télédétection, École des sciences forestières, Centre universitaire Saint-Louis-Maillet, Université de Moncton, Edmundston, Nouveau-Brunswick, Canada E3V 2S8

Baudot, Yves, Laboratoire de télédétection et d'analyse régionale, Université catholique de Louvain, Place Louis Pasteur, 3 - Bâtiment Mercator, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

Baudouin, Yves, Département de géographie, Université du Québec à Montréal, B.P. 8888, succ. Centre-ville, Montréal (Québec), Canada H3C 3P8

Bayers, Éric, Institut géographique national de Belgique, CA/Télédétection, Abbaye de la Cambre, 13, 1050 Bruxelles, Belgique

Belghali, Saïd, Avenue de la Palette, 15/001, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

Belhadj-Aissa, Aichouche, 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

Belhadj-Aissa, Mostefa, 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

Belmili, Kamel, Géologie des terrains superficiels, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Bénié, Goze Bertin, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1

Bertholet, Vincent, Département de mathématique, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rue de Bruxelles, 61, 5000 Namur, Belgique

Bildgen, Pierre, Laboratoire de géochimie et métallogénie, (URA CNRS 1762), Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Case 124, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

Binard, Marc, Laboratoire SURFACES, Université de Liège, Place du XX Août, 7, bâtiment A1, 4000 Liège, Belgique

Boivin, François, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1

Bolduc, Andrée M., Centre géoscientifique de Québec, Commission géologique du Canada, Complexe scientifique, 2535, boulevard Laurier, C.P. 7500, Sainte-Foy (Québec), Canada G1V 4C7

Bonino, Enrico, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Bonn, Ferdinand, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1

Bontemps, Luc, rue du Monty, 6, B-5377 Nettinne, Belgique

Boucherit, Ali, Département de géographie et d'aménagement du territoire, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie

Boumeaza, Taieb, Département de géographie, Faculté des lettres et sciences humaines, Université Hassan II, Avenue Hassan II, B.P. 546, Mohammedia 20650, Maroc

Bourcier, Alban, Laboratoire de modélisation et traitements graphiques, U.R.A. 1351 du CNRS, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Rouen (Haute-Normandie), 76821 Mont-Saint-Aignan cedex, France

Boussema, Mohamed Rached, Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie

Brackman, Pascal, TELE ATLAS, 92, Moutstraat, 9000 Gent, Belgique

Caloz, Régis, DGR-SIRS, École polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse

Camara, Mamadou Siné, Centre régional de télédétection de Ouagadougou, 01 B.P. 1762, Ouagadougou 01, Burkina Faso

Cardoso, Fausto, EUROSTAT/Direction E, Office statistique des communautés européennes, Bâtiment Jean-Monnet, rue Alcide De Gasperi, L-2920 Luxembourg, Luxembourg

Carlier, Anne, Direction de la topographie et de la cartographie, Ministère wallon de l'Équipement et des Transports, WTC 3, 2e étage, Boulevard Simon Bolivar, 30, B-1210 Bruxelles, Belgique

Carrara, Emmanuel, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Champaud, Jacques, 2, boul. Guynemer, 13 320 Bouc Bel Air, France

Cherkaoui-Omari, Mohamed, Département de topographie, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc

Cliche, Patrick, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1

Codjia, Claude Lucien, Laboratoire de biogéographie, Département de géographie et d'aménagement du territoire, Université nationale du Bénin, 03 B.P. 2984, Cotonou, Bénin

Collet, Claude, Institut de géographie, Université de Fribourg, Pérolles, CH-1700 Fribourg, Suisse

Collin Delavaud, Anne, Centre de recherche et de documentation sur l'Amérique latine, Institut des hautes études de l'Amérique latine, Université de la Sorbonne Nouvelle (Paris III), 28, rue Saint-Guillaume, 75007 Paris, France

Cornélis, Bernard, rue des Pocheteux, 80, B-4020 Jupiler-sur-Meuse, Belgique

Cornet, Yves, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, 4000 Liège, Belgique

Coulombe-Simoneau, Judith, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1

Daoudi, Mohamed, Laboratoire de télédétection et SIG, Département de géographie et aménagement du territoire, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie

Dau, Hien, Institut de géologie, Centre national des sciences naturelles et de technologie, Nghia Do-Tu liem, Hanoi, Viêt-nam

de Béthune, Stanislas, Laboratoire SURFACES, Faculté des sciences, Université de Liège, Place du XX Août, 7, bâtiment A1, 4000 Liège, Belgique

Defawes, Georges, Institut supérieur d'architecture, Rue Lambinon, 37, 4000 Liège, Belgique

Degée, Pierre, Centre de coopération au développement, Université de Liège, Place du 20 Août, 32, B-4000 Liège, Belgique

Delfosse, Vincent, CICADE, avenue de la Pairelle, 11, 5000 Namur, Belgique

Delgado Alvarez, José Luis, Armando Montenegro, B22, Cochambamba, Bolivie

Dewez, Arnaud, Laboratoire d'hydrologie et télédétection, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, 2, rue des Déportés, 5030 Gembloux, Belgique

Donnay, Jean-Paul, Laboratoire SURFACES, Séminaire de géographie, Université de Liège, Place du 20 Août, 7, 4000 Liège, Belgique

Doulliez, Jean-Yves, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, 4000 Liège, Belgique

Drachal, Jacek, Instytut geodezji i kartografii, ul. Jasna 2/4, 00-950 Warszawa, Pologne

Dubois, Jean-Marie, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1

Dubois, Olivier, Département de géographie, Université libre de Bruxelles, Avenue du Cor de Chasse, 26, 1170 Bruxelles, Belgique

Dureau, Françoise, UMR REGARDS CNRS-ORSTOM, Maison des Suds, B.P. 200, 33405 Talence Cedex, France

Dusart, Jean, Centre de suivi écologique (PNUD), B.P. 154, Dakar, Sénégal

Eberhard, Jean-Michel, 12, rue de la Belle-Feuille, 92100 Boulogne, France

Engels, Thierry, Société wallonne de photogrammétrie (Walphot), rue Van Opré, 97, 5100 Namur, Belgique

Eskenazi, Edmond, Hydrologie et hydrographie, Institut du génie civil, Université de Liège, quai Banning, 6, B-4000 Liège, Belgique

Fahsi, Ahmed, Alabama A&M University, Department of Plant and Soil Science, P.O. Box 1208, Normal, Alabama 35762, États-Unis

Fongang, Siméon, École nationale supérieure universitaire de technologie, Université Cheikh Anta Diop, B.P. 5085, Dakar, Sénégal

Gaye, Amadou Thierno, Laboratoire de physique de l'atmosphère, École nationale supérieure universitaire de technologie, Université Cheikh Anta Diop, B.P. 5085, Dakar-Fann, Dakar, Sénégal

Géron, Jean-Marc, Rue Isi-Collin, 35, 4000 Liège, Belgique

Griguolo, Silvio, Dipartimento di Analisi Economica e Sociale del Territorio, Instituto Universitario di Architectura di Venezia, S.Croce 1957, 30135 Venezia, Italie

Guenet, Michel, Institut d'urbanisme, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, C.P. 6128, succ. Centre-ville, Montréal (Québec), Canada H3C 3J7

Guerra, Francisco, Centro de procesamiento digital de imágenes, Institut de Ingeniería, Carretera nacional, Apartado 40.200, Caracas 1040-A, Venezuela

Hallam, G. M., Natural Resources Management Department, Natural Resources Institute, Central Avenue, Chatham Maritime, Kent ME4 4TB, Royaume-Uni

Hammoudi, Nadia, Géologie des terrains superficiels, Département de géographie physique, Université de Liège, Place du 20 Août, 7, B-4000 Liège, Belgique

He, Dong-Chen, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1

Hémis, Malek, 2, rue du 5° Chasseur Beaulieu, El Harrach, Alger, Algérie

Henrotin, Céline, Boulevard d'Avroy, 6, 4000 Liège, Belgique

Heymans, Luc, Direction de la topographie et de la cartographie, Ministère wallon de l'Équipement et des Transports, WTC 3, 2e étage, Boulevard Simon Bolivar, 30, B-1210 Bruxelles, Belgique

Hirsch, Jacky, Laboratoire Image et Ville, Université Louis Pasteur (Strasbourg I), 3, rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France

Honorez, Annabelle, CICADE, avenue de la Pairelle, 11, 5000 Namur, Belgique

Hubert, Alain, Laboratoire SURFACES, Faculté des sciences, Université de Liège, Place du XX Août, 7, bâtiment A1, 4000 Liège, Belgique

Ionescu, Ion, Laboratoire de photogrammétrie et télédétection, Division de la télédétection de l'Agence spatiale roumaine, Université technique de constructions de Bucarest, Boul. Lacul Tei Nr. 124, secteur 2, of. 38, 72302 Bucarest, Roumanie

Jacqueminet, Christine, CRENAM-CNRS URA 260, Université Jean Monnet (Saint-Étienne), 3, rue Basse-des-Rives, 42023 Saint-Étienne cedex 2, France

Jasselette, Jean-Claude, Institut géographique national de Belgique, CA/Télédétection, Abbaye de la Cambre, 13, 1000 Bruxelles, Belgique

Joumady, Kacem, Département de géographie, Faculté des lettres et sciences humaines, Université Hassan II, B.P. 546, Mohammedia, Maroc

Jouret, Bernard, Institut géographique national de Belgique, CA/Télédétection, Abbaye de la Cambre, 13, 1050 Bruxelles, Belgique

Juin, Sylvain, Géologie des terrains superficiels, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Kabatusuila, Panu-Mpanu (Prosper), Université de Bordeaux I, Résidence Europe, Appt. 13, 84, rue Camille Sauvageau, 33800 Bordeaux, France

Karimoune, Salifou, École normale supérieure, Université Abdou Moumouni, B.P. 10963, Niamey, Niger

Khoun, Sokunthea, Géologie des terrains superficiels, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Lafrance, Pierre, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1

Lambert, Joël, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, 4000 Liège, Belgique

Lambinon, Michel, Rue Quatre Vents, 16, 4540 Ampsin, Belgique

Larouche, Pierre, Institut Maurice-Lamontagne, Pêches et Océans Canada, B.P. 1000, Mont-Joli (Québec), Canada G5H 3Z4

Laurent, Bénédicte, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Layaud, Roger, Direction de la recherche et de la coopération scientifique et technologique, Ministère de la Recherche scientifique et de l'Enseignement supérieur, B.P. 2217, Libreville, Gabon

Le Hegarat, Guy, Institut national de la statistique et des études économiques, 18, boul. Adolphe-Pinard, 75675 Paris cedex 14, France

Lemaux, Jean-Marc, Direction de la topographie et de la cartographie, Ministère wallon de l'Équipement et des Transports, WTC 3, 2e étage, Boulevard Simon Bolivar, 30, B-1210 Bruxelles, Belgique

Lenco, Michel, Direction générale de l'administration et du développement, Ministère de l'Environnement, 20, avenue de Ségur, 75302 Paris 07 SP, France

Lhermerout, Christophe, Hydrologie et hydrographie, Institut du génie civil, Université de Liège, quai Banning, 6, B-4000 Liège, Belgique

Lichtenegger, Juerg, Institut européen de recherche spatiale, Agence spatiale européenne, via Galileo Galilei, B.P. 64, 00044 Frascati, Italie

Lissoir, Sandrine, Département de mathématique, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rue de Bruxelles, 61, 5000 Namur, Belgique

Liu, Jiaqing, Commission du plan de Ningxia, No 39 Jiefang West Street, Yinchuan, Chine

Lortic, Bernard, Mission ORSTOM en Équateur, Calle San Ignacio 601 y Rumboldt, Quito, Équateur

Louis, Pierre, CICADE, avenue de la Pairelle, 11, 5000 Namur, Belgique

Loumi, Saliha, 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

Mahious, Nourredine, Géologie des terrains superficiels, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Mahrour, Mohamed, Département de géographie et d'aménagement du territoire, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie

Marchal, Denis, Laboratoire SURFACES, Université de Liège, Place du XX Août, 7, bâtiment A1, 4000 Liège, Belgique

Marczuk, Sabine, Val du Fierain, 56, B-4860 Wegnez, Belgique

Martinez, Ana Maria, Centro de procesamiento digital de imágenes, Institut de Ingeniería, Carretera nacional, Apartado 40200, Caracas 1040-A, Venezuela

Messar, Nadia, Laboratoire de télédétection, Centre national des techniques spatiales, B.P. 13, 31200 Arzew, Algérie

Messar, Youcef, Laboratoire de télédétection, Centre national des techniques spatiales, B.P. 13, 31200 Arzew, Algérie

Moanda, Nakatanda Henri, Département de géographie, Université de Kinshasa, Faculté des sciences, B.P. 190, Kinshasa XI, République démocratique du Congo

Montaigne, Fabienne, Département de mathématique, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rempart de la Vierge, n° 8, 5000 Namur, Belgique

Morin, Denis R., Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1

Moxhet, Jean, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Muller, Fabrice, Laboratoire SURFACES, Faculté des sciences, Université de Liège, Place du XX Août, 7, bâtiment A1, 4000 Liège, Belgique

Mynsberghe, Vincent, Direction de la topographie et de la cartographie, Ministère wallon de l'Équipement et des Transports, WTC 3, 2e étage, Boulevard Simon Bolivar, 30, B-1210 Bruxelles, Belgique

Nadasdi, Istvan, Laboratoire SURFACES, Séminaire de géographie, Université de Liège, Place du XX Août, 7, bâtiment A1, 4000 Liège, Belgique

Nedelcu, Catalin, Laboratoire de photogrammétrie et télédétection, Faculté de géodésie, Université technique de constructions de Bucarest, Boul. Lacul Tei No. 124, secteur 2, 72302 Bucarest 38, Roumanie

Nguyen Xuan, Dao, Trung Tam Vien Tham va geomatique, Vien Dia Chat, Trung Tam Khoa Hoc Tu Nhien Va Cong Nghe Quoc Gia, Nghia Do, Tu Liem, Ha Noi, Viêt-Nam

Nibaruta, Cassien, Géologie des terrains superficiels, Institut de géographie, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Nitu, Calin, Directia Topografica Militara, Ministerul Apararii Nationale, B-dul 1 Mai, 124-126, sector 1, 78219 Bucarest, Roumanie

Noaje, Ioan, Chaire de photogrammétrie et télédétection, Faculté de géodésie, Université technique de génie civil de Bucarest, B-dul Lacul Tei No. 124, secteur 2, 72302 Bucarest, Roumanie

Orban-Ferauge, Françoise, Laboratoire GÉOSATEL, Département de géographie, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Rue de Bruxelles, 61, 5000 Namur, Belgique

Ouarab, Nadia, 1, rue Tagore, 16000 Alger, Algérie

Ould Sidi Baba, Mohamed Lemine, Rue Lainesse, 86, B-4020 Liège, Belgique

Ozer, André, Laboratoire de géomorphologie et télédétection, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Ozer, Chrisophe, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Padonou, Nourou Moucharaf, Centre régional de télédétection de Ouagadougou, 01 B.P. 1762, Ouagadougou 01, Burkina Faso

Parent, Lucie, AUPELF-UREF, B.P. 400, succursale «Côte-des-Neiges», Montréal, Québec, Canada H3S 2S7

Penneman, Raoul, Da Vinci consulting S.A., Chaussée de Huy, 230, B-1325 Chaumont-Gistoux, Belgique

Perasso, Luigi, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Pérez, Jesùs Arnaldo, Station internationale de recherche contre la faim, 39, allées Jules Guesde, 31100 Toulouse, France

Pham Van, Cu, Trung Tam Vien Tham va geomatique, Vien Dia Chat, Trung Tam Khoa Hoc Tu Nhien Va Cong Nghe Quoc Gia, Nghia Do, Tu Liem, Ha Noi, Viêt-nam

Phan-Trong, Trinh, Laboratoire de géodynamique, Institut de géologie, Centre national des sciences naturelles et de technologie, Vien Dia Chat, Nghia do-Tu liem, Hanoi, Viêt-nam

Pourouchottamin, Prita, Département de géographie, Université du Québec à Montréal, B.P. 8888, succ. Centre-ville, Montréal (Québec), Canada H3C 3P8

Prick, Angélique, Département de géographie physique, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Ranchin, Thierry, Groupe télédétection et modélisation, Centre d'énergétique, École des mines de Paris, rue Claude Daunesse, B.P. 207, 06904 Sophia-Antipolis cedex, France

Rasson, Jean-Paul, Laboratoire GÉOSATEL, Département de mathématique, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, 61, rue de Bruxelles, 5000 Namur, Belgique

Reginster, Isabelle, Laboratoire de télédétection et d'analyse régionale, Institut de géographie, Université catholique de Louvain, Place Louis Pasteur, 3, bâtiment Mercator, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

Renard, Emmanuelle, Département de géographie, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, succ. Centre-ville, Montréal (Québec), Canada H3C 3P8

Rougab, Abderrazak, Département de génie électrique, Centre universitaire de Laghouat, B.P. 37 G, Laghouat 03000, Algérie

Ruthy, Ingrid, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Saa Orellana, Ana, Géologie des terrains superficiels, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Saidi, Jamila, Département de géographie, Faculté des lettres et sciences humaines, Université Hassan II, B.P. 546, Avenue Hassan II, Mohammedia 20650, Maroc

Salorn, Phok, Géologie des terrains superficiels, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Sékou Keita, Mamadou, Direction nationale de la cartographie et de la topographie, Ministère des Travaux publics, de l'Urbanisme et de la Construction, B.P. 240, Bamako, Mali

Semitita, Pascal, Géologie des terrains superficiels, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Serradj, Aziz, Laboratoire Image et Ville, URA 902, Institut de géographie, Université Louis Pasteur (Strasbourg I), 12, rue Goethe, 67000 Strasbourg, France

Simeu-Kamdem, Michel, Département de recherches géographiques, Institut national de cartographie, B.P. 157, Yaoundé, Cameroun

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

Sow, Cheikh, Direction de la topographie et de la cartographie, Ministère de l'Équipement et des Transports, B.P. 237, Nouakchott, Mauritanie

Tahiri, Driss, Laboratoire SURFACES, Université de Liège, Place du XX Août, 7, bâtiment A1, 4000 Liège, Belgique

Tefnin, Aude, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Terrettaz, Pierre, Institut de géographie, Faculté des sciences, Université de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg, Suisse

Thill, Bernard, Direction de la topographie et de la cartographie, Ministère wallon de l'Équipement et des Transports, WTC 3, 2e étage, Boulevard Simon Bolivar, 30, B-1210 Bruxelles, Belgique

Torres, Wuilian, Centro de procesamiento digital de imágenes, Institut de Ingeniería, Carretera nacional, Apartado 40200, Caracas 1040-A, Venezuela

Toudert, Djamel, Instituto de Investigaciones Sociales, Edificio del Postgrado y Investigaciones, Universidad Autonoma de Baja California, BLB Benito-Juarez S/N, Mexicali, Bca, Mexique

Traoré, Diadié, Direction nationale de la cartographie et de la topographie, Ministère des Travaux publics, de l'Urbanisme et de la Construction, B.P. 78, Bamako, Mali

Tribak, Abdelmajid, Rue de la Limite, 81, Saint-Jesse, 1030 Bruxelles, Belgique

Uyttendaele, Michel, Société wallonne de photogrammétrie (Walphot), rue Van Opré, 97, 5100 Namur, Belgique

Vaguet, Alain, 15, rue H. Lafosse, 76000 Rouen, France

Vaguet, Odette, Laboratoire MTG/CNRS, Bâtiment IRED, Université de Rouen, 76821 Mont-Saint-Aignan cedex, France

Vandenberghe, Philippe, Da Vinci consulting S.A., Chaussée de Huy, 230, B-1325 Chaumont-Gistoux, Belgique

Verger, Fernand, École normale supérieure, 45, rue d'Ulm, 75005 Paris, France

Vos, Pierre, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, Bâtiment B-11, Allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Wald, Lucien, Groupe télédétection et modélisation, Centre d'énergétique, École des mines de Paris, B.P. 207, F-06904 Sophia-Antipolis cedex, France

Weber, Christiane, Laboratoire Image et Ville (URA 902 CNRS), Institut de géographie, Université Louis Pasteur (Strasbourg I), 3, rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, France

Wilmet, Jules, Laboratoire de télédétection et d'analyse régionale, Département de géographie, Université catholique de Louvain, Place Louis Pasteur, 3 - Bâtiment Mercator, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

Wolff, Éléonore, 27, rue de l'Aqueduc, 1050 Bruxelles, Belgique

Yevidé, Hilaire, Géologie des terrains superficiels, Université de Liège, Sart Tilman, Allée du 6-Août, bât. B11, B-4000 Liège, Belgique

Zavoianu, Florea, Laboratoire de photogrammétrie et télédétection, Faculté de géodésie, Université technique de génie civil de Bucarest, Boul. Lacul Tei No. 124, secteur 2, 72302 Bucarest 38, Roumanie

Introduction

Avec ses huit ans d'existence, le Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF en est à ses sixièmes journées scientifiques. Toutes ces journées ont été un succès, que ce soit celles sur les bilans régionaux et thématiques en Francophonie (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) ou sur la télédétection des ressources en eau (Tunis, 1993) ainsi que maintenant celles qui viennent d'être tenues, à Liège en 1995, sur la télédétection des milieux urbains et périurbains. Avec cette série de journées scientifiques en plus des nombreuses activités de recherche partagée, de formation et d'information scientifique et technique, le Réseau Télédétection est maintenant bien enraciné dans la communauté scientifique.

Du 2 au 5 octobre 1995, les journées scientifiques de Liège ont réuni 130 personnes de 28 pays différents, qui y ont donné 42 communications orales ou par affiches et participé à une table ronde sur le thème. L'événement s'est terminé par la participation à un colloque sur le radar du Fonds national de la recherche de Belgique, le 6 octobre, et une excursion en géographie urbaine, le 7 octobre. Malheureusement, pour des raisons politiques, nos collègues algériens n'ont pu obtenir leur visa pour y participer et présenter leur communication; afin de ne pas les pénaliser, le Comité de réseau leur a quand même permis de présenter leur texte pour les actes. Les textes de 35 de ces communications, acceptés par le Comité de lecture, se retrouvent dans les actes, en plus d'une importante section de conclusions.

Le thème des journées scientifiques de Liège a été choisi parce qu'il constituait une suite logique aux activités de recherche du Réseau en présentant une mise au point sur le thème de recherche partagée le plus récent, soit celui de la télédétection des milieux urbains et périurbains.

Avec l'avènement des capteurs à haute résolution spatiale et la disponibilité des photographies satellitaires russes, la télédétection urbaine est récemment entrée dans une phase opérationnelle. En quelques années, les applications ont atteint des échelles variant du 1: 50 000 au 1: 25 000, rendant ainsi possible l'usage de la télédétection dans la pratique de l'urbanisme, y compris dans les pays de vieille urbanisation et dans les pays en développement.

Au moment où, en Europe notamment (programme CEO-UDUC conduit par le CCR Ispra des Communautés européennes), une communauté d'utilisateurs de la télédétection urbaine cherche à se constituer et à s'organiser, il était utile de faire le point sur les travaux réalisés en cette matière dans le monde francophone.

Les actes des journées scientifiques de Liège sont divisés en cinq parties : 1) onze articles portent sur les techniques spéciales de télédétection urbaine, 2) neuf articles sur la télédétection et l'urbanisme, 3) trois articles sur les statistiques urbaines, 4) neuf articles sur la cartographie urbaine et, finalement, 5) trois articles sur les résultats des actions de recherche partagée du Réseau qui ne sont pas dans le thème spécifique des journées scientifiques.

La répartition géographique des 75 auteurs et coauteurs, venant de 18 pays, se présente comme suit : 21 % d'Afrique du Nord, 12 % d'Afrique subsaharienne, 19 % d'Amérique du Nord, 4 % d'Amérique du Sud, 2 % d'Asie et 41 % d'Europe. Cette répartition reflète bien la répartition des scientifiques francophones dans le domaine et met en relief l'effort particulier des collègues africains, surtout algériens.

La série des journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF se poursuivra, en octobre 1997, avec celles de Sainte-Foy (Québec), lesquelles porteront sur la réalité de terrain en télédétection. 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'AUPELF-UREF

PARTIE I

Techniques spéciales de télédétection urbaine

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 3-13

1

L'influence de la résolution effective des données télédétectées sur les possibilités d'analyse des milieux urbains complexes

YVES BAUDOT

Laboratoire de télédétection et d'analyse régionale, Université catholique de Louvain, 3, place L. Pasteur, B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique);
téléphone : +32 (10) 47-28-70; télécopieur : +32 (10) 47-28-77;
CÉ : baudot@geog.ucl.ac.be

Résumé

Les possibilités et limites de l'analyse des données de télédétection dépendent de plusieurs facteurs liés au capteur et aux conditions de prise de vue. Ces facteurs, dont certains varient dans le temps, se combinent pour influencer la résolution effective des données. Les possibilités d'analyse et d'interprétation des données peuvent varier de manière sensible en fonction des valeurs de résolution effective rencontrées: c'est particulièrement sensible lors de l'analyse du milieu urbain, caractérisé par son hétérogénéité et par la petite taille des objets qui le composent. L'interprétabilité des images peut être approchée en distinguant trois niveaux emboîtés d'analyse. Les limites d'interprétabilité de données réelles et simulées présentant une gamme de résolutions effectives correspondant à des conditions habituelles sont analysées selon ce modèle et les valeurs requises pour une analyse précise du milieu urbain en sont dérivées.

1. Introduction

Les données fournies par les capteurs des satellites d'observation de la Terre sont habituellement caractérisées par leur résolution spatiale, soit la taille des pixels, par leur résolution spectrale, soit le nombre de canaux et leurs sensibilités spectrales respectives, ainsi que par l'étendue de la zone couverte par une scène. Pour les applications à l'étude des milieux urbains, la résolution spatiale des données est généralement considérée comme le principal facteur limitant (WELCH, 1982; IRONS *et al.*, 1985; TODD and WRIGLEY, 1986). La résolution spatiale des données est le plus souvent appréhendée par la taille des pixels, mais ce paramètre n'est pas suffisant pour déterminer les limites d'interprétation des données : d'autres paramètres techniques influencent également la lisibilité des images.

À ce jour, les méthodes d'analyse automatique des images sont efficaces pour analyser et classer des données pixel par pixel, ou pour analyser des textures locales. Elles s'avèrent nettement moins efficaces pour l'analyse des formes complexes et des structures. Pour de nombreux utilisateurs, ces paramètres morphologiques importants, surtout lorsqu'on analyse le milieu urbain, seront donc extraits par analyse visuelle des images, éventuellement assistée par ordinateur. Le processus d'analyse visuelle peut être décomposé en trois niveaux de complexité croissante : détection, identification et analyse. Le niveau auquel on peut analyser un objet dépend de ses caractéristiques et de la résolution des images. Un même objet pourra être analysé sur telle image, mais seulement identifié sur telle autre. Par exemple, on pourra dénombrer des bâtiments individuels sur une image HRV (P) de SPOT, mais non sur une image TM de Landsat. Inversement, l'identification des objets sur une image de résolution donnée ne pourra se faire que s'ils ont une taille suffisante. Par exemple, on peut dénombrer des maisons sur une image HRV (P) de SPOT mais, sur la même image, les habitations informelles d'un bidonville ne pourront être individualisées.

Le but de cette recherche est de déterminer les possibilités d'analyse associées aux différents types de données télédétectées disponibles actuellement et dans un proche avenir, en fonction des caractéristiques des capteurs et des conditions de prise de vue. Inversement, elle permettra de déterminer les caractéristiques minimales requises pour une analyse complète du milieu urbain.

2. Interprétabilité des images

Les photo-interprètes ont l'habitude d'évaluer les possibilités d'interprétation des images en testant l'analyse d'objets courants. Ainsi, les photo-interprètes de l'OTAN utilisent une échelle d'interprétabilité (IIRS) distinguant les trois niveaux d'analyse suivants :

- détection (ex. il y a un objet sur cette piste);
- identification (ex. c'est un avion);
- analyse (ex. c'est un appareil à ailes delta de 15 m d'envergure).

Le principe de cette approche est de déterminer l'interprétabilité des images sur des objets courants, aux caractéristiques bien connues, comme des voitures, des maisons, des ponts, etc., puis d'en déduire les possibilités de reconnaissance d'autres objets. Par exemple, s'il n'est pas possible d'identifier des voitures sur une route, on ne pourra vraisemblablement pas analyser techniquement un site de missiles. Avant d'appliquer cette méthode, il convient de s'intéresser aux facteurs influençant les possibilités d'analyse d'image.

3. Paramètres techniques influençant l'interprétabilité des images

3.1. Résolution spatiale

La résolution spatiale des données est un des principaux facteurs influençant l'interprétabilité, mais ce facteur mérite quelques précisions. En effet, la résolution spatiale des images numériques est le plus souvent exprimée par la taille des pixels et, en télédétection, par la taille de la partie de la surface terrestre correspondant à un pixel. On a ainsi l'habitude de dire que la résolution spatiale du capteur TM est de 30 x 30 m, que celle du capteur HRV (P) est de 10 x 10 m, etc. Cette définition laisse supposer que les valeurs radiométriques enregistrées par un détecteur individuel, puis affectées à un pixel, sont influencées par une zone de 30 x 30 m pour TM, de 10 x 10 m pour HRV (P), etc. et que tous les objets situés à l'intérieur de cette zone influencent de manière équivalente le détecteur (fig. 1).

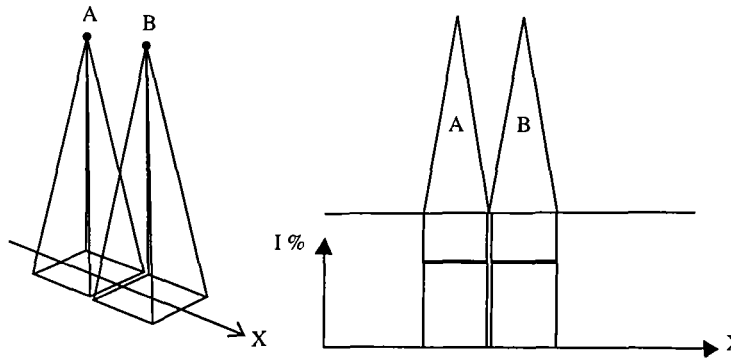


Figure 1. Zones couvertes par deux détecteurs adjacents: situation idéale (à gauche, vue perspective, à droite, champs de vue des deux détecteurs, et en dessous, sensibilité des détecteurs le long d'un profil)

La réalité est sensiblement différente. Les valeurs de résolution énoncées ci-dessus correspondent seulement à la projection sur la surface de la Terre, à travers le système optique, de l'intervalle entre deux détecteurs voisins. Les imperfections du système font que la zone « vue » par chacun des détecteurs déborde sensiblement des limites de ce pixel-sol théorique. Le champ de vue instantané d'un détecteur ponctuel a une forme circulaire et la sensibilité du détecteur diminue du centre vers la périphérie, selon une fonction de décroissance d'allure gaussienne (fig. 2). Cela signifie aussi que l'amplitude du signal détecté pour un objet de petite taille varie selon la position de cet objet dans la zone vue par le détecteur (fig. 3).

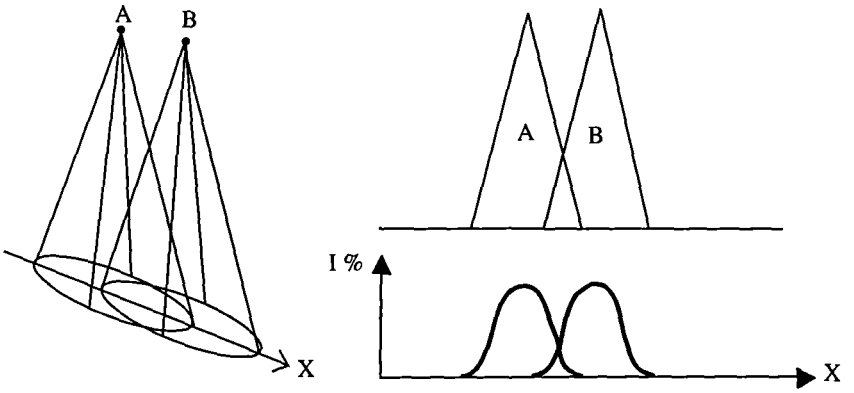


Figure 2. Zones couvertes par deux détecteurs adjacents: situation réaliste

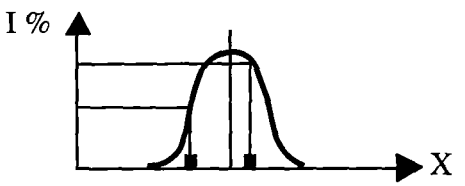


Figure 3. L'importance de la contribution d'un objet à la formation du signal enregistré par un détecteur individuel dépend de la position de cet objet par rapport au centre du pixel: l'objet de droite, plus proche du centre, influence davantage le détecteur que le même objet en position décentrée

Le champ de vue d'un détecteur déborde du cadre défini par le pixel « théorique ». Cela signifie que la signature spectrale d'un pixel peut être « contaminée » par les influences d'objets situés à l'extérieur du pixel « théorique », ce qui génère un effet de flou préjudiciable à l'analyse des images. Il existe différentes méthodes pour quantifier cet effet (SCHOWENGERDT and ARCHWAMETY, 1985). Une des plus simples à utiliser est la notion de champ de vue effectif EIFOV (*Effective Instantaneous Field Of View*). Elle exprime la distance, mesurée le long d'un axe passant par le centre du pixel, séparant les points pour lesquels la modulation d'amplitude d'un signal ponctuel tombe à 50 % de l'amplitude du même signal placé au centre. La figure 4 illustre cette notion : d1 est le pas d'échantillonnage (l'intervalle entre le centre de deux pixels voisins); d2 représente le champ de vue effectif (à l'intérieur duquel la modulation d'amplitude est toujours supérieure à 50 %).

La mesure à 50 % d'atténuation reste assez tolérante. La zone située à l'intérieur du champ de vue effectif ne contribue que pour environ 80 % à la formation du signal. Cela veut aussi dire que, pour obtenir un pixel pur à 95 %, il faut envisager une zone d'un diamètre égal à 1,6 fois le champ de vue effectif. Par exemple, une valeur moyenne de champ de vue effectif sur des données HRV (XS) est d'environ 30 m. Pour avoir un pixel pur à 95 %, il faut observer une zone homogène d'au moins 48 m de diamètre. Pour être certain de trouver un tel pixel pur, il faut ajouter une marge équivalente à un pas d'échantillonnage (effet de phase), soit une surface minimale d'environ 4 600 m^2 (46 ares), ce qui est très différent des 4 ares suggérés par la taille du pixel.

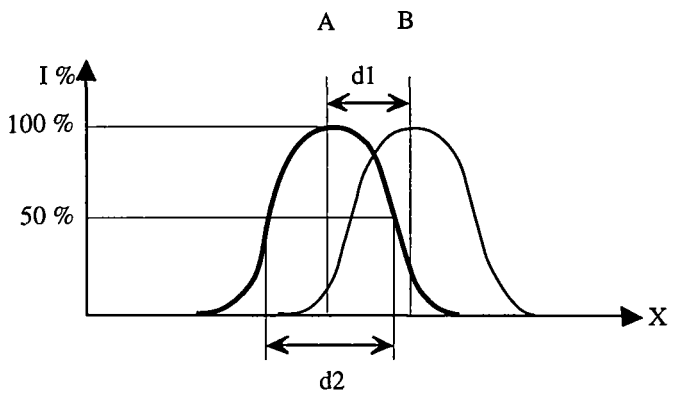


Figure 4. Pas d'échantillonnage et champ de vue effectif de deux pixels voisins. Les courbes représentent la variation de sensibilité des détecteurs du centre vers la périphérie. d1: pas d'échantillonnage (intervalle entre le centre de deux pixels voisins), d2: champ de vue effectif (à l'intérieur duquel la modulation d'amplitude est toujours supérieure à 50%)

La résolution effective d'une image dépend de nombreux facteurs : des propriétés des détecteurs photosensibles, de l'électronique, de l'optique du télescope, qui peuvent toutes être caractérisées par leur fonction de transfert de modulation. Ces caractéristiques sont *a priori* constantes pour un capteur donné, sauf incident technique ou vieillissement. Par contre, les performances optiques du système dépendent également de la qualité optique de l'atmosphère qui, elle, peut varier dans des proportions importantes. La présence de poussières, de fumées et d'aérosols dégrade de manière très sensible la résolution effective d'un capteur. Par nature, ces paramètres sont extrêmement variables dans le temps et dans l'espace, ce qui explique que l'interprétabilité de deux images d'un même satellite, acquises à quelques jours d'intervalle, voire même de deux parties d'une même image, puisse être très différente.

3.2. Pas d'échantillonnage

Le pas d'échantillonnage exprime la distance séparant le centre de deux pixels adjacents. Lorsqu'on l'exprime en équivalent-sol, c'est en fait l'information que donne l'indication de « résolution » habituellement utilisée. Ainsi, sur le capteur HRV (P), chaque élément sensible de la barrette d'éléments photosensibles (CCD) mesure 13 µm. Le télescope de HRV a une focale de 1,082 mm, et le satellite est placé sur une orbite à environ 835 km. L'intervalle entre la projection au sol du centre de deux détecteurs voisins est donc bien de

$$0{,}000013 \text{ m} \times (835\,000 \text{ m} / 1{,}082 \text{ m}) = 10 \text{ m}.$$

Sur les capteurs numériques, le pas d'échantillonnage au niveau du détecteur est fixe, mais son équivalent sol peut varier sensiblement, en fonction des variations d'altitude du satellite (3 % de variation pour SPOT entre la latitude 80° S et l'équateur), mais surtout en

fonction de l'angle de visée (près de 25 % de variation entre une visée verticale et une visée à 27°). Sur les données fournies par les satellites russes, les variations d'échelle sont également importantes, mais puisqu'il s'agit de capteurs photographiques, la numérisation s'effectue au sol et il est possible de faire varier le pas d'échantillonnage.

La théorie générale du traitement du signal numérique démontre que la taille minimale des objets analysables est intrinsèquement liée à celle du pas d'échantillonnage. C'est particulièrement sensible lorsque l'on observe des objets présentant une texture régulière comme on en observe souvent dans les zones urbaines (succession de maisons et de jardins dans les zones loties). Si le pas d'échantillonnage est plus grand que la moitié de la taille des objets (les parcelles), le risque est grand d'observer un phénomène d'interférence entre les fréquences-objets et les fréquences-capteur (phénomène de « repliement de fréquences »), amenant à la formation d'artefacts appelés effets de moiré.

Il convient également de noter que, dans un système d'analyse par réseau à maille carrée, l'orientation des objets à observer, et en particulier des textures, est très importante. Des structures urbaines répétitives de petite taille peuvent être identifiées lorsqu'elles sont parallèles à la trace du satellite, mais les mêmes structures disparaissent de l'image lorsqu'elles suivent la direction diagonale, puisque le pas d'échantillonnage dans cette direction est 1,44 fois supérieur.

3.3. Dynamique des images

La dynamique des images est intrinsèquement liée au contraste des objets. En général, les bâtiments et les routes, qui constituent une part importante de l'interprétation en milieu urbain, sont assez bien contrastés par rapport aux surfaces naturelles avoisinantes. Par contre, en présence de constructions de terre et de pistes non revêtues, le contraste pourra être insuffisant.

L'examen des histogrammes des images fournies par les satellites d'observation montre souvent que seule une étroite plage des 256 valeurs numériques théoriquement possibles est réellement utilisée. Cela provient du fait que le satellite doit être adapté à des conditions de réflectance très variables, de la banquise aux forêts équatoriales. En conséquence, les images brutes sont généralement très sombres et très peu contrastées. Il est bien entendu possible d'améliorer l'aspect de ces images en adaptant la dynamique de système de visualisation (étirement des histogrammes), mais, dans certaines conditions, lorsque le contraste des objets est très réduit et que la dynamique se résume à quelques valeurs numériques, il n'est plus possible de distinguer les objets.

3.4. Niveau de bruit

En utilisant un système d'observation idéal sur une surface parfaitement homogène, on devrait obtenir une image parfaitement homogène. Ce n'est jamais le cas, car des imperfections, principalement liées à la partie électronique du système, viennent se superposer au signal généré par le détecteur. L'amplitude de ces bruits peut atteindre plusieurs valeurs numériques, ce qui s'avère particulièrement gênant lorsqu'on analyse des images à faible dynamique. La répartition du bruit dans l'image peut être aléatoire, mais on observe très souvent du bruit structuré, le long des lignes (TM) ou des colonnes (HRV). Dans certains cas, il est possible d'atténuer l'effet de ces bruits par l'application de méthodes de filtrage, mais cette opération tend souvent à dégrader la qualité de l'image.

4. Influence de ces paramètres techniques sur l'interprétabilité des images

4.1. Niveaux d'interprétation

L'interprétation peut être organisée en trois niveaux de complexité croissante : la détection, l'identification et l'analyse. Sur une image donnée, en fonction des quatre paramètres techniques évoqués à la section 3, des objets de caractéristiques données (taille, forme, contraste, etc.) pourront, ou ne pourront pas être interprétés à un niveau donné. Inversement, sur une image dont les paramètres techniques sont fixés, en fonction de leur taille et de leur contraste, certains objets pourront être analysés, alors que d'autres ne pourront être qu'identifiés, voire seulement détectés.

4.2. Lisibilité d'un texte

On peut tenter un parallèle avec les tests de lisibilité pratiqués par les opticiens. En analysant, à une distance donnée, la taille minimale des caractères qu'une personne peut lire, on détermine son acuité visuelle. Le parallèle est particulièrement évident lorsque l'on s'intéresse à l'analyse de milieux urbains et qu'on le compare à l'analyse de textes sur un document numérisé. La tache urbaine correspond aux plages de texte imprimé, qui ne doivent pas être confondues avec les illustrations. On peut y distinguer la structuration du texte en paragraphes (les quartiers). Les maisons correspondent aux caractères du texte. Il est aisé de les compter (détection), même sur un document numérique de piètre qualité. L'identification des caractères ou des maisons nécessitera plus de détails, alors que leur analyse technique (s'agit-il d'une police italique, de caractères gras, etc. ? - quels sont les matériaux de construction ? quel est l'âge de la maison ?) exigera encore bien plus de détails.

Une image test (fig. 5), composée de lignes de caractères de taille connue, et offrant une large gamme de contrastes (caractères / fond) est soumise à des numérisations dont on maîtrise le pas d'échantillonnage, la résolution effective et le niveau de bruit. Les valeurs numériques en tête de ligne (à gauche) indiquent la taille des caractères (en dizaines de pixels : « 3 » signifie 30 pixels de haut). Le contraste varie de 100 % dans la partie gauche (caractères noirs sur fond blanc) à 0 % dans la partie droite de la figure (caractères noirs sur fond noir). Sur la figure 6, cette image de référence est numérisée avec un pas d'échantillonnage de 10, 20 et 30 pixels (respectivement en haut, au milieu et dans le bas de l'image), et avec un champ de vue instantané augmentant de gauche à droite (respectivement 1,2 , 1,5 et 2 fois la taille du pas d'échantillonnage).

On interprétera ces images comme suit. En supposant que la résolution de l'image de base est de 1 m, les objets les plus petits mesurent 30 m, et sont observés avec des capteurs dont les caractéristiques sont proches de celles des capteurs HRV (P) (10 m de pas d'échantillonnage), HRV (XS) (20 m) et TM (30 m). Les valeurs de résolution effective (de 1,2 à 2 fois le pas d'échantillonnage) sont proches de celles observées sur des images satellitaires réelles. Sur toutes les imagettes, il est possible de détecter les lignes de caractères, mais la détection des caractères n'est possible que pour un pas d'échantillonnage de 10 pixels. La reconnaissance des caractères n'est possible, avec un taux de réussite suffisant, que pour des caractères de 50 m, pour un pas d'échantillonnage de 10 m, pourvu que la résolution effective et le contraste soient bons.

Sur la figure 7, on a supprimé l'effet des variations de contraste, mais on a ajouté un effet de bruit aléatoire. Les valeurs de 10 et 25 % de bruit peuvent être rencontrées sur des images

Figure 5. Image de référence pour les tests de lisibilité

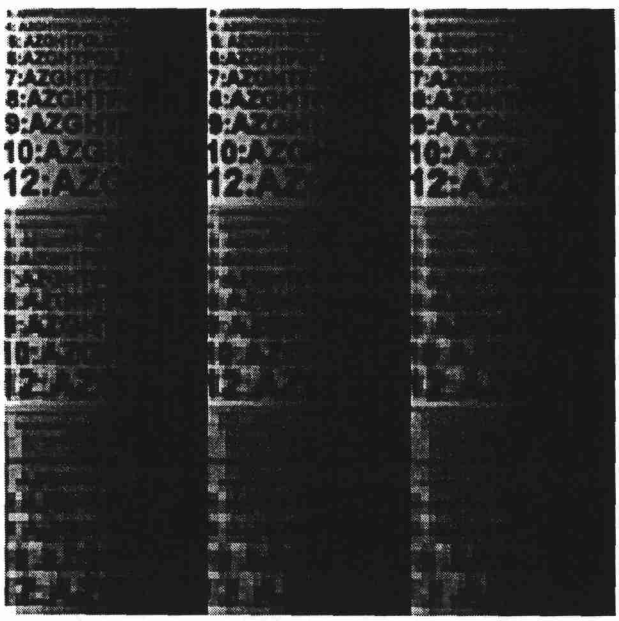


Figure 6. Effets combinés du pas d'échantillonnage et de la résolution effective sur la lisibilité d'une image

Figure 7. Influence du niveau de bruit sur la lisibilité d'une image. Partie supérieure: pas d'échantillonnage = 10 pixels, partie inférieure, pas d'échantillonnage = 20 pixels. La bande supérieure montre l'amplitude du bruit (0, 10, 25 et 50%)

de télédétection, en particulier lorsque la dynamique de l'image est faible. On constate que des objets de 50 m observés avec une bonne résolution effective et un pas d'échantillonnage de 10 m, s'ils étaient identifiables sur une image non bruitée, ne peuvent plus être reconnus lorsqu'on injecte 25 % de bruit aléatoire. Pour pouvoir être reconnus, il faut que leur taille atteigne 70 m environ.

5. Résolution effective des images satellitaires

Si le pas d'échantillonnage des images satellitaires est bien connu, il n'en va pas de même pour les autres paramètres influençant l'interprétabilité des images. La dynamique générale peut être aisément évaluée par l'examen des histogrammes de l'image, habituellement disponibles en consultant les catalogues des distributeurs d'images, notamment avec les imagettes de contrôle. L'évaluation du niveau de bruit est plus délicate et doit se faire sur les images à pleine résolution. Une manière efficace d'évaluer ce paramètre est d'effectuer un étirement de contraste sur une zone *a priori* homogène de l'image. L'évaluation de la résolution effective, et en particulier la détermination de la valeur effective du champ de vue instantané sont encore plus délicates. Il est parfois possible de les appréhender en analysant la fonction de dispersion des valeurs le long d'une limite linéaire entre deux affectations bien contrastées (fig. 8).

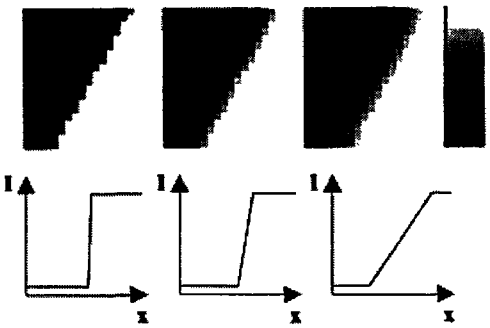


Figure 8. Gradient des valeurs radiométriques le long de la limite entre deux affectations bien contrastées: la résolution effective des imagettes est meilleure à gauche qu'à droite

Une analyse des travaux antérieurs (DOSSIERES and JUSTICE, 1983; MALARET *et al.*, 1985; SCHOWENGERDT and ARCHWAMETY, 1985; LEGER, 1986; GRUNBLATT, 1987; CARNAHAM and ZHOU, 1989; ROBINET *et al.*, 1991), appuyée par nos propres mesures effectuées sur plusieurs sites urbains en Europe et en Afrique, elles-mêmes confirmées par plusieurs contacts avec les producteurs d'images, indique que la taille du champ de vue instantané, soit le diamètre du cercle à l'intérieur duquel la modulation d'amplitude est toujours supérieure à 50 %, varie entre 1,2 à plus de 2 fois le pas d'échantillonnage sur les systèmes HRV et TM. Nous n'avons pas eu l'occasion de mesurer la résolution effective de données des systèmes russes, mais une évaluation rapide de quelques images montre que ces données sont souvent suréchantillonnées : on propose des données échantillonnées à 2 m, dont la résolution effective est proche de 5 m.

Il convient de noter que les valeurs observées en milieu urbain sont souvent assez médiocres, suite à la pollution fréquemment observée sur les villes.

6. Interprétabilité des images satellitaires

En confrontant ces observations aux tests de lisibilité développés à la section 4, on conclut que, si des bâtiments isolés de taille réduite (< 10 m) peuvent êtres détectés sur des images HRV (P) pour autant qu'ils soient bien contrastés, seuls des bâtiments de grande taille (de plusieurs dizaines de mètres) peuvent être analysés sur ces images. En inversant le problème, on peut déterminer que la résolution effective des images nécessaires à l'analyse technique des bâtiments de taille moyenne (5 à 10 m) devrait être 1,5 à 3 m environ, pour un pas d'échantillonnage proche de 1 à 2 m. Pour mémoire, ces performances de résolution sont normalement atteintes par des photographies aériennes au 1: 30 000, de qualité moyenne.

7. Conclusions

La résolution effective des images satellitaires est généralement assez médiocre. Elle réduit de manière notoire les possibilités d'interprétation en milieu urbain. À l'heure actuelle, sur les meilleures données couramment disponibles (HRV [P]), il est possible de détecter des

bâtiments isolés, même de petite taille, pour autant qu'ils soient bien contrastés. En habitat groupé, l'analyse de l'habitat individuel ne pourra se faire qu'au niveau des îlots, sauf s'il s'agit de très grandes parcelles et bâtiments (de plusieurs dizaines de mètres).

En présence de modules d'habitat dont la taille est proche du pas d'échantillonnage (soit 10 m), il convient d'être particulièrement circonspect lorsqu'on analyse les trames urbaines au moyen d'outils d'analyse de texture, car le risque d'analyser une pseudo-texture (effet de moiré) n'est pas négligeable.

Les résolutions annoncées pour les prochaines générations de HRV (5 m, en 1999) et de TM (15 m, en 1998) ne seront pas suffisantes pour passer de l'analyse urbaine menée au niveau des quartiers à l'analyse du bâti. Par contre, la disponibilité prochaine de satellites commerciaux à très haute résolution (*EyeGlass* en 1997, *EarthWatch* en 1998, entre autres) permet d'envisager cette transition tant attendue par les urbanistes, pour autant que les valeurs de résolution effective soient réellement adaptées à ces performances.

Dans tous les cas, qu'il nous soit permis de rappeler que la télédétection aéroportée permet d'ores et déjà, et depuis de nombreuses années, d'atteindre, et souvent de dépasser, ces performances de résolution, pour un coût souvent inférieur.

8. Références

CARNAHAM, W.H. and ZHOU, G. 1989. Fourier Transform Techniques for the Evaluation of the Thematic Mapper Line Spread Function. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, n° 5, p. 639-648.

DOSSIERES, Ph. and JUSTICE, C. 1983. Spatial and Radiometric Resolution of the Landsat-3 RBV System. International Journal of Remote Sensing, vol. 4, n° 2, p. 447-455.

GRUNBLATT, J. 1987. An MTF Analysis of Landsat Classifications Error at Field Boundaries. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 53, n° 6, p. 639-643.

IRONS, J.R., MARKHAM, B.L., NELSON, R.F., TOLL, D.L., WILLIAMS, D.L, LATTY, R.S. and STAUFFER, M.L. 1985. The Effects of Spatial Resolution on the Classification of Thematic Mapper Data. International Journal of Remote Sensing, vol. 6, n° 8, p. 1385-1403.

LEGER, D. 1986. Fonction de Transfert de Modulation. *in* SPOT-1, Premiers résultats en vol. CEPADUES Éd., Toulouse (France), p. 79-82.

MALARET, E., BARTOLUCCI, L.A., LOZANO, D.F., ANUTA, P.E. and McGILLEM, C.D. 1985. Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper Data Quality Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 51, n° 9, p. 1407-1416.

ROBINET, F., LEGER, D., CERBELAUD, H. and LAFONT, S. 1991. Obtaining the MTF of a CCD Imaging System using an Array of Point Sources: Evaluation of Performances. Proceedings IGARSS'91 Symposium, Helsinki (Finlande), 4-7 juin 1991, p. 1357-1361.

SCHOWENGERDT, R.A. and ARCHWAMETY, C. 1985. Landsat Thematic Mapper Image-Derived MTF. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 51, n° 9, p. 1395-1406.

TODD, W.J. and WRIGLEY, R.C. 1986. Spatial Resolution Requirements for Urban Land Cover Mapping. Proceedings Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management, ITC Enschede (Pays-Bas), Août 1986, p. 881-886.

WELCH, R. 1982. Spatial Resolution Requirements for Urban Studies. International Journal of Remote Sensing, vol. 3, n° 2, p. 139-146.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 15-23

2

Études multi-échelles : application aux agglomérations du nord-ouest de l'Europe

MARC BINARD, ISTVAN NADASDI, MICHEL LAMBINON, DENIS MARCHAL et JEAN-PAUL DONNAY

Service universitaire de recherches fondamentales et appliquées en cartographie et en études spatiales (Laboratoire SURFACES), Université de Liège, 7, place du 20 Août, B4000 Liège, Belgique;
téléphone: +32 (4) 366-51-13; télécopieur: +32 (4) 366-56-93;
CÉ: surfaces@geo.ulg.ac.be; W3 : http://www.geo.ulg.ac.be

Résumé

L'objectif de cette recherche est de déterminer et d'évaluer le niveau d'observation du phénomène urbain en fonction des résolutions spatiale et spectrale de différents capteurs satellitaires. Les capteurs utilisés sont AVHRR de NOAA, MSS et TM de Landsat, HRV de SPOT et les photographies KVR1000 de KOSMOS. Les échelles sont, dans l'ordre, continentale, régionale et locale. La méthodologie de base est semblable pour les différents niveaux d'observation, mais le résultat des traitements est fonction des échelles utilisées. La procédure comprend les corrections géométriques des images, les classifications dirigées en 6 classes pour AVHRR, en 9 classes pour MSS et en 12 classes pour TM et HRV et le calcul du potentiel urbain. Le potentiel urbain permet de déterminer les axes d'urbanisation, les limites du périmètre urbain ainsi que le réseau des villes à différentes échelles. Les zones d'influence des villes sont déterminées par les polygones de Thiessen pondérés, tandis que les grandes unités paysagères sont obtenues par classification automatique des images des différents potentiels. L'extraction des axes d'urbanisation est plus efficace avec les données issues de capteurs à haute résolution spatiale tandis que la faible résolution est plus performante pour limiter les zones d'influence des villes, parfois aussi pour la hiérarchie du réseau des villes et surtout pour l'analyse des paysages et des écosystèmes qui les composent.

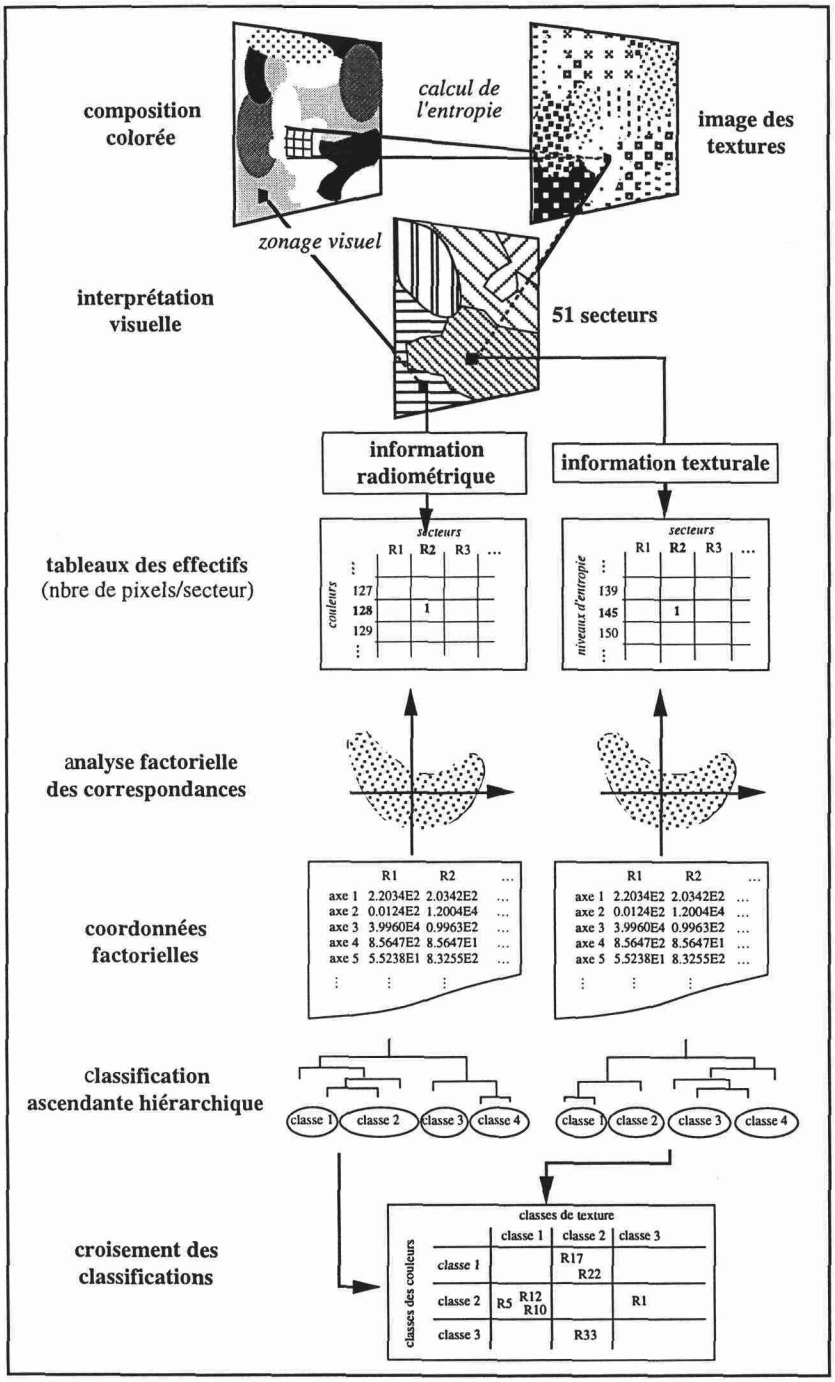


Figure 2. Chaîne de traitements utilisée pour l'élaboration d'une typologie des quartiers d'après la composition colorée : schéma de principe

1. Introduction

L'étude des agglomérations peut être réalisée à différents niveaux car l'analyse urbaine peut s'intéresser aux relations entre les agglomérations (notion de réseau subcontinental ou régional) ou être plutôt focalisée (échelle locale) sur une agglomération particulière et sa zone d'influence (région polarisée). Les images utilisées pour cette étude proviennent d'AVHRR de NOAA, de MSS et TM de Landsat, de HRV de SPOT et de KVR1000 de KOSMOS. Dans le présent article, on tente de préciser les méthodes et les capteurs satellitaires les mieux adaptés aux différentes approches.

2. Corrections géométriques

Les corrections géométriques réduisent les déformations spatiales et amènent l'image dans une projection cartographique. Elles permettent l'utilisation des informations extraites des images dans d'autres applications de même que leur confrontation avec d'autres sources.

Suivant le capteur utilisé et selon l'échelle d'analyse, les points de contrôle sont sélectionnés à partir de cartes ou de fichiers vectoriels existants. En effet, pour les petites échelles, des fichiers tels que ceux utilisés initialement par le Département américain de la défense (*Digital Chart of The World*) font pratiquement partie du « domaine public » et sont donc disponibles à faible coût. De manière opérationnelle, on remarque que ce sont les images AVHRR qui doivent subir les plus importantes corrections, notamment en bordure du champ de balayage (BONN et ROCHON, 1992). À un autre niveau d'analyse, les images à haute résolution géométrique nécessiteraient une orthorectification qui prenne en compte les distorsions dues au relief. De manière à ne pas altérer la signature spectrale des pixels, c'est la méthode du plus proche voisin qui est utilisée pour le rééchantillonnage.

3. Classification

Les modes d'occupation du sol ont été obtenus par classification dirigée utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Les zones d'entraînement ont été sélectionnées, d'une part, en utilisant l'information des cartes et, d'autre part, en interprétant visuellement les images. Suivant le niveau d'analyse, le nombre de classes passe de 6 à 9, puis à 12, respectivement pour AVHRR, MSS et TM ou HRV.

Les limites de l'agglomération physique (morphologique) peuvent être dérivées de la classification par généralisation du masque urbain à l'aide des techniques de la morphologie mathématique. Ensuite, le masque est adapté aux limites statistiques existantes en fonction notamment de l'emprise du masque dans chaque entité statistique ou commune pour définir les agglomérations politiques (VAN DER HAEGEN et PATTYN, 1979; DONNAY, 1994).

4. Potentiel

Le modèle du potentiel est dérivé de la loi de la gravitation universelle et peut aussi être interprété en termes de moments statistiques. L'idée fondamentale est que l'intensité d'interaction entre deux corps est proportionnelle aux masses en présence et inversement proportionnelle à leur éloignement. Au départ, il convient d'admettre les postulats suivants (MEINKE, 1970) :
- il existe nécessairement des interactions entre tous les corps caractérisés par leur masse et par leur position dans l'espace;
- la probabilité d'interaction est la même entre toutes les paires de corps;
- l'intensité est fonction inverse des distances qui les séparent.

On peut exprimer le potentiel total comme la somme du potentiel P*i* (intensité de l'interaction entre le pixel *i* et l'ensemble des autres pixels *j*) et de l'autopotentiel (potentiel propre de la masse du pixel *i*) :

$$P_i = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{n} \frac{v_j m_j{}^{a_j}}{d_{ij}{}^{b}} + \frac{v_i m_i}{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{s_i}{\pi}}}$$

où
P_i = potentiel du pixel *i*;
n = nombre de pixels;
v_j = coefficient de pondération de la masse du pixel *j*;
m_j = masse du pixel *j*;
a_j = exposant de la masse du pixel *j*;
d_{ij} = distance entre le pixel *i* et les pixels *j*;
b = exposant de la distance entre le pixel *i* et les pixels *j*;
s_i = surface du pixel *i*.

Remarquons que, dans la pratique, les exposants les plus utilisés ainsi que la masse du pixel ont une valeur unitaire. De plus, théoriquement, le calcul devrait être effectué sur toute l'image mais, pratiquement, on utilise une fenêtre de convolution de grande taille, généralement de forme circulaire. Cette simplification n'altère pas le sens du calcul car la valeur du potentiel est fonction inverse de la distance.

L'image du potentiel est celle d'un champ puisque le calcul du potentiel transforme la distribution discrète des modalités de la classification en une surface statistique continue. Les valeurs du potentiel sont généralement exprimées en pourcentage du potentiel maximum observé.

Il est logique de regrouper les classes d'affectation du sol appartenant à un même type d'écosystème ou composante paysagère, soit, par exemple, dans l'ordre d'artificialisation décroissante : écosystème urbain (*urbs*), écosystème agricole (*ager*), écosystème pâturage (*saltus*) et écosystème forestier (*sylva*).

Les surfaces de potentiel facilitent la description et l'analyse des macrostructures urbaines en fonction des modèles circulaires, sectoriels et multinucléaires proposés respectivement par BURGESS (1925), HOYT (1939) ainsi que par HARRIS et ULLMAN (1945). Plus intéressante est la perspective d'étude de la répartition des villes dans le sens de la théorie des lieux centraux de CHRISTALLER (1933) ou des recherches d'interrelations entre le concept de potentiel et la théorie de développement économique polarisé de PERROUX (1959).

4.1. Potentiel urbain

Afin d'analyser correctement le phénomène urbain, la taille de la fenêtre de convolution doit, d'une part, contenir suffisamment de pixels pour ne pas être incluse dans une seule catégorie d'affectation urbaine et, d'autre part, elle doit être suffisamment petite pour bien étudier la limite ville/périphérie. Quelle que soit l'échelle d'étude, une taille double de celle de la plus petite dimension prise par la classe d'habitat le plus dense au sein de l'agglomération donne généralement de bons résultats.

4.1.1. Pondération à utiliser pour calculer le potentiel urbain

La classification issue de l'image AVHRR présente une classe urbaine unique, tandis que les classifications de MSS et TM ou HRV présentent respectivement 3 et 4 types de densités urbaines.

Le calcul du potentiel urbain est réalisé en pondérant chacune des classes urbaines et en affectant un poids nul à toutes les autres classes. L'utilisation de poids pour chacune des classes de densité d'habitat implique le passage d'une échelle ordonnée à une échelle quantitative. Dans la pratique, les poids utilisés tentent de tenir compte le mieux possible du C.O.S. (coefficient d'emprise), voire de l'I.O.S. (indice d'occupation du sol). Ce dernier requiert l'évaluation du nombre de niveaux des constructions (DONNAY et NADASDI, 1992).

4.1.2. Extraction des axes d'urbanisation

Le champ du potentiel est assimilable à un relief thématique dont chaque point peut être interprété comme une cote d'altitude qui exprime une échelle de hiérarchie. Les gradients maxima et minima définissent en chaque point de la surface respectivement les directions de la plus grande pente et de l'isopotentiel. Les lignes de crête, assimilables à des arcs, définissent les axes et les bandes d'urbanisation. Les noeuds, points de rencontre des arcs, sont assimilés aux pôles urbains. Les lignes de thalweg peuvent être interprétées comme des limites entre des systèmes urbains voisins.

L'extraction manuelle des axes d'urbanisation offre l'avantage de fournir un réseau consistant et une bonne hiérarchisation des axes mais elle est très exigeante en travail. De plus le résultat varie d'un interprète à l'autre. Une alternative est d'extraire automatiquement ces lignes de crête en utilisant les outils disponibles pour le traitement des modèles hydrographiques. Si la recherche de lignes de crête n'existe pas dans le module utilisé, il suffit d'inverser le relief thématique et de rechercher le réseau d'écoulement. Les thalwegs définis sur ce modèle inversé correspondent aux axes urbains. L'inconvénient principal de cette approche automatique est que la hiérarchisation des axes est difficile à gérer. La démarche peut être faite aux différents niveaux d'analyse (fig. 1 et 2).

4.1.3. Seuillage du potentiel

Par seuillage du modèle, il est possible de proposer une définition du périmètre d'agglomération (NADASDI *et al.*, 1988; DONNAY and THOMSIN, 1994). Cette démarche peut être réalisée de manière précise à l'échelle locale. Au niveau régional ou subcontinental, le seuillage permet de retenir les pôles urbains correspondant à l'échelle d'étude.

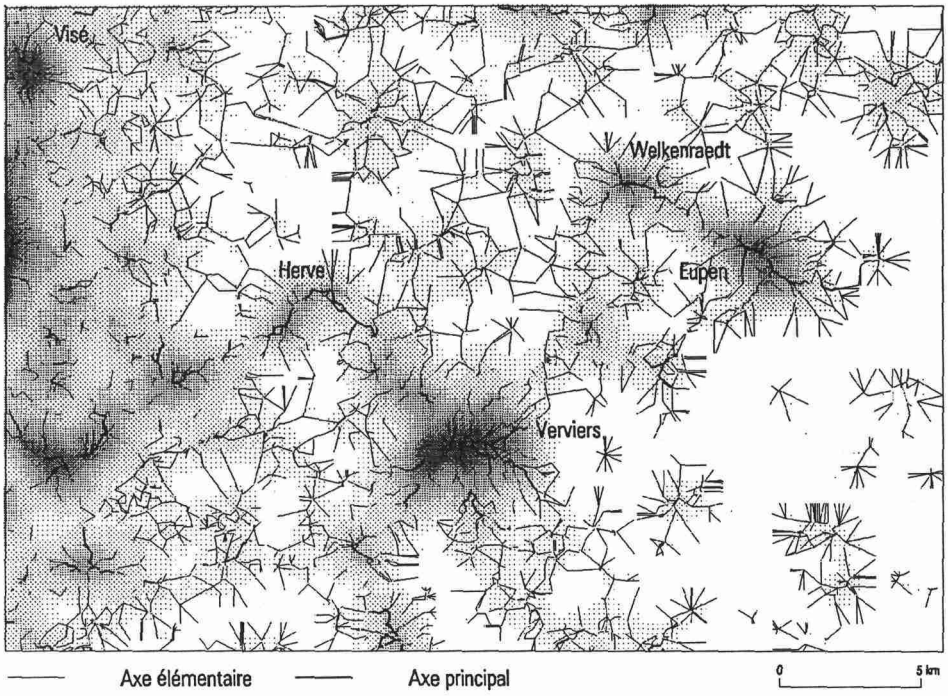


Figure 2. Structure de l'urbanisation de l'espace Liège-Verviers-Eupen : extraction automatique des axes d'urbanisation au départ d'une surface de potentiel urbain obtenue au moyen d'une fenêtre de 2 km sur la classification d'une image TM de Landsat du 16 mai 1989

fraîche estimée (NADASDI *et al.*, 1991), de l'intérêt écologique ou de la valeur économique.

La taille de la fenêtre de convolution doit être adaptée au phénomène observé. Elle est généralement beaucoup plus grande que celle utilisée pour le potentiel urbain.

4.3. Détermination des unités paysagères

Au niveau régional, les différents potentiels calculés à partir d'une classification d'une image MSS permettent de segmenter l'espace en unités éco-paysagères. La classification des canaux synthétiques de potentiel par l'algorithme « *K means* » permet notamment d'obtenir des zones isophènes correspondant à des unités éco-paysagères. L'ajout d'informations planimétriques et toponymiques confère aux documents des qualités cartographiques.

La figure 2-4 (voir cahier couleur) représente les grandes unités éco-paysagères de l'espace Meuse et Rhin. Le réseau urbain dans ses aspects géographiques et hiérarchiques est restitué à partir du potentiel urbain. Celui-ci transcrit aussi les régions polarisées de l'espace. Les forts gradients de potentiel mettent en évidence des zones de transition. Les régions naturelles ou homogènes sont rendues par les autres composantes de l'image synthétique des potentiels (NADASDI, 1995).

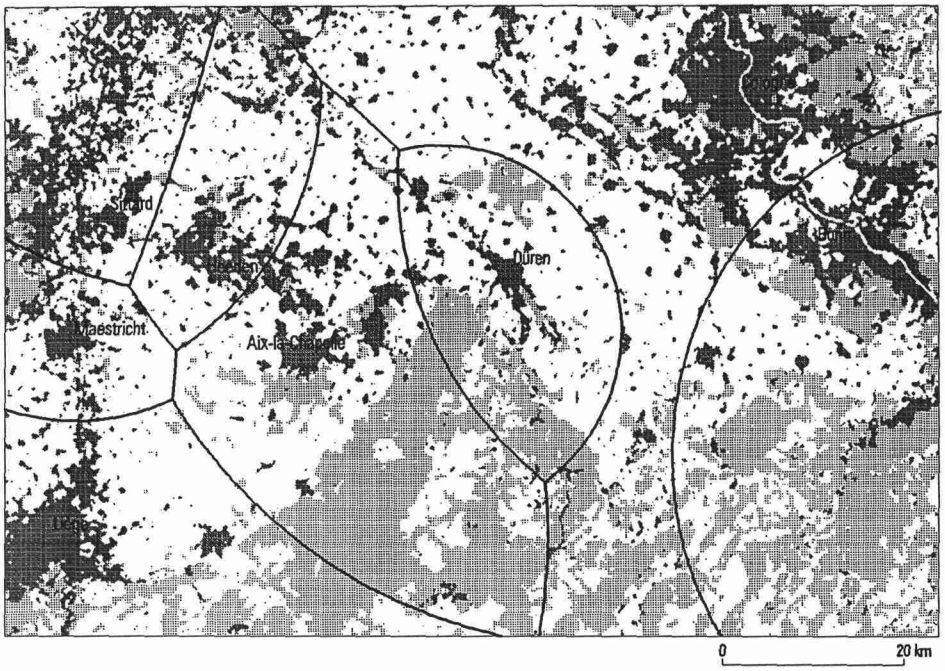


Figure 3. Hinterlands dans l'Euregio Meuse-Rhin : modèle d'hinterland calculé au départ d'une surface de potentiel urbain engendrée à partir d'une classification d'une image MSS de Landsat du 29 août 1975

5. Conclusion

Sur le tableau 1, on a synthétisé les potentialités d'utilisation urbaine des images satellitaires.

Les images NOAA permettent principalement de déterminer les zones d'influence des agglomérations à une échelle subcontinentale et secondairement de mettre en évidence les axes d'urbanisation.

À l'échelle régionale, les images MSS révèlent les axes d'urbanisation et les zones d'influence. Une autre potentialité est l'élaboration de « croquis géographiques » présentant les grandes unités paysagères par classification des différents potentiels.

À l'échelle locale, les images TM et HRV (XS) permettent de déterminer les limites des agglomérations et les axes d'urbanisation que ce soit par utilisation du potentiel ou par interprétation visuelle. Par contre, les images KVR1000 et les images HRV (P) ne possèdent qu'un seul canal et ne peuvent donc pas être classées. Il faut donc pratiquer une interprétation visuelle pour mettre en évidence les limites des agglomérations et les axes d'urbanisation.

Quelle que soit l'échelle, la généralisation engendrée par l'utilisation du potentiel permet de bien appréhender le phénomène urbain même si la classification initiale présente localement quelques imperfections. Il faut souligner que le potentiel ne doit pas être considéré uniquement comme une fonction d'agrégation mais aussi comme un filtre spécifique offrant de nombreuses potentialités d'application dans le domaine du traitement d'images.

Tableau 1. Adéquation de différents capteurs satellitaires à l'étude des agglomérations

Capteurs	Échelles	Produits dérivés du potentiel				Interprétation visuelle	
		1	2	3	4	1	2
AVHRR (NOAA)	Sub-continentale	-	+/-	+	-	-	-
MSS (Landsat)	Régionale	+/-	+	+	+	+/-	+/-
TM (Landsat) HRV-XS (SPOT)	Régionale et locale	+	+	+/-	+	+	+
HRV-P (SPOT) KVR1000 (KOSMOS)	Locale	-	-	-	-	+	+

1 Limites d'agglomération
2 Axes et pôles d'urbanisation
3 Zone d'influence et hiérarchie
4 Unités éco-paysagères

La recherche se poursuit selon deux axes : la justification statistique des paramètres intervenant dans les modèles de transformation et l'intégration de plusieurs échelles dans le cadre d'un seul système pour examiner le réseau urbain dans sa complète hiérarchie.

6. Références

BONN, F. et ROCHON G. 1992. Précis de télédétection, Volume 1, Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec / AUPELF, Québec, 485 p.

BURGESS, E.W. 1925. The growth of the city : an introduction to a research project. *in* R.E. Park, E.W. Burgess and R.D. Mckenzie (réd.). The City, Chicago University Press, Chicago, *passim* (reprinted in 1967).

CHRISTALLER, W. 1933. Die Zentralen Orte in Süddeutschland, Fischer, Jena. Édition en langue anglaise traduite par BASKIN, C. 1966. Central Places in Southern Germany. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 331 p.

DONNAY, J.-P. 1994. Agglomérations morphologiques et fonctionnelles, l'apport de la télédétection urbaine. Acta Geographica Lovaniensia, vol. 34, p. 191-199.

DONNAY, J.-P. et NADASDI, I. 1992. Usage des données satellitaires de haute résolution en modélisation urbaine: application à l'agglomération de Maastricht. Acta Geographica Lovaniensia, vol. 33, p. 659-669.

DONNAY, J.-P. and THOMSIN, L. 1994, Urban remote sensing and statistics: Prospective Research and Applications, New tools for spatial analysis. Proceedings of the workshop, Lisbon, 18-20 November, 1993, p. 137-145.

HARRIS, C.D. and ULLMAN, E.L. 1945. The nature of Cities. Annals of the American Academy of Political and Social Science, CCXLII, November 1945, p. 7-17.

HOYT, H. 1939. Structure and growth of the residential neighbourhoods in America cities. Washington DC, Government Printing Office, *passim.*

MEINKE, D. 1970. Gravitations und Potentialmodelle, Handwörterbuch der Raumforschung und Raumordnung. Akademie für Rumforschung und Landesplanung, Gebrüder Jänecke Verlag, vol. 1, Hannover, p. 1048-1060.

NADASDI, I. 1995. Inventaires biophysiques de l'occupation du sol et pratique des plans d'organisation du territoire : expériences de l'Euregio Meuse-Rhin, de la Wallonie et du Grand-Duché de Luxembourg. Jornadas tecnicas sobre Sistemas de Information Géografica et Télédeteccion espacial aplicados a la ordenacion del territorio y el medio ambiente, Centro de estudios ambientales, Vitoria-Gasteiz , Espagne, p. 171-178.

NADASDI, I., BAUDOT, Y. et DONNAY, J.-P. 1988. Une carte-pilote d'affectation du sol à Liège et des produits dérivés issus des traitements satellitaires SPOT. Les cahiers de l'urbanisme, n° 4, p. 51-60.

NADASDI, I., BINARD, M. et DONNAY. J.-P., 1991. Transcription des usages du sol par le modèle de potentiel. Mappemonde, vol. 3, p. 27-31.

PERROUX, F. 1959. Note sur la notion de pôle de croissance. Économie appliquée, vol. 8, p. 307-320.

VAN DER HAEGEN, H. et PATTYN, M. 1979. Les régions urbaines belges. Bulletin de statistique, n° 3, Institut national de statistique, Bruxelles, p. 235-250.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 25-34

3

Étude des structures urbaines de l'agglomération de Mexico à l'aide d'une image HRV de SPOT

JEAN-MICHEL EBERHARD

Centre de recherche et de documentation sur l'Amérique latine (CREDAL-CNRS), Université de la Sorbonne Nouvelle, Paris III, 28 rue Saint-Guillaume, 75007 Paris, France; téléphone : +33 (1) 44-39-86-70; télécopieur : +33 (1) 45-48-79-58

Résumé

À partir de l'imagerie HRV de SPOT, une étude de géographie urbaine du sud-est de l'agglomération de Mexico a pu être faite en associant à la fois détail et ampleur de la surface couverte. Il est proposé ici une méthode d'exploitation d'une image simple : la composition colorée. Celle-ci offre en effet l'avantage d'une interprétation visuelle aisée et permet d'utiliser la couleur et la texture d'image comme critères d'étude. Le traitement plus systématique de la composition colorée se déroule en plusieurs étapes sur ces deux critères pris séparément. Les résultats des analyses factorielles puis des classifications sont exploités en relation avec les informations visuelle et générale. Ils expliquent les structures de l'image et leurs liens avec les observations faites sur le terrain. Le croisement *in fine* des classes de couleur et de texture montre la complémentarité de ces deux types d'information, et permet l'identification et la description d'au moins six grandes catégories de quartiers où l'on distingue bien les secteurs denses ou consolidés (pavillonnaire populaire, industriel et de services, multifonctions, quartiers-jardins) des secteurs limitrophes de l'agglomération (en cours d'urbanisation et en création). Enfin, la démarche rend possible la mise en relation des caractères du développement urbain avec les caractères d'image correspondants, ce qui permet de retrouver sur une seule image certaines étapes de changement suivies par les quartiers en voie d'urbanisation.

1. Introduction

Dans le cadre d'une recherche sur les structures et la croissance urbaines du sud-est de Mexico (fig. 1) et en l'absence d'une information urbaine récente et homogène sur les quartiers les plus dynamiques, l'utilisation de la télédétection s'est révélée nécessaire pour la caractérisation des banlieues proches et lointaines de cette agglomération avec l'image HRV (XS) de SPOT du 22 mars 1986. L'analyse visuelle préalable de la composition colorée nous apparaît comme une étape essentielle à l'étude, car elle permet de poser correctement notre problématique de géographie urbaine en fonction des données que l'on se propose d'utiliser. L'étude visuelle montre également l'intérêt de développer une étude systématique sur ce type d'image étant donné la richesse d'information qu'elle contient. À l'examen visuel, deux caractères nous sont apparus essentiels pour la description et l'analyse des différents secteurs de l'image : la couleur, qui représente le caractère radiométrique ponctuel, et la texture, qui correspond à la distribution spatiale et statistique de ces couleurs sur une surface donnée. Nous utilisons donc ces deux critères pour caractériser les zones de l'image en procédant comme suit (fig. 2) :

- analyse factorielle et classification de ces zones, selon les deux critères séparément;
- croisement des deux classifications et caractérisation géographique des quartiers ainsi discriminés.

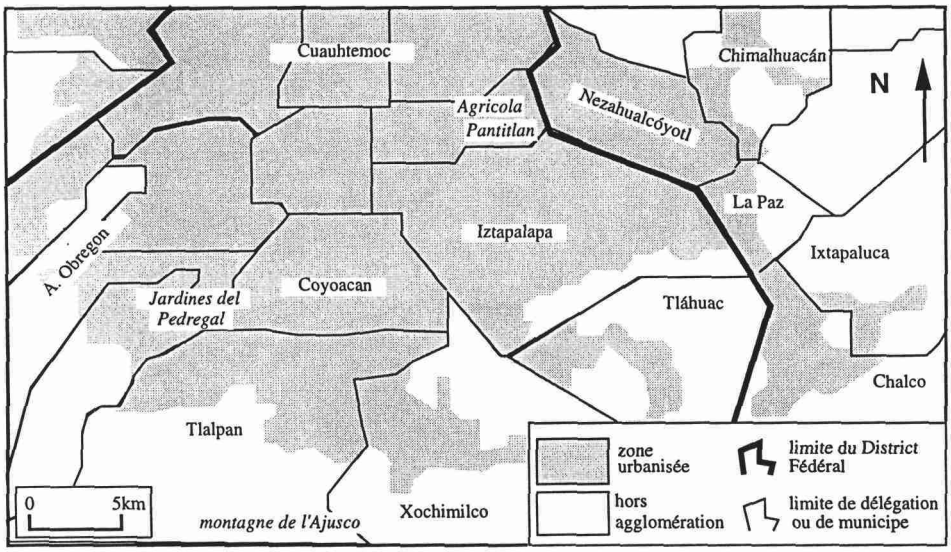


Figure 1. Le sud-est de l'agglomération de Mexico

2. Composition colorée

À l'aide du logiciel de traitement d'images Planètes de l'ORSTOM, nous avons réalisé la composition colorée à partir des canaux bruts et déterminé les bornes min-max de réétalement de la dynamique des trois couleurs en éliminant les valeurs extrêmes des distributions statistiques des niveaux de gris dans chacun des trois canaux. Les valeurs

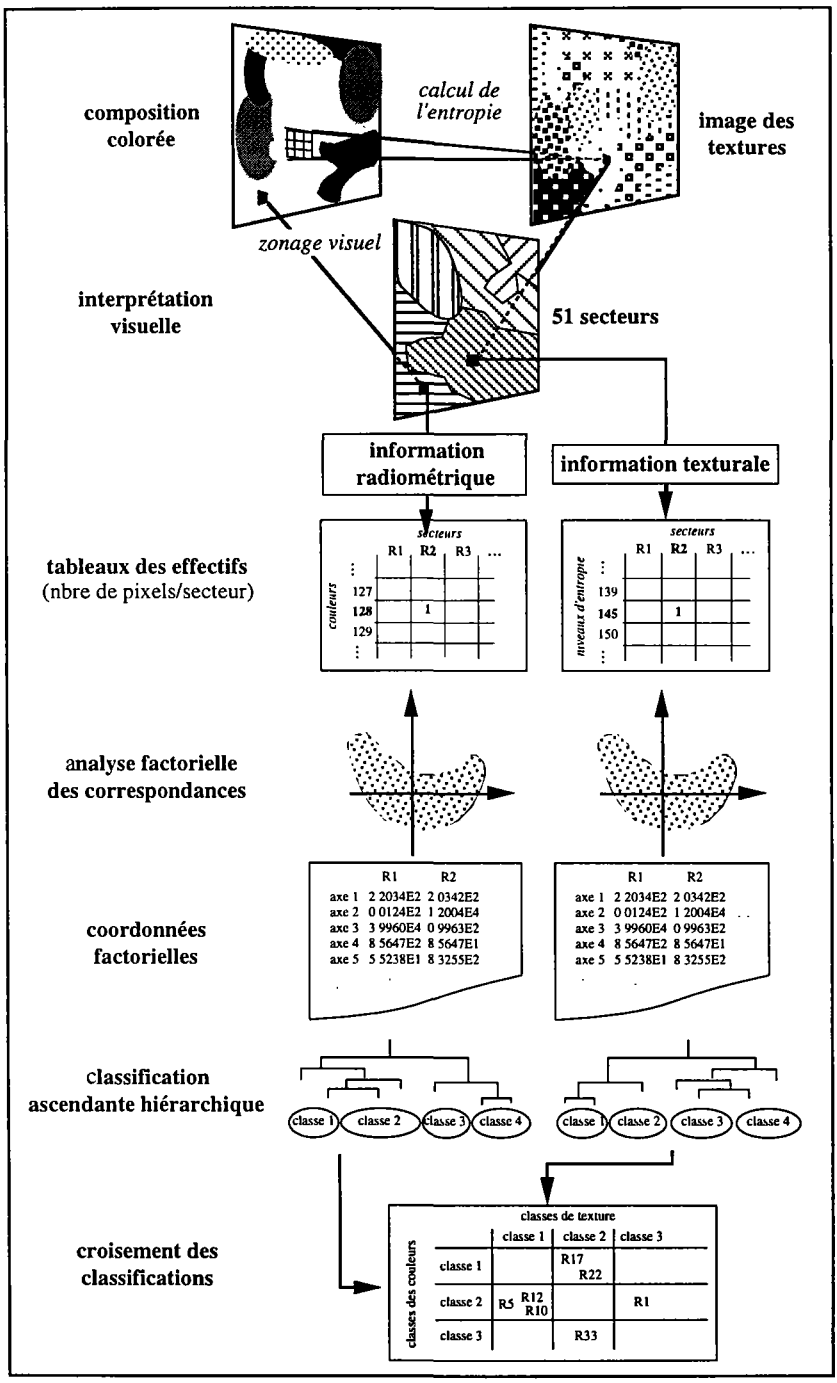


Figure 2. Chaîne de traitements utilisée pour l'élaboration d'une typologie des quartiers d'après la composition colorée : schéma de principe

extrêmes sont déterminées d'après la distribution statistique des effectifs de pixels, établie à partir d'un histogramme des fréquences cumulées. Le réétalement entre les niveaux de gris, correspondant à 1 % (borne minimum) et 99 % (borne maximum) des fréquences cumulées, est apparu comme le meilleur compromis associant finesse du détail, contraste et équilibre des couleurs.

Sur la composition colorée résultante, on a ensuite procédé à un zonage visuel de la région étudiée, selon une méthode de photo-interprétation. On a ainsi délimité les secteurs homogènes, c'est-à-dire dont les caractères de couleurs, d'associations de couleurs, de formes et de texture présentent une continuité. Le zonage partitionne ainsi la totalité du sud-est de l'image en 51 secteurs correspondant au milieu urbain aussi bien qu'aux milieux naturels.

3. Description des secteurs d'image

Nous avons ensuite caractérisé ces secteurs d'image d'après les couleurs présentes sur la composition colorée. La caractérisation par la texture a demandé une étape supplémentaire : la création d'un néo-canal réalisé par le calcul de l'entropie, indicateur choisi pour la mesure de la texture. L'entropie rend compte en effet de l'organisation des couleurs à l'intérieur d'une fenêtre mobile de dimension 3 x 3, balayant la composition colorée; le programme affecte au pixel central de la fenêtre une valeur proportionnelle à l'hétérogénéité du voisinage mesuré (surface uniforme : S = 0; neuf couleurs différentes : S = 252). Nous avons ainsi caractérisé les secteurs d'image d'après leur degré d'homogénéité.

Le volume de l'information à analyser (tableau des couleurs : 51 secteurs x 110 couleurs) nous a conduit à faire appel à des méthodes empruntées à l'analyse des données. Ces méthodes permettent en effet de traiter des tableaux d'effectifs de grande taille, de représenter graphiquement puis d'analyser les principaux caractères de la population étudiée et de réaliser des regroupements d'individus. La démarche, schématisée sur la figure 2, est appliquée aux deux types d'information, couleur et texture, séparément, avant le croisement des résultats finaux. À chaque étape, l'utilisateur peut enrichir ses analyses et ses constatations par l'étude des résultats intermédiaires.

Un programme informatique écrit spécifiquement a permis de construire rapidement les tableaux d'effectifs de pixels caractérisant les secteurs. En résultat de cette première étape, on obtient donc deux tableaux d'effectifs de pixels caractérisant les secteurs directement exploitables par le programme *ancorr* de la bibliothèque SAS-ADDAD.

4. Analyse des caractères de couleur et de texture

Les espaces factoriels, résultant de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) selon les couleurs et de celle selon la texture, présentent des nuages de points cohérents d'interprétation aisée, aussi bien pour le télédétecteur que pour le thématicien.

Sur la figure 3, on résume les résultats issus de l'AFC des couleurs. On remarque la nette opposition des secteurs à couleurs dominantes blanches, au reste de l'image. Ces secteurs correspondent, sur le terrain, aux anciens lacs asséchés dont les sols salins sont dégradés par les activités liées à la création de nouveaux quartiers périphériques (Chimalhuacán). On observe également la mise en évidence des quartiers dont le paysage est composé de

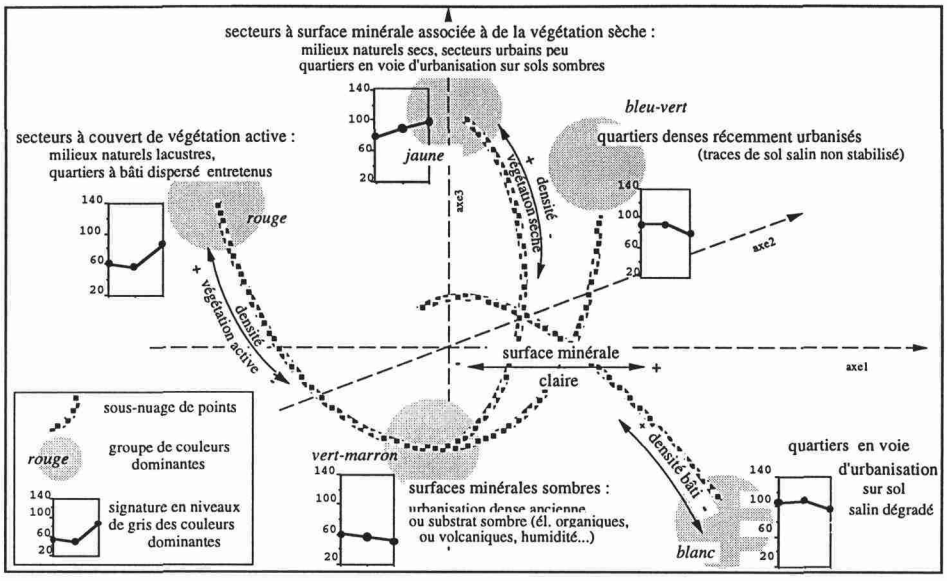


Figure 3. Structures de la composition colorée d'après le critère de la couleur et signification thématique (3 axes factoriels = 76 % de l'information)

végétation à forte activité chlorophyllienne (jardins entretenus de Jardines del Pedregal; dominante rouge). Ils sont très distinguables des secteurs naturels à sol nu ou de ceux densément construits (couleur dominante verte), etc.

La disposition des couleurs dans les plans factoriels reproduit une succession de dégradés correspondant aux divers dosages des couleurs fondamentales et aux dominantes qui caractérisent les différents secteurs de l'image (rouges, verts foncés, bleus clairs, etc.).

Sur la figure 4, on présente les principaux caractères des secteurs d'image décrits selon le critère de la texture. On y observe l'opposition entre secteurs homogènes et hétérogènes, ce qui permet de retrouver en partie l'opposition des quartiers urbanisés aux milieux naturels. On remarque également l'opposition, secondaire, des secteurs à paysage urbain constrasté (quartier pavillonnaire de luxe : grandes maisons individuelles et vastes jardins) aux quartiers que la densité de construction rend plus homogènes (bâti serré, d'architecture et de matériaux très semblables, rareté de la végétation).

On notera qu'on retrouve les mêmes structures d'image avec les AFC calculées à partir des canaux bruts, pour la radiométrie, et de l'écart-type local sur canaux bruts, pour la texture.

5. Classification des secteurs d'image

Les regroupements d'individus, observables dans les espaces factoriels, peuvent être formalisés en classifiant ces individus selon leurs coordonnées factorielles sur l'ensemble des facteurs. La classification ascendante hiérarchique (CAH; programme *cahvor* de SAS-ADDAD) met en évidence la structure arborescente qui lie les individus selon leur degré de parenté. Six classes de couleurs et quatre de texture nous permettent d'approcher deux

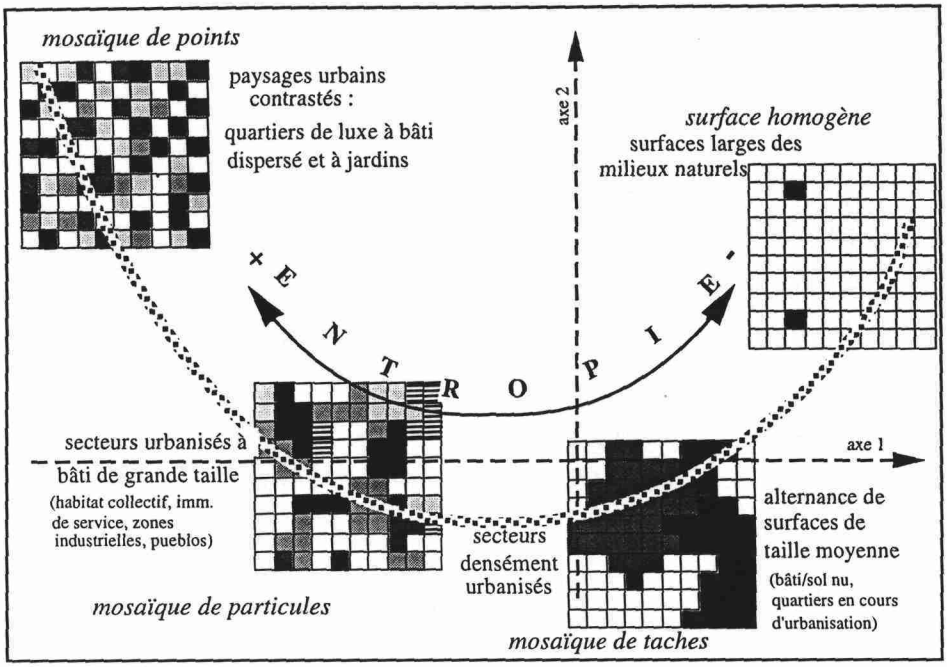


Figure 4. Structures de la composition colorée d'après le critère de la texture et signification thématique (2 axes factoriels = 87 % de l'information)

typologies grossières présentant chacune un aspect particulier. Cependant, les résultats montrent que les deux classifications ne permettent pas, séparément, de discriminer les secteurs naturels des secteurs urbains. Par exemple, la classe des secteurs à couleurs dominantes rouges regroupe aussi bien des parcelles agricoles en culture, que des jardins entretenus. De même, le seul critère de la texture n'est pas suffisant pour séparer les secteurs naturels à paysage localement contrasté des quartiers densément et uniformément urbanisés.

Les deux critères sont en réalité complémentaires et nous avons levé les incertitudes en les associant.

6. Intégration des informations issues des analyses de couleur et de texture

Plusieurs essais ont montré que la méthode la plus simple et la plus efficace consiste à croiser les résultats des deux classifications (6 classes de couleurs et 4 classes de texture). Sur la figure 5, on présente les principales interprétations thématiques des résultats de ce croisement.

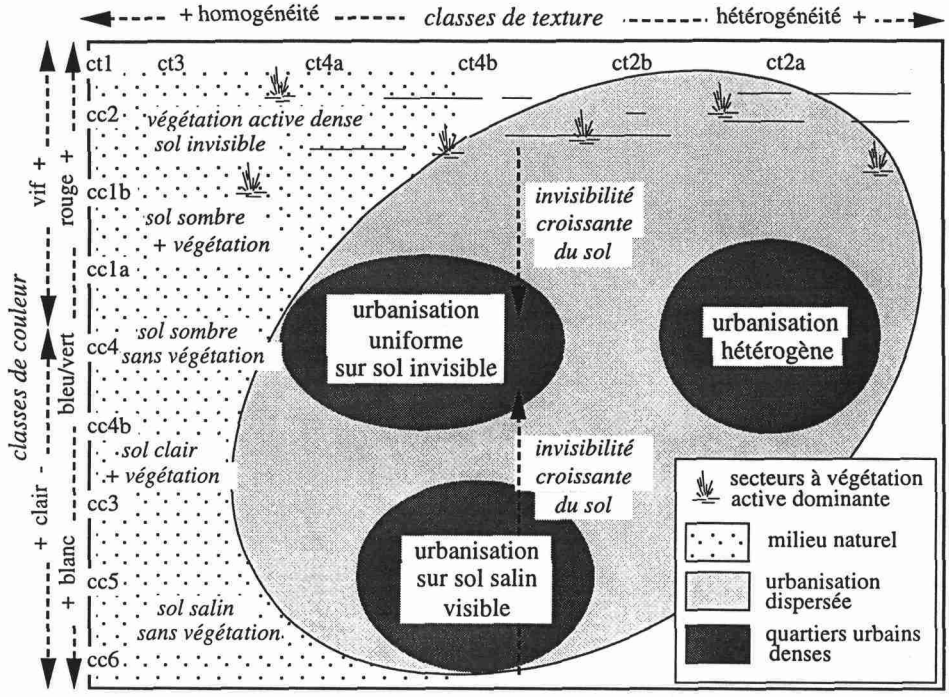


Figure 5. Structures de l'image d'après le croisement des classifications et interprétation géographique

7. Typologie des quartiers

Sur la figure 5, il est possible de reconnaître des secteurs d'image correspondant aux milieux naturels et permettant ainsi leur élimination des tableaux de données pour une étude plus spécifiquement urbaine. Afin d'augmenter la précision de notre analyse des quartiers, la même démarche que ci-dessus (AFC-CAH couleur et texture, puis croisement) a été appliquée pour les 43 secteurs utiles à notre analyse.

Le résultat apparaît sur la figure 6; il met également en relation les différents quartiers avec les principaux caractères d'image (exemple : les « quartiers-jardins » sont caractérisés sur la composition colorée par des rouges dont la distribution spatiale est très hétérogène).

La superposition à ce tableau des informations issues de l'enquête de terrain, permet d'apporter une grande précision sur la nature et les caractéristiques paysagiques des différents quartiers discriminés par l'image. On distingue en particulier :

- les « quartiers-jardins » des résidences de luxe (Jardines del Pedregal), caractérisés par la faible densité de construction qui laissent place à des jardins entretenus : pelouses arrosées et espaces arborés;
- les « quartiers pavillonnaires de type populaire » à forte densité de bâti consolidé, en construction depuis une trentaine d'années; ils sont constitués d'agglomérats de cubes de béton séparés par un interbâti lui-même cimenté ou goudronné, secteurs typiques également

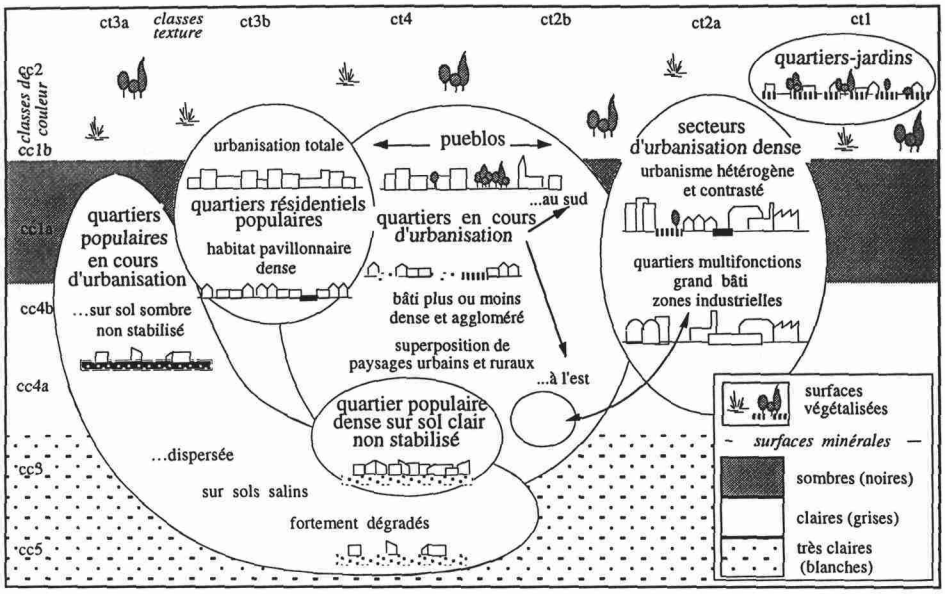


Figure 6. Les grands types de quartiers mis en évidence par croisement des caractères de couleur et de texture (SE de Mexico)

pour la rareté de la végétation (quartiers de Nezahualcóyotl);

• les « quartiers industriels et de services » bien repérables sur l'image pour la grande taille du bâti qui les compose (usines, immeubles, dépôts, infrastructure, etc.), situés au nord (Agricola Pantitlan), à l'est (La Paz) et au sud-est (Tláhuac), privés de végétation, parfois noyés dans des secteurs d'habitations populaires;

• les « quartiers multifonctions » du sud (Tlalpan, Xochimilco) qui concentrent de nombreux types d'urbanisation sur un espace restreint (résidentiel collectif et pavillonnaire, industriel et de service, infrastructures élaborées, noyau urbain ancien, etc.) engendrant des associations locales, des imbrications de paysages dont la variété se retrouve dans les contrastes de l'image;

• les « quartiers en cours d'urbanisation » partiellement construits, mais dont le sol non bâti détermine encore les caractéristiques locales sur l'image (nature, couleur, état, végétation, etc.), secteur aux limites imprécises, à bâti de qualité inégale plus ou moins dispersé (Ajusco, Chimalhuacán, etc.);

• les « quartiers en création » des fronts urbains, notamment de l'est (Chimalhuacán, Chalco), caractérisés par un bâti peu dense et dispersé, souvent précaire et de petite taille; pour ces raisons, ils ne sont qu'indirectement repérables sur l'image, par le biais des conséquences de l'urbanisation sur l'environnement (dégradation du sol, disparition de la végétation).

8. Dynamique urbaine visible sur une seule image

La précision de cette étude permet une première approche du développement urbain en mettant en relation la position des quartiers (fig. 6) avec leur date de construction. On reconstitue alors les transformations qu'ils subissent et qu'ils font subir à l'environnement. Dans notre mode de représentation (fig. 6), les changements sur les données satellitaires se traduisent par leur déplacement dans l'« espace-image » (fig. 7). Par exemple, les quartiers qui s'urbanisent progressivement sur sols salins, suivent un itinéraire courbe correspondant à la dégradation du sol, puis à son occultation progressive par le bâti (flèche en bas à gauche, fig. 7).

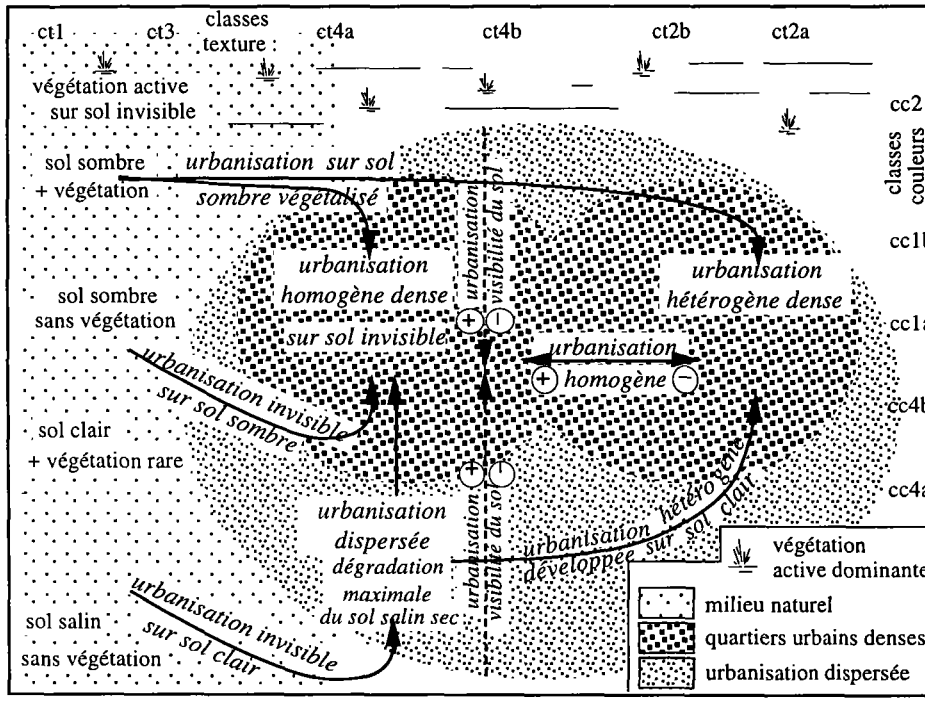


Figure 7. Les mouvements des secteurs urbanisés selon le degré et le type d'urbanisation, en termes de couleur et de texture d'image

9. Conclusion

L'utilisation d'une image panchromatique pourrait améliorer la discrimination des secteurs urbains par la texture tandis que l'étude plus fine des résultats de l'AFC des couleurs permettrait de détailler plus avant les caractéristiques des quartiers représentés sur l'image. Un zonage par découpage systématique ou échantillonnage, plutôt que visuel, est envisageable pour un traitement automatisé de l'information de base.

Nous avons montré qu'une simple composition colorée permet de mener une analyse des composants de l'espace urbain et d'approcher certains aspects de sa dynamique. Son analyse visuelle et l'interprétation des résultats statistiques intermédiaires permettent un enrichissement progressif et donc nourri de l'étude; le va-et-vient constant entre la démarche de photo-interprétation et la démarche systématique favorise le suivi des déformations de l'information liées aux méthodes et leur rééquilibrage mutuel. Cette démarche, basée sur la complémentarité des informations radiométrique et texturale, forme une architecture très intéressante pour les études de géographie. Les résultats ainsi obtenus sont corroborés par une enquête de terrain basée sur la description systématique des paysages urbains; la classification des paysages est en effet superposable au croisement des classifications d'image présenté ci-dessus.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 35-45

4

Cartographie des modes d'utilisation du sol à Conakry (Guinée) par intégration de données multisources

EMMANUELLE RENARD, YVES BAUDOUIN et
PRITA POUROUCHOTTAMIN

Université du Québec à Montréal, Département de géographie, C.P. 8888, succursale Centre-ville, Montréal, Québec, Canada H3C 3P8; téléphone : +1 (514) 987-4131; télécopieur : +1 (514) 987 6784

Résumé

Tenant compte des développements impressionnants dans plusieurs grandes agglomérations urbaines du continent africain, divers besoins en aménagement et en planification se font sentir. Afin de répondre à cette pression urbaine, la consultation de documents cartographiques à jour et pertinents s'avère vitale. Malheureusement, les technologies et méthodologies utilisées par les pays industrialisés se transposent mal aux pays en voie de développement (PVD). Ainsi, nous avons tenté d'adapter aux PVD une méthode développée antérieurement pour les pays industrialisés. La ville retenue pour cette étude est Conakry, capitale de la Guinée. À partir d'un système de taxonomie modulé selon le contexte, nous avons produit une carte d'utilisation du sol à l'aide d'images HRV de SPOT avec un taux de réussite de 89,2 %. Les principales sources d'erreur découlent du fait que certaines fonctions possèdent des caractéristiques radiométriques et géométriques similaires (extraction et activité mixte; grand équipement éducatif et collectif; activité mixte et industrie de transformation) et que rien ne permet de les nuancer, si ce n'est une vérification terrain (matériaux identiques, dimension et contexte similaires). Nous croyons que certains développements méthodologiques liés à l'utilisation de photographies aériennes numériques et à la reconnaissance de formes pourraient être d'un grand secours.

1. Introduction

1.1. Contexte de la recherche

Population, ou bombe « P », explosion démographique ou bombe « D », les métaphores pyrotechniques ne manquent pas pour évoquer la population du monde en cette fin de 20e siècle. Cet essor mondial de la population se caractérise par une progression spectaculaire des milieux urbains : en 1950, 30 % de la population mondiale vivait dans les villes et, en 2025, elle en représentera 65 %. En 1950, il existait sept agglomérations de plus de cinq millions d'habitants, aujourd'hui nous en retrouvons 35 et, dans 25 ans, 60 de plus (RAMADE, 1991). La pression démographique et l'extension urbaine nous montrent l'importance de gérer, d'aménager et de planifier notre territoire. Pour cela, la consultation de documents cartographiques à jour et pertinents s'avère vitale.

1.2. Objectifs généraux et spécifiques

Afin de répondre aux besoins des acteurs de l'urbanisation, nos objectifs étaient doubles. Le premier, de nature appliqué, consistait à cartographier, au 1: 50 000, les modes d'utilisation du sol d'un milieu urbain africain à partir des données fournies par la télédétection satellitaire, avec une nomenclature comprenant 14 fonctions urbaines distinctes. Le deuxième, plus théorique, consistait à adapter une méthode développée antérieurement pour un milieu nord-américain (BAUDOUIN, 1992) au contexte africain. Cette méthode reposait sur la notion d'objet et la prise en compte d'informations contextuelles. Devant la densité, l'hétérogénéité et le caractère désorganisé des villes des PVD, il s'avérait impératif d'adapter certains éléments de la méthode.

2. Problématique

2.1. Crise de l'information en Afrique

Nous pouvons identifier trois problèmes relatifs aux documents cartographiques existant en Afrique. En premier lieu, nous constatons une pénurie de cartes de base. À titre de comparaison, au Canada il se dépense annuellement 50,00 $ en moyenne par habitant en matière de cartographie, alors que pour les PVD, un montant de 0,50 $ par habitant est déjà énorme (DALE and McLAUGHLIN, 1988). En second lieu, les documents existants sont le plus souvent périmés. Ils sont souvent inaccessibles et constitués de toponymes et de légendes hétérogènes. La multiplicité des firmes ou des organismes nationaux ou internationaux rend difficile le rassemblement et l'uniformité des données (RENARD, 1994). La plupart des documents existants sont donc inutilisables dans un cadre d'aménagement et de planification considérant les échelles, les thèmes abordés ainsi que les dates de mise à jour (BAUDOUIN *et al.*, 1994).

2.2. Un transfert de technologie difficile

Au niveau de la production de documents cartographiques, les méthodes employées par les PVD restent « traditionnelles » (interprétation manuelle de photographies aériennes) et ne peuvent suivre le rythme de l'urbanisation. Les technologies et les méthodologies développées par les pays industrialisés sont intéressantes, mais restent mal adaptées aux contextes culturels, économiques et techniques des PVD. Elles se traduisent souvent par une sélection erronée de l'unité spatiale de traitement, un système de nomenclature « non adapté » et une échelle cartographique sans usage réel (1: 100 000 et plus).

3. État de la question

3.1. Télédétection et milieu urbain

Les méthodes conventionnelles de traitement numérique des données satellitaires, développées pour des images de faible résolution spatiale (80 x 80 m), considèrent rarement des paramètres autres que la valeur spectrale. L'image est traitée globalement et les entités générées ne permettent pas d'identifier les fonctions urbaines de manière précise. La transposition de ces méthodes aux images HRV de SPOT se heurte à un pixel de plus en plus fin et aux exigences des utilisateurs, qui recherchent des échelles de travail de plus en plus fines et des systèmes de nomenclature de plus en plus précis. Par exemple, les nomenclatures des travaux de HIRSCH *et al.* (1988), de NADASDI *et al.* (1988) ou de CHARBONNEAU *et al.* (1986) présentent de faibles marges d'erreur. Par contre, le nombre restreint de taxons ainsi que la nature de ces derniers font en sorte que ces systèmes de taxonomie sont inutiles en matière d'aménagement. Il faut « sortir le pixel de son ghetto radiométrique » et ne plus le considérer d'une façon isolée de ses voisins. Plusieurs auteurs suggèrent une méthodologie reposant sur la notion d'unité-objet et de « contenu-contenant », qui permet de prendre en compte le contexte environnant (NAGAO and MATSUYAMA, 1980; ESTES, 1983; NADASDI *et al.*, 1988; BAUDOUIN, 1992).

3.2. Travaux antérieurs

Nous avions développé antérieurement une méthodologie d'inventaire des modes d'utilisation du sol en milieu nord-américain (BAUDOUIN, 1992). Celle-ci utilisait l'îlot urbain comme unité fondamentale de traitement. Le réseau routier transposé sous forme numérique permettait d'extraire les paramètres radiométriques et géométriques des îlots. L'objet était ainsi composé de deux éléments, soit sa délimitation (contenant) qui provenait de la transposition vectorielle des îlots et l'intérieur (contenu) qui correspondait aux pixels des images associées. À partir de quatre paramètres extraits de chacun des îlots (valeur spectrale moyenne, cœfficient de variation, superficie et cœfficient d'élongation), une clef d'identification servant à l'étiquetage était validée grâce à une base de connaissances. La méthode donna des résultats valables mais ne pouvait convenir aux PVD. Par exemple, l'îlot urbain ne correspond pas aux réalités de ces pays, la densité de l'espace construit est plus élevée, ou encore les fonctions urbaines comportent une apparence différente.

4. Terrain d'étude

4.1. Conakry

La ville retenue pour cette étude est Conakry, capitale de la Guinée (extrême ouest africain, à 10° de latitude). Ville portuaire créée en 1889, Conakry est de loin la ville la plus importante du pays et comptait 4 000 habitants au début du siècle (SURET-CANALE, 1982). En 1990 la population était estimée à 1 300 000. Aujourd'hui, la ville s'étend sur plus de 72 km^2 (PNUD, 1988). Elle concentre la majeure partie des fonctions économiques et contient 60 % des grandes entreprises et la totalité des PME du pays. Avec une croissance moyenne de 8 % par an, elle a absorbé plus du quart de l'exode rural. Elle est constituée à plus de 84 % d'habitat, dont 45 % d'habitat spontané et précaire (CHAUME et CHAMPAUD, 1992).

4.2. Données utilisées

Nous avons utilisé les données suivantes : cartes topographiques au 1: 50 000 et au 1: 200 000 (IGN, 1941 et 1956), cartes thématiques du Plan de développement urbain de Conakry, comportant entre autres un schéma de croissance spatiale et de structure urbaine (BERGER, 1988), une carte-mosaïque redressée d'après une couverture aérienne verticale de 1977-1979 au 1: 50 000, une couverture aérienne au 1: 14 500 de 1981 en mode panchromatique ainsi que deux images satellitaires HRV de SPOT :

- panchromatique (P), K/J 030 330/7, niveau 1B, 9 février 1993 (fig. 1);
- multibande (XS), K/J 030 330/7, niveau 1B, 19 mars 1990 (fig. 4-2, voir cahier couleur).

Tenant compte du contexte climatique (inversion thermique, présence des mangroves), il a été relativement difficile d'obtenir des images exemptes de nuages. Par contre, celle en mode multibande est d'excellente qualité, l'influence atmosphérique étant à son minimum.

5. Méthodologie

5.1. Ajustements effectués à la méthodologie

Tel que mentionné, l'îlot était utilisé comme unité-objet dans le cadre de l'application précédente. Dans le cas de Conakry, il s'avère intéressant de fonctionner avec plusieurs unités-objets étant donné que les découpages administratifs transposent partiellement la structure de l'habitat. À l'aide du schéma de structure et de la réalité de terrain, nous décomposons la ville par emboîtement hiérarchisé (de plus en plus fin), soit par préfecture, sous-préfecture, quartier, cité, îlot, selon les difficultés d'identification. Les paramètres de la clef d'interprétation ont été adaptés au contexte des PVD (tab. 1).

5.2. Méthodologie appliquée

5.2.1 Extraction d'une sous-image

La partie sud-ouest de la péninsule fut extraite; elle couvre environ 40 % de la superficie totale de Conakry et comporte tous les éléments de la nomenclature choisie.

Figure 1. Image HRV (P) de SPOT du 9 février 1993 de Conakry

5.2.2. Prétraitements et classifications conventionnelles

Les données présentées ont été traitées avec les logiciels Easi/Pace, Idrisi, Atlas/GIS et Photoshop. Dans un premier temps, nous avons corrigé géométriquement (image à image avec 18 points de contrôle) les sous-images à l'aide d'une carte topographique balayée (1: 50 000, format RLC, 300 points/pouce). Une polynomiale du premier degré était suffisante pour cette correction. La qualité visuelle des images faisait en sorte qu'une correction radiométrique n'était pas nécessaire. Puis, nous avons appliqué différentes classifications conventionnelles dirigées et non dirigées. Ces dernières laissaient entrevoir

Tableau 1. Clef d'interprétation des taxons

A. Prédominance de l'habitat

	Habitat					Zone récréative
	Bon standing	Moyen standing	Restructuré	Spontané	Front urbain	
Superficie (en pixels)	Inf. à 1 000	De 1 000 à 4 000	–	De 4 000 à 9 000	Sup. à 9 000	DQ
Élongation[1]	Grande	DQ	Moyenne	Moyenne	Petite	Grande
Distance du centre-ville[2]	Inf. à 10	Inf. à 7	De 9 à 11	Plus de 12	Plus de 17,5	–
Proximité de la mer	Inf. à 120 m	Plus de 120 m	–	–	–	DQ
Pente du terrain[1]	Faible	Faible	Moyen	DQ	Moyenne	–
Valeur spectrale moyenne[3]	73/65/49	7/69/47	74/72/49	72/69/63	67/59/63	66/57/56
Écart-type[3]	4/7/3,5	05-07-2004	2,2/3,7/2	5,1/7,6/3,3	3/6/7,7	1,4/2,6/6
Variabilité spectrale[1]	Forte	Moyenne	Forte	DQ	Forte	Faible
Indice de végétation[1]	Fort	Moyen	Nul	Moyen	Fort	Fort
Quartiers types	Belle-vue	Tombo 3	Matam	Ratoma	Sonfonia	Talweg 1

B. Prédominance d'activités

	Industrie			Grands équipements		Espaces vacants
	Transformation	Extraction	Traditionelle	Enseignement	Collectif	
Superficie (en pixels)	DQ	Sup. à 10 000	DQ	DQ	DQ	DQ
Élongation[1]	Grande	Moyenne	Grande	Grande	Petite	DQ
Distance du centre-ville[2]	DQ	Pus de 13	DQ	Moins de 12	DQ	Plus de 17,5
Proximité de la mer	–	Sup. à 120 m	Inf. à 120 m	–	–	–
Pente du terrain[1]	–	Moyenne	–	Faible	Faible	–
Valeur spectrale moy.[3]	73/72/50	70/69/54	75/72/48	73/66/51	75/69/47	67/59/63
Écart-type[3]	03-05-2004	2,8/5,7/2,6	3/4/2,7	5,3/7,5/4,3	3/4,4/3	3/6/7,7
Variabilité spectrale[1]	Forte	Faible	Forte	Forte	DQ	–
Indice de végétation[1]	Faible	Nul	Moyen	Fort	Fort	–
Quartiers types	Matam 2	Dar es salem	Bonfi	Camayenne	Dixinn	Sonfonia

1 Non quantifié.
2 Distance calculée à partir du carrefour central de Tombo et parallèlement à la route du Niger.
3 Respectivement pour XS1, XS2 et XS3.
DQ Dépend des quartiers.
– Variable non significative pour le taxon.

des résultats très différents selon les secteurs traités. Cette constatation s'applique aussi aux différents filtres appliqués.

5.2.3. Méthode spécifique

La méthode fonctionne donc à partir d'unités-objets multiples. Pour chaque objet, il y a une modulation de la méthode ou de l'image. Dans un premier temps, nous avons subdivisé la ville sur une base administrative de quartiers. À l'aide de huit quartiers pilotes, identifiés lors d'une campagne de terrain, des règles de décision ont été établies. La clef d'interprétation permet de définir le nombre probable de taxons rencontrés dans une unité de base. Pour chaque type de quartier, nous avons extrait des caractéristiques basées sur sa géométrie, sa radiométrie mais aussi sur son contexte environnant (tab. 1). Par exemple, nous constatons qu'il existe de grandes différences liées à la morphologie urbaine et aux stades de développement urbain (fig. 3). Les quartiers anciens sont constitués d'une trame orthogonale serrée. Le développement anarchique est sans trame apparente (exemple des quartiers de Tombo, stade d'urbanisation de 1890 à 1900 et de Dar Es Salem, stade d'urbanisation de 1950 à 1960). Pour les stades d'urbanisation intermédiaire, on observe un étagement de trames orthogonales de plus en plus lâche à une absence totale de trame. Nous avons donc pu intégrer le paramètre de « morphologie urbaine » pour certains quartiers, sous forme de « distance linéaire au centre-ville ». La nomenclature utilisée comporte 14 éléments (sans les classes d'habitats et d'activités mixtes), uniquement relatifs à notre problématique. De plus, cette nomenclature est réalisée en fonction de celles employées par le ministère de l'Urbanisme et de l'Habitat de Conakry. Elle correspond donc à la réalité urbaine de Conakry tout en étant adéquate aux besoins des urbanistes. En fonction du nombre de taxons probables, différentes règles de décision sont adoptées (tab. 2). Par exemple, si le quartier présente de quatre à six taxons, un filtre passe-haut de Ford est appliqué, puis une classification dirigée. Si le nombre de taxons est supérieur à dix, une nouvelle segmentation est effectuée. Il s'agit d'utiliser pour chaque quartier les images comportant les paramètres aptes à prendre les empreintes de l'objet considéré et d'appliquer la méthode de classification propre aux caractéristiques associées.

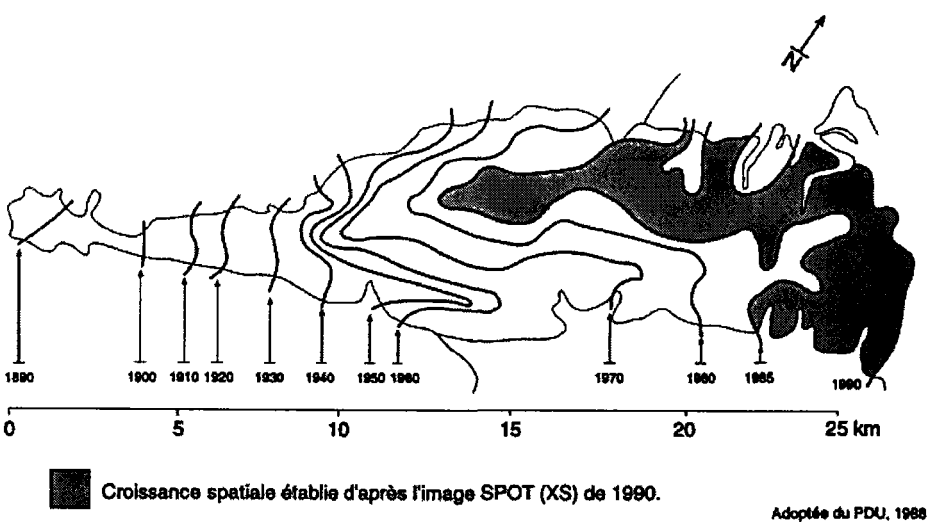


Figure 3. Croissance spatiale de Conakry de 1890 à 1990

Tableau 2. Règles de décision pour la classification des quartiers

Nombre de taxons	Règle de décision
1	Étiquetage direct
2 à 3	Rehaussement; filtrage; classification non dirigée par distance minimum
4 à 6	Rehaussement; filtre passe-haut; classification dirigée par maximum de vraissemblance
7 à 9	Rehaussement; filtre de Ford; modification des médiums; classification manuelle
Plus de 10	Resegmentation plus fine; règles de décision ci-haut mentionnées

5.3. Analyse et discussion des résultats

La carte d'utilisation du sol permet d'avoir une vue d'ensemble, d'identifier les principaux modes d'utilisation du sol ainsi que leur répartition en fonction du nombre de taxons considérés (fig. 4-4, voir cahier couleur). Enfin, lors de la campagne de terrain, nous avons identifié des sites-témoin servant à la validation des résultats. Cette carte comporte un taux de réussite global de 89,2 %. Nous retrouvons de façon plus détaillée une matrice de confusion (tab. 3) présentant les résultats de cette classification pour chacun des taxons. Ainsi, certains de ceux-ci liés à l'habitat (« bon standing », « moyen standing »), aux infrastructures (communication, récréativité) furent classifiés adéquatement. Par contre, ceux de l'industrie (transformation et surtout extraction) et des grands équipements (éducatif et collectif) connurent des résultats plus faibles, car l'apparence physique n'était pas toujours évocatrice de l'usage. Les principales sources d'erreur découlent du fait que certaines fonctions possèdent des caractéristiques radiométriques et géométriques similaires (extraction et activité mixte; grand équipement éducatif et collectif; activité mixte et industrie de transformation) et que rien ne permet de les nuancer, si ce n'est une vérification sur le terrain (matériaux identiques, dimension et contexte similaire). Aussi, les matériaux utilisés pour le revêtement extérieur (toit de tôle) ont saturé les valeurs des pixels des objets concernés (habitats restructuré et spontané). Considérant la taille de certains objets ainsi que de l'erreur inhérente liée à la correction géométrique, certains pixels situés à l'extérieur (de l'objet) ont été traités comme élément du contenu (ce qui n'était pas le cas). De plus, l'usage « mixte » (très fréquent en PVD) introduisait des difficultés d'interprétation; par exemple, sur un espace réduit, nous pouvions rencontrer plus de cinq fonctions juxtaposées. De façon plus générale, nous avons été en mesure de constater que l'urbanisation poursuit un cheminement linéaire, connaissant toutefois un élargissement vers le nord, où le développement anarchique (habitat spontané) et les activités mixtes ne cessent de croître. Cette configuration n'a d'autre effet que de créer un engorgement important vers le centre-ville (partie ouest) ainsi que des lacunes importantes en termes d'hygiène.

Les résultats ainsi obtenus permettent de constater que le taux de réussite global dépasse celui suggéré par ANDERSON *et al.* (1976) qui est de 85 % et plus. Par contre, ce même taux doit aussi se retrouver à chacun des taxons, ce qui n'a pas été le cas pour les raisons invoquées antérieurement. Afin de comparer nos résultats à d'autres travaux, il faut, dans un premier temps, considérer que certains éléments varient d'une étude à l'autre (nombre et type de taxons, milieu traité, thématique abordée, échelle cartographique, images utilisées, etc.). Dans le cas de l'étude de LEMEN et POUYLLAU (1989) portant sur la

Tableau 3. Matrice de confusion des résultats de la classification

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Total	Erreurs d'omission
Habitat															
1. Bon standing	2239	134	33	15	19	1	5	11	7	9	5	5	7	2490	10,08
2. Moyen standing	76	2374	16	11	27	5	9	5	3	5	9	3	3	2546	6,76
3. Restructuré	31	46	1435	95	59	21	11	15	25	16	4	15	5	1778	19,29
4. Spontané	7	27	101	1528	43	9	3	8	17	15	14	27	3	1802	15,21
Activité															
5. Mixte	9	1	17	1	3056	4	87	15	33	71	23	42	14	3373	9,40
6. Traditionnelle	3	9	35	4	34	714	21	21	14	56	21	21	7	960	25,63
Industries															
7. Transformation	3	2	7	0	73	13	847	38	8	79	9	17	0	1096	22,72
8. Extraction	5	1	3	5	30	27	15	421	14	39	7	3	0	570	26,14
Grands équipements															
9. Educatif	5	7	8	4	24	16	14	9	712	114	17	9	7	946	24,74
10. Collectif	2	3	1	7	51	3	8	24	3	2346	8	16	6	2478	5,33
Infrastructures															
11. Communication	8	13	3	3	26	19	27	16	8	12	2836	17	8	2996	5,34
12. Récréativité	17	5	7	43	58	6	10	19	27	19	49	4315	18	4593	6,05
Autres															
13. Milieu naturel	9	3	5	27	13	5	6	20	23	5	31	47	1796	1990	9,75
Total	2414	2625	1671	1743	3513	843	1063	622	894	2786	3033	4537	1874	27618	
Erreurs de com.	7,25	9,56	14,12	12,34	13,01	15,30	20,32	32,32	20,36	15,79	6,50	4,89	4,16		10,86

confection d'une carte d'occupation du sol dans les Llanos au Venezuela, ceux-ci atteignirent un taux de réussite global de 70 % et ce avec 11 taxons. Dans une autre étude de LEMEN et JAMET (1991) portant sur un territoire français, l'erreur globale atteint 10 % (avec sept taxons). Dans une application sur la ville de Quito, DUCHEMIN et LORTIC (1990) utilisèrent la notion de « contenu-contenant » mais ne présentèrent pas de résultats précis. JENSEN (1986) obtint 93,8 % de pixels bien classifiés dans le cas de la ville de Charleston (É.-U.) et ce avec cinq taxons. CHARBONNEAU *et al.* (1985) retrouvèrent un score de 89,9 % avec 11 taxons (ville de Sherbrooke, Canada). Ces différents résultats laissent entendre que l'identification de l'occupation du sol en PVD à l'aide d'images satellitaires est plus complexe qu'en pays industrialisés du fait que la plupart des fonctions (en PVD) ne présentent pas de caractéristiques physiques propres. De plus, le type de système taxonomique peut grandement influencer les résultats d'une classification. Ainsi, une application portant sur une identification fine du construit en milieu urbain (niveau III de ANDERSON *et al.*, 1976) sera d'autant plus difficile à réaliser en PVD car la mixité du milieu rendra l'interprétation ardue.

6. Conclusion et futur développement

Cette méthode nécessite une connaissance intime du milieu et une véritable panoplie de données. Pour mieux décrire ces milieux urbains, il est dorénavant inévitable d'utiliser et d'intégrer conjointement diverses sources d'informations. Nous devons constater aussi que le milieu urbain en PVD possède des caractéristiques (logique de développement, apparence physique des objets) difficiles à cerner. Il serait certainement valable d'utiliser des photographies aériennes (sous une forme numérique) afin de dégager des paramètres supplémentaires (par exemple reconnaissance de forme). Cette source d'information introduira un autre niveau de difficulté quant à l'hétérogénéité du milieu, mais elle permettra de dégager les éléments nécessaires à la distinction d'une utilisation mixte du territoire. De plus, l'établissement d'une correspondance avec le milieu physique permettra sans doute d'identifier plus facilement certaines fonctions. Les derniers travaux de POUROUCHOTTAMIN (1995), portant sur l'influence du relief dans l'utilisation du sol à Conakry, laissent entrevoir qu'il serait peut-être plus adéquat de localiser l'habitat spontané lorsque celui-ci est corrélé avec la topographie du site traité. Ainsi, chacun des taxons pourrait se voir jumeler certaines informations complémentaires qui ne pourraient que faciliter l'identification des fonctions.

7. Références

ANDERSON, J. R., 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. Geological Survey Professionnal Paper 964, US Goverment Printing Office, Washington, DC.

BAUDOUIN, Y. 1992. Développement d'un système d'analyse d'images satellites pour la cartographie de l'occupation du sol en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université de Montréal, 265 p.

BAUDOUIN, Y., DESJARDINS, R. et RENARD, E. 1994. Système d'inventaire et mise à jour de cartes d'utilisation et d'occupation du sol en pays en voie de développement à l'aide d'images satellites et d'informations contextuelles. Actes de la Sixième conférence canadienne sur les systèmes d'informations géographiques, Ottawa, vol. 1, p. 800 -811.

BERGER, L. 1988. Plan de développement urbain de Conakry. PDU/ Banque mondiale, BCEOM-GROUPE HUIT, Genève, 30 p.

CHARBONNEAU, L., MORIN, D. et ROYER, A. 1986. Interprétation et analyse de l'évolution du paysage urbain de l'agglomération de Montréal, Canada, à l'aide de données Landsat. Photo-interprétation, n° 86-5, p. 1-11.

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

CHAUME, R. et CHAMPAUD, J. 1992. Croissance urbaine, environnement et imagerie satellitaire. Convention CEE/ORSTOM 946/1990-24, rapport d'étape, Montpellier, 192 p.

DALE, P.F. and McLAUGHLIN, J.D. 1988. Land information management: An introduction with special reference to cadastral problems in Third World countries. Clarendon Press, 266 p.

DUCHEMIN, J.-P. et LORTIC, B. 1990. La transformation rapide des espaces urbains : identification et suivi cartographique sur image SPOT, Quito et Marne-la-Vallée. Villes et citadins du Tiers-Monde, cahier n° 4, ORSTOM, p. 57-68.

ESTES, J. E. 1983. Monitoring land use and land cover changes. Remote Sensing for Ressource Management, p. 100-110.

HIRSCH, J., SERRADJ. A. et RIMBERT, S. 1988. La télédétection, un outil supplémentaire au service des études urbaines : une application sur Strasbourg. Les cahiers de l'urbanisme, Paris, n° 4, p. 29-33.

JENSEN, J. R. 1986. Introductory digital image processing : a remote sensing perspective. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 379 p.

LEMEN, H. et JAMET, O. 1991. Interprétation automatique de l'occupation du sol sur image SPOT. Symposium international de cartographie thématique dérivée des images satellitaires, bulletin 127-128, p. 83-93.

LEMEN, H. et POUYLLAU M. 1989. Mise à jour d'une carte d'occupation du sol : problèmes méthodologiques. Télédétection et Tiers monde, actes de la table ronde internationale CNRS, Bordeaux-Talence, p. 327-340.

NADASDI, I. BINARD, M. et DONNAY, J-P. 1988. Une carte pilote de l'affectation du sol à Liège et des produits dérivés issus des traitements satellitaires SPOT. Les cahiers de l'urbanisme, Paris, n° 4, p. 51-60.

NAGAO, M. and MATSUYAMA, T. 1980. A structural analysis of complex aerial photographs. Plenum Press, New York and London, 201 p.

PNUD. 1988. Étude socio-économique régionale, bilan, diagnostic, au niveau des préfectures. Programme des Nations unies pour le développement, projet PNUD/DTCD GUI/84/007, p. 274-334.

POUROUCHOTTAMIN, P. 1995. L'influence du relief dans l'utilisation du sol à Conakry, République de Guinée. Activité de synthèse, Département de géographie, Université du Québec à Montréal, 24 p.

RAMADE, F. 1991. Population, cette bombe qui menace la planète. GÉO, n° 152, p. 172 -181.

RENARD, E. 1994. Méthodologie appliquée : imagerie satellitaire et milieu urbain. Étude de Conakry, République de Guinée. Mémoire de maîtrise, Université d'Aix-Marseille I, 147 p.

SURET-CANALE, J. 1982. Conakry, capitale de la République de Guinée. Processus d'urbanisation en Afrique, sous la direction de Coquery-Vidrovitch C. L'Harmattan coll. Paris, villes et entreprises, tome 2, p. 93-103.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 47-64

5

Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide des indices de végétation dérivés des données de hautes résolutions spatiale et spectrale

ABDERRAZAK BANNARI, DENIS MORIN et DONG-CHEN HE

Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada, J1K 2R1; téléphone : +1 (819) 821-7180; télécopieur : +1 (819) 821-7944; CÉ : abannari@spar.ca

Résumé

L'objectif de la présente étude est de faire une mise au point sur l'indice de végétation « idéal » pour caractériser l'environnement végétal urbain. Dans la littérature, il existe une quarantaine d'indices de végétation qui ont été développés pour différentes applications et dans des conditions bien particulières, mais qui peuvent être incompatibles avec le milieu urbain. Seuls les indices conçus dans le but de minimiser les effets perturbateurs et de mieux rehausser le signal issu de la végétation ont été retenus. Pour chacun des indices, les variations causées par les propriétés optiques des sols nus (couleur et brillance) et leur efficacité dans la description précise du couvert végétal pour différents taux de couverture ont été analysées. À cette fin, nous avons exploité une image aéroportée du capteur MEIS-II (*Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner*) du Centre canadien de télédétection (CCT), enregistrée en août 1990 au-dessus de l'île de Montréal (Québec), avec une résolution spatiale de 7 m et une résolution spectrale de 30 nm. Afin de corriger les effets atmosphériques qui interfèrent lors de l'acquisition de l'image, l'épaisseur optique des aérosols a été mesurée au sol à 550 nm. Ainsi, les anomalies relatives au capteur et à la géométrie ont été corrigées. Les résultats obtenus montrent, qu'en général, les hautes résolutions spatiale et spectrale du capteur MEIS-II minimisent remarquablement l'effet

des propriétés optiques des sols sur les indices de végétation en milieu urbain par rapport aux résolutions spatiale et spectrale moyennes du capteur TM de Landsat. En plus de sa résistance aux propriétés optiques des sols nus, l'indice TSARVI caractérise mieux l'environnement urbain à végétation éparse indépendamment des résolutions spatiale et spectrale du capteur.

1. Introduction

Dans les programmes de recherche sur les changements à l'échelle du globe, les indices de végétation dérivés des données de télédétection constituent une information de base précieuse pour la gestion de l'environnement végétal. Ces programmes ne peuvent exclure de leur champ d'intérêt l'étude de l'environnement végétal urbain qui est sensible aux changements continus à cause des activités humaines. L'indice de végétation s'avère un paramètre indicatif de la qualité de vie urbaine; il constitue un indicateur de l'état de l'environnement et une source d'information potentielle originale et utile aux urbanistes et aux aménageurs responsables de la protection des milieux naturels.

L'Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'Île de France (IAURIF) est l'une des rares institutions qui s'intéresse à la télédétection satellitaire et aux indices de végétation pour étudier la végétation urbaine (IAURIF, 1986). Dans l'optique d'établir un « cadastre vert » sur la ville de Paris, l'IAURIF découvre, dans l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), un outil efficace et peu coûteux comparativement aux méthodes traditionnelles de gestion et d'évaluation des couverts végétaux urbains. FORSTER (1983) est l'un des pionniers de l'utilisation des données de télédétection spatiale pour déterminer les caractéristiques socio-économiques des quartiers urbains. En utilisant des données issues du capteur MSS de Landsat sur la ville de Sydney, en Australie, il définit un indice de qualité résidentielle basé sur le pourcentage de végétation déterminé à partir d'un indice de végétation de type rapport : RVI (*Ratio Vegetation Index*). En France, sur la ville de Strasbourg, le RVI donne satisfaction pour séparer le domaine urbain construit du domaine végétal (CNES, 1982). Dans le même sens, NICOLOYANNI (1990) utilise l'indice PVI (*Perpendicular Vegetation Index*) comme information de base pour une analyse diachronique sur l'agglomération urbaine d'Athènes, en Grèce. D'après lui, cette méthode permet la mise à jour de surfaces de changement de façon très précise. Selon COLLET et ABEDNEGO (1987), cet indice caractérise bien la végétation de faible densité en milieu urbain. L'intégration de cet indice dans un système d'information géographique (SIG) ouvre la porte à des études détaillées et riches en milieu urbain. Calculé à partir des données AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), le PVI montre une bonne corrélation entre les îlots de chaleur en milieu urbain et la densité du couvert végétal (GALLO *et al.*,1993). Le TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*) sert à cartographier la qualité phytosanitaire des espaces naturels en milieu urbain et présente une bonne corrélation avec les températures de surface (CHARBONNEAU *et al.*, 1991). Pour une atmosphère urbaine où la taille des aérosols est moyenne ou petite, le ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*), caractérisé par une bonne résistance aux effets atmosphériques, pourra offrir de bons résultats dans le milieu urbain (KAUFMAN and TANRÉ, 1992).

Les rares travaux dans la littérature sur l'utilisation des indices de végétation en milieu urbain nous réfèrent seulement à cinq indices : NDVI, RVI, PVI, TSAVI et ARVI. Aucun de ces travaux ne considérait les avantages ou les désavantages de l'utilisation de l'un ou

l'autre de ces indices. Ces derniers ont été développés pour différentes applications et dans des conditions bien particulières, lesquelles peuvent être incompatibles avec le milieu urbain. Toutefois, le choix d'un indice donné pour caractériser l'environnement de ce milieu est assez délicat. Dans les zones urbaines à couvert végétal épars, un espace vert n'est pas une entité en soi, mais bien un mélange à proportions variables de zones herbacées, boisées, de sols nus, d'espaces construits, de voies de communication, etc. La réponse spectrale du couvert végétal est donc automatiquement altérée par la présence de ces facteurs contradictoires. Un des problèmes majeurs en milieu urbain est la présence de surfaces minérales et de matériaux de construction. En effet, ces éléments ont des signatures spectrales très proches. Par exemple, la réflectance d'une toiture de maison dépend de sa couleur, de sa brillance, de son âge, de son orientation, de son inclinaison, etc. (fig. 1). Par conséquent, un même matériau peut connaître d'importantes variations de réflectance. En outre, l'atmosphère des régions urbano-industrielles contient divers gaz et beaucoup de poussières qui affectent l'indice de végétation. D'ailleurs, malgré toutes ces difficultés, l'espace urbain reste quand même un excellent milieu pour tester la fiabilité des indices de végétation afin de discriminer le végétal du minéral.

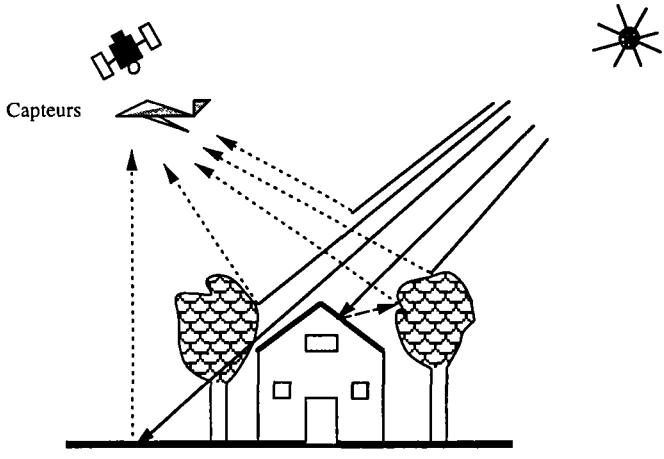


Figure 1. Mélange de la réponse spectrale au niveau du capteur satellitaire ou aéroporté en milieu urbain

Durant la dernière décennie, une deuxième génération d'indices de végétation (NDVI, PVI, SAVI, MSAVI, TSAVI, TSARVI, ARVI, GEMI, et AVI) a été conçue dans le but de minimiser tous les effets extérieurs et pour mieux rehausser le signal issu de la végétation (BANNARI *et al.*, 1995). Bien que ces indices soient basés sur des hypothèses plausibles pour minimiser les effets extérieurs dans d'autres champs d'applications, il est très pertinent d'entreprendre une étude fondamentale afin de connaître le comportement de chacun de ces indices en fonction de toutes les variables propres au milieu urbain. Dans cette étude, nous analysons leur sensibilité aux variations causées par les propriétés optiques des sols nus (couleur et brillance) et leur efficacité pour une description précise du couvert végétal avec différents taux de couverture. En outre, comparativement aux résolutions spatiale et spectrale moyennes du capteur TM de Landsat, nous analysons l'apport des hautes résolutions spatiale et spectrale du capteur MEIS-II à la performance des indices de végétation en milieu urbain.

2. Secteur d'étude et données images

L'agglomération urbaine de Montréal, localisée au sud-ouest du Québec, en bordure du fleuve Saint-Laurent (45° 45' N, 74° 15' O), est l'un des principaux pôles urbains du Canada. Le secteur d'étude est la Communauté urbaine de Montréal (CUM) délimitée par le Saint-Laurent et par la rivière des Prairies. C'est une entité administrative qui regroupe 29 municipalités couvrant un territoire de 49 560 ha et 1,75 million d'habitants. La diversité des types d'occupation du sol qu'on rencontre sur le territoire de la CUM, d'une part, la rend particulièrement représentative des tissus urbains de la plupart des villes québécoises et, d'autre part, la richesse des données existantes (images, données cartographiques, données géodésiques, etc.) répond plus précisément à nos objectifs.

Dans cette étude, nous avons exploité une image aéroportée du capteur MEIS-II du Centre canadien de télédétection (CCT), enregistrée le 21 août 1990 au-dessus de l'île de Montréal (Québec), à une altitude d'environ 10 km, avec une résolution spatiale de 7 m et une résolution spectrale de 30 nm. Également, une image TM a aussi été utilisée; elle a été acquise la même journée que l'image MEIS-II avec un déphasage de 5 h sur le même territoire. Afin de corriger les effets atmosphériques qui interfèrent lors de l'acquisition des images d'une façon rigoureuse, l'épaisseur optique des aérosols a été mesurée au sol à 550 nm. Ainsi, les anomalies relatives aux capteurs et à la géométrie sont aussi corrigées.

3. Capteur MEIS-II

MEIS-II est un système imageur électro-optique multidétecteur aéroporté qui fonctionne selon le mode d'exploitation « en peigne ». Il a été construit par MacDonald Dettwiler et Associés pour le CCT; par la suite, il a été modifié par le CCT afin d'y intégrer un mode d'acquisition d'imagerie stéréoscopique (GIBSON, 1994). Le capteur MEIS-II contient huit canaux optiques indépendants et, à chaque canal, correspond un détecteur linéaire à transfert de charge (CCD – *Charge Coupled Devices*) de 1 728 éléments. Le domaine spectral couvre le rayonnement visible et le proche infrarouge de 350 à 1 100 nm. Dans cet intervalle, les caractéristiques spectrales d'une scène peuvent être choisies au moyen de filtres spectraux interchangeables placés à l'avant des objectifs. Durant l'acquisition de l'image, les données sont rééchantillonnées; les distorsions causées par l'optique des objectifs et les écarts entre canaux sont corrigés en temps réel d'enregistrement. Entre autres, un système de navigation inertiel enregistre les données de navigation (attitude, altitude et vitesse de l'avion) en fonction du temps. Ces données de navigation sont indispensables pour une correction géométrique robuste et rigoureuse (BANNARI *et al.*, 1993). Notons que quatre bandes dans le visible et le proche infrarouge ont été retenues dans la présente étude pour calculer les indices de végétation : bleu (433-463 nm), vert (532-564 nm), rouge (655-685 nm) et proche infrarouge (847-901 nm).

4. Prétraitements atmosphériques, radiométriques et géométriques

La correction des différentes perturbations atmosphériques nécessite en tout premier lieu de connaître tous les paramètres atmosphériques qui interfèrent au moment de l'acquisition

des images. Afin d'estimer ces paramètres avec une bonne précision, durant la journée d'acquisition de l'image, une campagne de mesures a été organisée sur le territoire d'étude pour mesurer l'épaisseur optique des aérosols à 550 nm. Cette dernière a été utilisée par la suite comme une donnée d'entrée au modèle 5S (Simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire) (TANRÉ *et al.*, 1985) pour déterminer, entre autres, la transmission des gaz, la transmission atmosphérique totale et la réflectance intrinsèque à l'atmosphère, à l'altitude du capteur. Notons que c'est la version du modèle 5S, adaptée par TEILLET et SANTER (1991) à la télédétection aéroportée, qui a été utilisée. Cette nouvelle version tient compte de l'altitude de la surface du sol et de l'altitude du capteur.

Par ailleurs, l'étalonnage radiométrique permet d'éliminer les anomalies propres au capteur. Cet étalonnage est d'une très grande importance, d'une part, pour la surveillance de l'environnement végétal à l'aide des indices de végétation et, d'autre part, pour une comparaison des indices de végétation lorsque les données sont enregistrées par différents capteurs (PRICE, 1987). Afin de résoudre ce problème de radiométrie propre au capteur, nous avons calculé tous les paramètres nécessaires pour l'étalonnage relatif et absolu. Le capteur MEIS-II comporte 1 728 détecteurs par barrette. Chacun des détecteurs possède sa propre sensibilité, son propre gain et son propre *offset*. Les conditions auxquelles est soumis le capteur au moment du décollage et de l'atterrissage de l'avion peuvent produire des variations importantes dans ses composantes électroniques et optiques, ce qui altère sa précision radiométrique. L'étalonnage relatif permet donc d'harmoniser l'information fournie par les différents détecteurs composant le capteur (ROBINOVE, 1982). Pour éliminer l'effet de la variation de la réponse entre les détecteurs de la même barrette, une première normalisation du gain de la sortie de chaque détecteur s'effectue en temps réel d'acquisition de l'image (TILL, 1984). Le cœfficient d'égalisation, $K(\lambda)$, ou facteur d'étalonnage relatif, permet une seconde normalisation pour chaque bande du capteur MEIS-II; il se détermine par la formule suivante (McCOLL *et al.*, 1984) :

$$K(\lambda) = f\,[\,R(\lambda) \cdot e\,]^{-1} \qquad (1)$$

où $K(\lambda)$ = cœfficient d'égalisation;
f = fréquence de balayage (Hz);
e = exposition (% d'unité de temps);
$R(\lambda)$ = responsivité (CN) ($W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$).

Quant à l'étalonnage absolu, il permet la transformation des valeurs numériques instrumentales (CN) en unités absolues dans le but d'éliminer les anomalies propres au capteur et à l'atmosphère, autrement dit, d'établir la relation entre la réponse du capteur et l'information qu'il reçoit de l'extérieur et qu'il est destiné à mesurer (CHAHINE, 1983). Évidemment, la précision de toutes les opérations subséquentes de traitement d'image dépendra automatiquement de la précision des corrections combinées du capteur et de l'atmosphère. L'équation générale de transformation des niveaux de gris en réflectances au sol corrigées de toutes ces anomalies est modélisée par la fonction linéaire suivante :

$$\rho_s(\lambda) = \text{Gain}(\lambda)\, C(\lambda)\, A(\lambda)\, CN(\lambda) + A(\lambda)\, C(\lambda)\, \text{offset}(\lambda) - B(\lambda) \qquad (2)$$

où $A(\lambda) = [tg(\lambda)\, T_{atm}(\lambda)]^{-1}$;
$B(\lambda) = \rho_a(\lambda)\, [T_{atm}(\lambda)]^{-1}$,
$C(\lambda) = \pi D^2\, [(\mu_s E_s(\lambda)]^{-1}$;
$\text{Gain}(\lambda) = K(\lambda)\, [g]^{-1}$;
$\mu_s = \cos(\theta_s)$;
θ_s = angle zénithal solaire;
$CN(\lambda)$ = compte numérique;

g = facteur d'amplification du gain, « code » sur les fiches techniques de la mission (*log sheet*) pour chaque bande;

$t_g(\lambda)$ = transmission des gaz à l'altitude du capteur;

$T_{atm}(\lambda)$ = transmission atmosphérique totale à l'altitude du capteur;

$\rho_a(\lambda)$ = réflectance intrinsèque à l'atmosphère à l'altitude du capteur;

$\rho_s(\lambda)$ = réflectance au sol;

D = distance moyenne Terre-Soleil;

$E_s(\lambda)$ = éclairement solaire incident au sol ($W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$).

Pour résoudre le problème de géométrie, nous avons utilisé une méthode de corrections géométriques rigoureuse basée sur des principes photogrammétriques fondamentaux (colinéarité et coplanarité) et sur les données de navigation (attitude, altitude et vitesse de l'avion), nommées données auxiliaires, qui sont enregistrées en fonction du temps par un système de navigation inertiel lors de l'acquisition des images (BANNARI *et al.*, 1993; GIBSON, 1994).

5. Critères d'évaluation de la sensibilité des indices de végétation

D'après JACKSON *et al.* (1983), l'indice de végétation « idéal » devrait être sensible aux couverts végétaux, insensible à la brillance et à la couleur des sols nus, peu affecté par les effets de l'atmosphère, de l'environnement ainsi que des conditions d'éclairement et d'observation. Ces effets interviennent simultanément au cours de mesures *in situ* et au moment de l'acquisition des images satellitaires ou aéroportées. L'indice de végétation (IV) se modélise comme une fonction de toutes ces variables :

$$IV = f(V, B\text{-}C, A, M) \quad (3)$$

où V = sensibilité au couvert végétal; c'est la condition primordiale que l'indice de végétation doit satisfaire puisqu'il est sensé avoir une meilleure sensibilité que les bandes spectrales individuelles pour mesurer la vigueur de la végétation;

B-C = brillance et couleur du sol; elles sont la seconde condition que l'indice doit respecter car l'hétérogénéité du milieu urbain est très prononcée;

A = atmosphère; les conditions atmosphériques sont variables dans le temps et dans l'espace; ces variations peuvent réduire considérablement la précision des indices de végétation;

M = mode expérimental; cette dernière condition englobe l'étalonnage radiométrique du capteur, l'effet bidirectionnel, ainsi que les fines ou les larges résolutions spatiale et spectrale du capteur.

Toute variation causée par ces variables modifie automatiquement l'indice de végétation de la façon suivante :

$$dIV = \frac{\partial IV}{\partial V}dV + \frac{\partial IV}{\partial B\text{-}C}dB\text{-}C + \frac{\partial IV}{\partial A}dA + \frac{\partial IV}{\partial M}dM \quad (4)$$

De manière générale, un indice sera d'autant plus performant lorsque celui-ci maximise le signal issu de la végétation ($\partial IV/\partial V$) et minimise les effets liés aux éléments perturbateurs cités précédemment ($\partial IV/\partial B\text{-}C$, $\partial IV/\partial A$ et $\partial IV/\partial M$). En considérant l'équation (4), nous

analysons chacun des indices en fonction des trois variables suivantes : 1) la couleur et la brillance du sol; 2) l'effet des hautes résolutions spatiale et spectrale du capteur; 3) la sensibilité au couvert végétal. Nous considérons la variable « atmosphère » constante, car les effets atmosphériques ainsi que les anomalies relatives aux capteurs ont été corrigés. Quant à l'effet bidirectionnel, qui varie en fonction du cosinus de l'angle de visée (QI, 1993), il n'affecte pas les résultats d'une façon significative puisque le capteur aéroporté est dans une position verticale lors de l'enregistrement de l'image. Par contre, l'angle de visée du capteur TM est de 5,5° par rapport à la verticale, ce qui affecte l'indice de végétation d'une variation négligeable (0,4 %).

6. Choix des indices de végétation

Malgré le développement de plusieurs nouveaux indices adaptés aux comportements des sols, le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), proposé par ROUSE *et al.* (1974), reste l'indice le plus utilisé. En exploitant la philosophie de la droite des sols nus (pente et origine), JACKSON *et al.* (1980) développent le PVI (*Perpendicular Vegetation Index*). HUETE (1988) démontre qu'il existe une certaine contradiction dans la façon dont les indices NDVI et PVI décrivent le comportement spectral de la végétation et du sol nu. Par conséquent, il a développé un nouvel indice de végétation appelé SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) qui est un compromis entre les indices de type rapport (NDVI) et les indices de type orthogonal (PVI). Par ailleurs, QI *et al.* (1994a) montrent que le facteur d'ajustement « L » du SAVI n'est pas une constante, mais plutôt une fonction qui varie inversement avec la présence de la végétation. Afin de minimiser l'effet du sol nu sur le SAVI, ils proposent une version modifiée de l'indice, le *Modified Soil Adjusted Vegetation Index* (MSAVI). À partir d'une approche analogue à celle du PVI, BARET *et al.* (1989) transforment le SAVI en *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* (TSAVI). Cette première version du TSAVI fut réajustée afin de minimiser les effets de la brillance du sol par un facteur additif de 0,08 (BARET and GUYOT, 1991). KAUFMAN et TANRÉ (1992) développent un nouvel indice de végétation, appelé ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*). Celui-ci est une version améliorée de l'indice NDVI pour mieux raffiner la diffusion atmosphérique et il est calculé à partir des réflectances apparentes au capteur. Afin de minimiser à la fois l'effet du sol et de l'atmosphère, PINTY et VERSTRAETE (1992) proposent un indice de végétation non linéaire pour une gestion globale de la végétation à partir d'images satellitaires, le *Global Environment Monitoring Index* (GEMI). Récemment, pour minimiser l'effet de l'atmosphère sur le TSAVI, BANNARI *et al.* (1994) proposent le *Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index* (TSARVI). Cette transformation se base, d'une part, sur la substitution du canal rouge par le canal rouge-bleu, proposé par KAUFMAN et TANRÉ (1992) et, d'autre part, sur le calcul de la pente et l'origine (a_{rb} et b_{rb}) de la droite des sols nus dans l'espace spectral apparent rouge-bleu/proche infrarouge (équation 15). Un autre nouvel indice de végétation résistant aux effets atmosphériques et à la brillance du sol est défini par PLUMMER *et al.* (1994), le *Angular Vegetation Index* (AVI). Cet indice utilise les trois bandes spectrales soit, vert, rouge et proche-infrarouge, ainsi que la longueur d'onde centrale de chacune de ces bandes (λ_1, λ_2, λ_3). La dépendance spectrale de cet indice se normalise par rapport à la bande centrale dans le rouge (λ_2). Les formules de tous ces indices sont :

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{PIR} - \text{R})}{(\text{PIR} + \text{R})} \tag{5}$$

où R = réflectance moyenne dans le canal rouge;
PIR = réflectance moyenne dans le canal proche infrarouge.

$$PVI = \frac{(PIR - a\,R - b)}{\sqrt{a^2 = 1}} \tag{6}$$

$$PIR = a\,R + b \tag{7}$$

où a = pente de la droite des sols nus, dans l'espace R/PIR;
b = ordonnée à l'origine de la droite des sols nus, dans l'espace R/PIR.

$$SAVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R + L)}\,(1 + L) \tag{8}$$

où L = facteur d'ajustement égal à 0,5.

$$MSAVI = \frac{2\,PIR + 1 - \sqrt{(2\,PIR + 1)^2 - 8\,(PIR - R)}}{2} \tag{9}$$

$$TSAVI = \frac{a\,(PIR - a\,R - b)}{R + a\,PIR - a\,b + 0{,}08\,(1 + a^2)} \tag{10}$$

$$ARVI = \frac{(PIR^* - RB^*)}{(PIR^* + RB^*)} \tag{11}$$

$$RB^* = R^* - \gamma\,[B^* - R^*] \tag{12}$$

$$\gamma = \rho_{a\text{-}r} / [\,\rho_{a\text{-}b} - \rho_{a\text{-}r}\,] \tag{13}$$

où R^* = réflectance apparente moyenne du canal rouge;
B^* = réflectance apparente moyenne du canal bleu;
PIR^* = réflectance apparente moyenne du canal proche infrarouge;
RB^* = réflectance apparente combinée à partir des deux canaux (bleu et rouge);
$\rho_{a\text{-}r}$ = réflectance intrinsèque de l'atmosphère dans le canal rouge;
$\rho_{a\text{-}b}$ = réflectance intrinsèque de l'atmosphère dans le canal bleu;
γ = facteur d'autocorrection atmosphérique qui dépend du type d'aérosol;

$$TSARVI = \frac{a_{rb}\,(PIR^* - a_{rb}\,RB^* - b_{rb})}{RB^* + a_{rb}\,PIR^* - a_{rb}\,b_{rb} + 0{,}08\,(1 + a_{rb}^2)} \tag{14}$$

La droite des sols nus dans l'espace spectral apparent rouge-bleu et proche infrarouge est la suivante :

$$PIR^* = a_{rb}\,RB^* + b_{rb} \tag{15}$$

où a_{rb} = pente de la droite des sols nus, dans l'espace RB^*/PIR^*;
b_{rb} = ordonnée à l'origine de la droite des sols nus, dans l'espace RB^*/PIR^*.

$$GEMI = \frac{\eta\,(1 - 0{,}25\eta) - (R - 0{,}125)}{1 - R} \tag{16}$$

$$\eta = \frac{2\,(PIR^2 - R^2) + 1{,}5\,PIR + 0{,}5\,R}{PIR + R + 0{,}5} \tag{17}$$

$$AVI = \tan^{-1}\left\{\frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_2}\left[PIR - R\right]^{-1}\right\} + \tan^{-1}\left\{\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2}\left[V - R\right]^{-1}\right\} \tag{18}$$

Le degré de résistance des indices ARVI et TSARVI dépend du succès de la détermination du paramètre d'autocorrection atmosphérique (γ). En se basant sur un modèle de transfert radiatif (le modèle 5S), KAUFMAN et TANRÉ (1992) montrent que la valeur de $\gamma = 1{,}0$ permet un meilleur ajustement pour la plupart des applications en télédétection, à moins que le modèle des aérosols ne soit connu *a priori*, ce qui est le cas de notre étude. Puisque nous disposons de la valeur de l'épaisseur optique des aérosols mesurée au sol, les réflectances intrinsèques à l'atmosphère dans les canaux rouge et bleu ($\rho_{a\text{-}r}$, $\rho_{a\text{-}b}$) ont été déterminées par simulation. L'équation (13) nous permet de déterminer la vraie valeur du facteur d'autocorrection atmosphérique, $\gamma = 0{,}25$ et $0{,}43$, respectivement, pour les deux images MEIS-II et TM (BANNARI, 1996).

7. Évaluation et discussion

Dans les trois sections suivantes, sur les indices de végétation de la deuxième génération, nous analysons : 1) les effets des propriétés optiques des sols (couleur et brillance), 2) l'avantage des hautes résolutions spatiale et spectrale du capteur MEIS-II par rapport aux résolutions moyennes du capteur TM de Landsat pour minimiser les effets de la couleur et de la brillance des sols; 3) l'efficacité de chacun des indices pour une description précise du couvert végétal avec différents taux de couverture.

7.1. Couleur et brillance du sol

La gestion de l'environnement végétal urbain à l'aide des indices de végétation nécessite, dans un premier temps, la connaissance des effets des propriétés optiques des sols nus (couleur et brillance) sur les indices de végétation. Afin d'évaluer ces effets, 60 sites d'échantillonnage correspondant à différents types de sols de différentes couleurs et brillances sont sélectionnés. Ils incluent les sols nus, les surfaces bâties, les toitures de maisons, les routes, etc. La haute résolution spatiale de l'image MEIS-II facilite l'identification des objets au sol, de leur nature et de leur couleur. Pour localiser les sites d'échantillonnage correctement sur l'image TM, nous nous sommes basés sur des photographies aériennes couleurs au 1: 5 000, acquises à la même période que les images TM et MEIS-II, soit en août 1990, une carte d'occupation du sol de 1989 et une carte topographique de 1992.

Par ailleurs, pour calculer la pente et l'origine de la droite des sols nus nécessaires pour les indices PVI, TSAVI et TSARVI, tous les échantillons sélectionnés sont considérés. En effet, en réalité, il n'y a pas une seule droite des sols mais autant de droites que de couleurs, de brillances et de types de sols. Elles sont souvent proches, mais le fait de les confondre

et de considérer un seul sol entraîne des erreurs de l'ordre de 10 à 15 % pour l'estimation de la biomasse verte (EZRA *et al.*, 1984; HEILMAN and BOYD, 1986; HUETE and TUCKER, 1991). Cependant, cet élargissement du contenu par rapport aux échantillons limités aux sols nus de même nature et de même couleur, tel que suggéré par RICHARDSON et WIEGAND (1977), permet un ajustement plus fiable et plus précis de cette droite.

Théoriquement l'indice de végétation mesure la densité du couvert végétal indépendamment des propriétés optiques des sols nus. Selon cette hypothèse, en l'absence de végétation, l'indice doit avoir une valeur nulle (dB-C tend vers zéro) et cela, quelles que soient la nature, la couleur et la brillance du sol. La représentation graphique, dans un espace bidimensionnel, de la réflectance dans le rouge (ou rouge-bleu pour ARVI et TSARVI) en fonction de l'indice de végétation doit nous montrer une bonne superposition entre le nuage de points et la ligne théorique des sols nus de valeur nulle. En effet, le degré de sensibilité des indices à la couleur et à la brillance du sol peut donc s'évaluer par la distance de ce nuage de points par rapport à cette ligne.

Bien que l'indice GEMI ait pour but une évaluation et une gestion globale de l'environnement sans être affecté par l'atmosphère et le sol, nous démontrons ici le contraire. Pour les sols nus de couleur claire, il montre une grande sensibilité et donne l'impression d'un couvert végétal de 33 % de densité, ce qui fausse l'estimation de la biomasse verte et l'interprétation des résultats (fig. 2a). Cette faiblesse, soulevée par BANNARI *et al.* (1996) à partir des mesures au sol, concorde avec les travaux de PLUMMER *et al.* (1994) et QI *et al.* (1994b).

En ne considérant que les sols nus, l'indice AVI montre une amplitude oscillant entre -3 et +3 (fig. 2b) par rapport à la ligne théorique des sols nus. Le comportement de cet indice vis-à-vis des propriétés optiques des sols nus ne reflète jamais la même attitude sur des échantillons sélectionnés à partir des images satellitaires ou aéroportées, ou sur des échantillons mesurés par simulations au sol (BANNARI *et al.*, 1996). Puisqu'il dépend de la longueur d'onde dans le rouge, le vert et le proche infrarouge, un changement de capteur cause automatiquement de très fortes variations dans les valeurs de cet indice, ce qui rend difficile, voire erronée, la comparaison des résultats issus de différents capteurs ou l'interprétation des résultats obtenus d'un même capteur. Par conséquent, nous pouvons dire que, globalement, cet indice conduit à des résultats ne reflétant pas le comportement théorique des indices de végétation, ce qui nous amène à l'écarter de notre étude.

Les indices ARVI et NDVI présentent presque la même sensibilité aux propriétés optiques des sols. L'erreur quadratique moyenne est, respectivement, de 3 % et 4 % sur le ARVI et le NDVI (fig. 2c et 2d). Aucun de ces indices n'intègre dans son calcul l'information sur les sols nus. En effet, lorsque la couleur du sol est claire (verte ou rouge), l'erreur quadratique moyenne sur ces indices peut atteindre facilement environ 10 %, ce qui concorde avec les résultats des travaux de HUETE et TUCKER (1991), de HUETE *et al.* (1994) et de RONDEAUX *et al.* (1994). Notons qu'en général, pour des résolutions spatiale et spectrale moyennes, cas du capteur TM de Landsat, ces deux indices manifestent une forte dépendance vis-à-vis des propriétés optiques des sols (fig. 3).

Quant à l'indice PVI, qui se calcule en fonction des paramètres de la droite des sols nus, nous remarquons, qu'indépendamment de la couleur et de la brillance du sol, le nuage de points coïncide parfaitement avec la ligne théorique des sols nus de valeur nulle (fig. 2e). L'erreur quadratique moyenne sur cet indice est négligeable, soit de l'ordre de 0,3 %.

Les figures 2f à 2i illustrent bien le comportement des indices qui s'ajustent par rapport aux sols nus (SAVI, MSAVI, TSAVI et TSARVI). Ces derniers se caractérisent par une bonne performance pour décrire adéquatement le comportement des sols nus. L'erreur quadratique moyenne sur ces indices est presque identique et varie entre 1,3 et 2 %, ce qui est insignifiant.

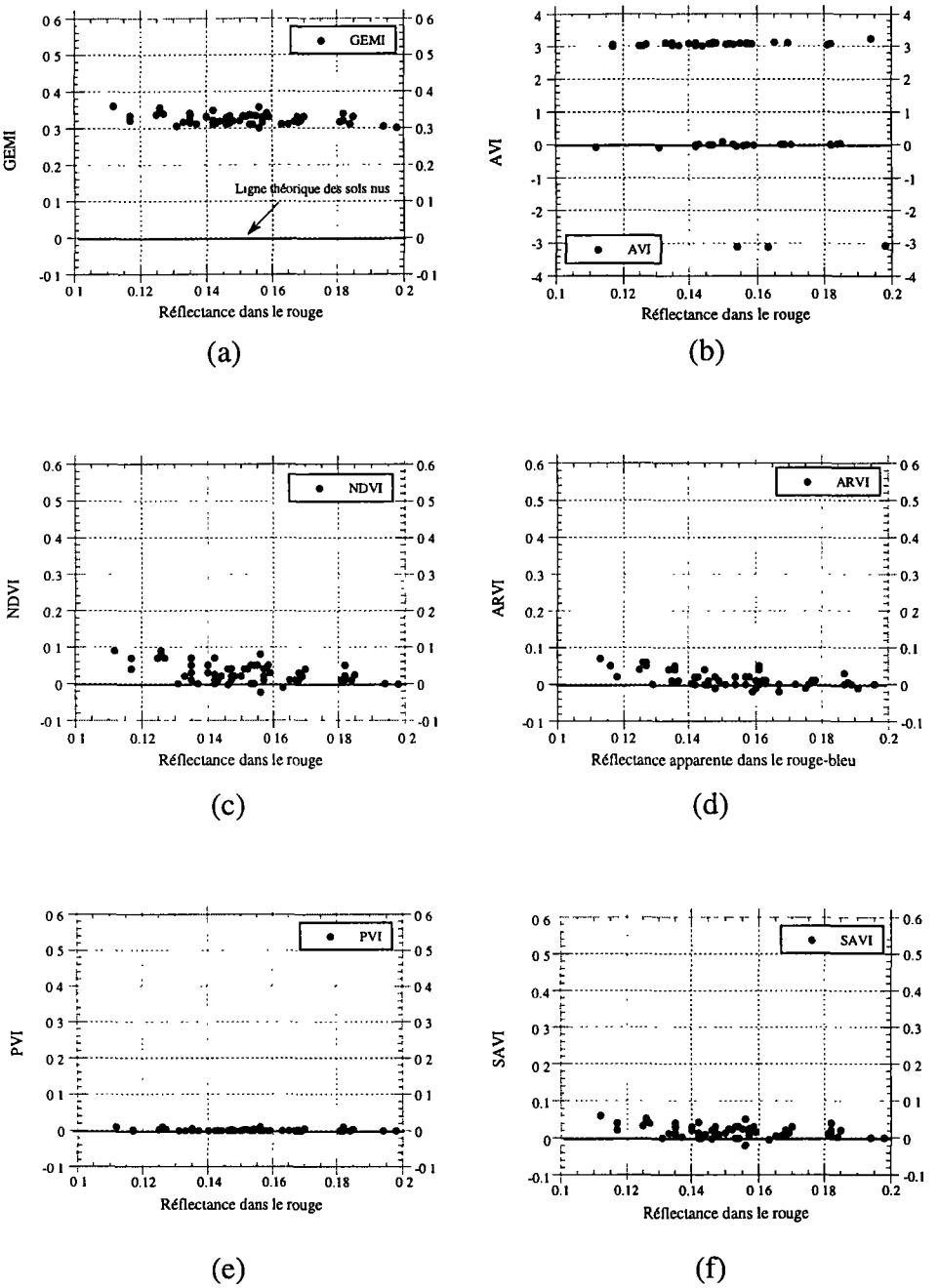


Figure 2 (partie 1). Effets de la couleur et de la brillance des sols nus sur les indices de végétation

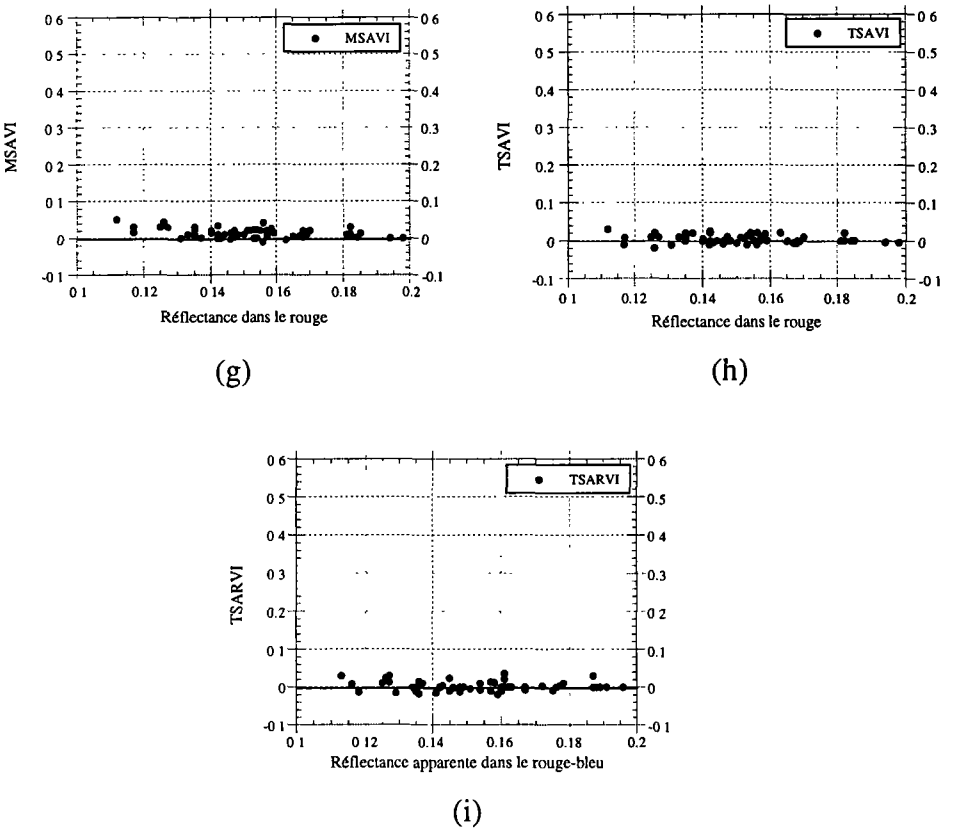


Figure 2 (partie 2). Effets de la couleur et de la brillance des sols nus sur les indices de végétation

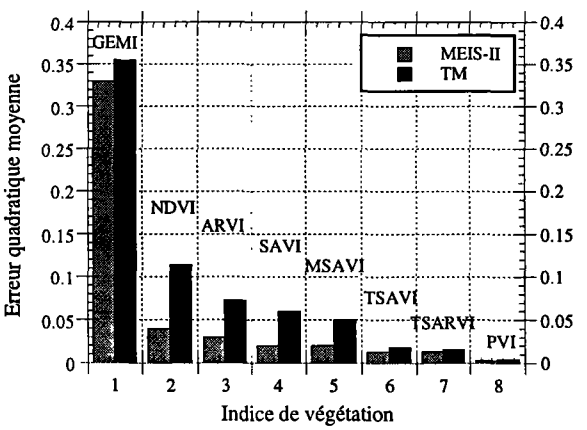


Figure 3. Erreur quadratique moyenne causée par la couleur et la brillance des sols sur les indices de végétation en fonction des capteurs MEIS-II et TM

7.2. Effet des hautes résolutions spatiale et spectrale

Afin que les résultats issus des deux capteurs (MEIS-II et TM) soient comparables, toutes les anomalies relatives aux capteurs, à l'atmosphère et à la géométrie sont rigoureusement corrigées. La comparaison entre les différents indices, déterminés à partir des données de ces capteurs, est illustrée à la figure 3. D'une façon générale, nous remarquons que les hautes résolutions spatiale et spectrale du capteur MEIS-II montrent un très grand avantage par rapport aux résolutions moyennes du capteur TM de Landsat pour minimiser l'effet des propriétés optiques des sols nus sur les indices de végétation. Cet avantage est fortement marqué pour les indices qui ne considèrent pas la droite des sols nus (SAVI et MSAVI) et qui ne s'ajustent pas par rapport aux sols nus (NDVI et ARVI). En effet, par rapport à la réalité, nous constatons un gain de précision d'environ 2,7 fois sur ces indices. Par ailleurs, en plus de leur excellent comportement vis-à-vis des propriétés optiques des sols nus, les indices qui intègrent la pente et l'origine de la droite des sols nus (PVI, TSAVI et TSARVI), gardent toujours la même précision, et cela indépendamment des caractéristiques spatiales et spectrales propres aux capteurs. Nous pouvons dire, qu'en général, les hautes résolutions spatiale et spectrale permettent de minimiser remarquablement les effets des propriétés optiques des sols nus sur les indices de végétation. En outre, la résolution spatiale de MEIS-II présente l'avantage d'être mieux adaptée au parcellaire du milieu urbain, où un pixel dont la dimension est souvent comparable avec la taille des objets au sol minimise le problème de mixture. Cet avantage est contrebalancé par une très faible fréquence de passage, ce qui rend la tâche difficile pour un suivi permanent de l'environnement végétal.

7.3. Couvert végétal

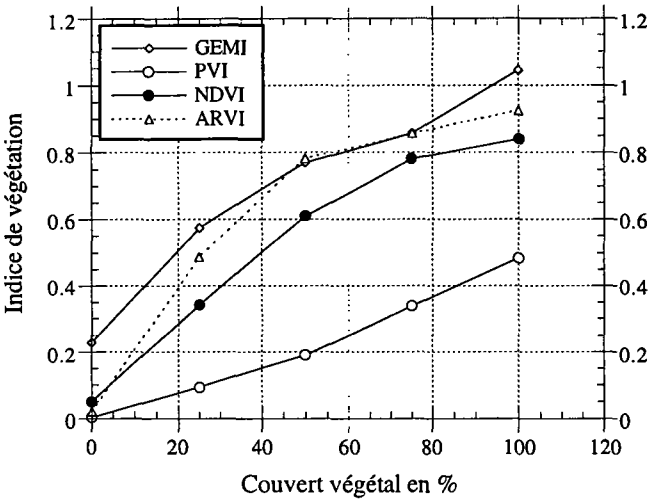
Afin d'évaluer le potentiel et la sensibilité de chacun des indices pour décrire la vigueur et la densité de la biomasse verte, indépendamment des perturbations extérieures, cinq sites à différents pourcentages de couverture végétale (0, 25, 50, 75 et 100 %) sont choisis. Sur la figure 4, on montre une grande variation de sensibilité entre les indices de végétation en fonction des différents taux de couverture végétale pour chacun de ces sites.

Sur la figure 4a, on montre, qu'au fur et à mesure que la densité du couvert végétal augmente, le GEMI s'approche de plus en plus de la réalité et que les perturbations causées par les sols nus deviennent faibles. Cependant, pour les couverts végétaux de faible densité, il surestime leur densité d'environ 2,3 fois. Cet accroissement est dû aux effets des propriétés optiques des sols adjacent et sous-jacent au couvert et non à une augmentation du taux de couverture végétale. Le GEMI est probablement un bon descripteur des milieux à couvert végétal très dense (milieux forestier ou agricole), mais il n'est pas un indicateur de l'environnement végétal épars ou moyennement dense en milieu urbain.

Par ailleurs, malgré son comportement exemplaire vis-à-vis des propriétés optiques des sols nus, en présence de la végétation, le PVI présente un faible potentiel pour une description précise du taux de couverture végétale. Contrairement au GEMI, le PVI sous-estime le taux de couverture. Sa valeur ne dépasse pas 50 % pour un couvert très dense (100 %) et elle est de l'ordre de 10 % pour un couvert épars de 25 % de densité (fig. 4a). Par conséquent, il est moins commode pour une description exacte de la végétation éparse en milieu urbain.

Malgré le raffinement des effets atmosphériques sur le ARVI, celui-ci montre une forte sensibilité aux propriétés optiques du sol sous-jacent au couvert végétal par rapport au NDVI, surtout pour les couverts de densité faible ou intermédiaire ($0\ \% < x < 60\ \%$). Dans

(a)



(b)

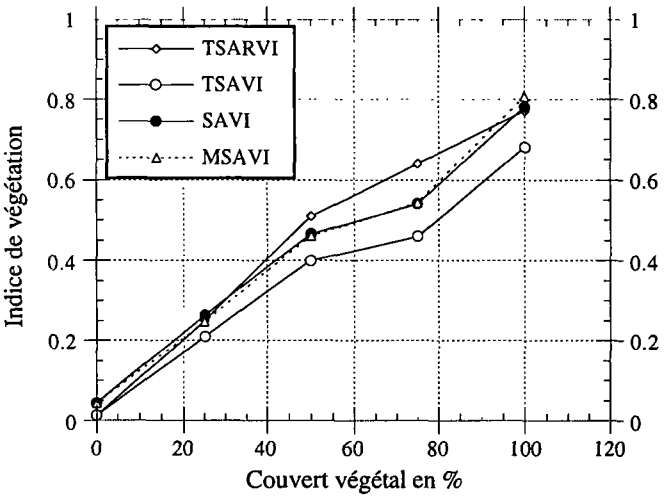


Figure 4. Potentiel des indices de végétation pour la description des couverts végétaux avec différents taux de couverture

ces conditions, ces indices restent sensibles à la mixture spectrale du végétal et du minéral et, par conséquent, ils surestiment la densité du couvert (fig. 4a).

Quant aux indices qui s'ajustent par rapport aux sols nus (SAVI, MSAVI, TSAVI et TSARVI), leur potentiel de discrimination entre le minéral et le végétal pour différents taux de couverture est illustré sur la figure 4b. Indépendamment des conditions du sol et du couvert végétal, le potentiel des indices SAVI et MSAVI est presque identique. Notons, qu'à partir des données TM, le MSAVI se distingue du SAVI par une légère précision. Ces deux indices dépendent des caractéristiques spectrale et spatiale du capteur. Les indices

TSAVI et TSARVI montrent une bonne flexibilité d'utilisation indépendamment de la couleur et de la brillance des sols ainsi que des caractéristiques du capteur. Ces indices montrent la même sensibilité aux sols nus mais, en plus de sa qualification pour minimiser les effets atmosphériques, le TSARVI reflète un degré de précision plus élevé que le TSAVI au moment de la présence de la végétation. En effet, le TSARVI est l'indice le plus performant pour caractériser l'environnement végétal épars en milieu urbain.

8. Conclusion

À la lumière des résultats obtenus, nous remarquons que les indices GEMI, NDVI, ARVI et PVI sont moins performants pour caractériser l'environnement urbain où la végétation est éparse ou moyennement dense. Ces indices montrent une forte dépendance vis-à-vis des propriétés optiques des sols nus surtout ceux qui sont brillants et de couleur claire. À partir des mesures au sol par simulations et des images satellitaires ou aéroportées, le AVI donne toujours des résultats ne reflétant pas le comportement théorique des indices de végétation.

Par ailleurs, les indices qui s'ajustent par rapport aux sols nus (SAVI, MSAVI) ou qui englobent les paramètres de la droite des sols nus (TSAVI et TSARVI) montrent un bon comportement vis-à-vis de la couleur et de la brillance des sols nus. En présence de la végétation, le potentiel des indices SAVI et MSAVI est identique, ainsi ils sont sensibles aux caractéristiques spatiale et spectrale du capteur. Notons, qu'à partir des données TM, le MSAVI se distingue du SAVI par une légère précision. Les indices TSAVI et TSARVI montrent la même sensibilité aux sols nus mais, en plus de sa qualification pour minimiser les effets atmosphériques, le TSARVI reflète un degré de précision plus élevé que le TSAVI en présence de végétation. En l'absence du canal bleu (cas du HRV de SPOT) le TSAVI devient l'indice de végétation le plus approprié pour le milieu urbain.

Il est souhaitable, au moment du passage du capteur aéroporté ou du satellite, d'accompagner les mesures de l'épaisseur optique des aérosols au sol par des mesures spectroradiométriques sur des sites témoins de la réalité de terrain pour différents types de végétation urbaine. Ces mesures permettent de connaître avec précision la valeur de l'indice de végétation au sol et d'établir une corrélation entre la réalité de terrain et l'information dérivée à partir des images.

La théorie des ensembles flous permet le passage du binaire (0 ou 1) au continu (0 à 1). Dans un même pixel ce passage facilitera la détermination du pourcentage de chacune des classes d'occupation du sol (végétation et sol nu) et augmentera le degré d'appartenance à une classe ou à une autre, ce qui pourra amplement contribuer à l'amélioration du concept des indices de végétation. Bien que les systèmes experts demandent assez de temps et du travail plus complexe pour établir la base des règles de décision, ils constituent aussi une autre alternative prometteuse pour la conception des indices de végétation.

9. Remerciements

Les auteurs désirent remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada pour son support financier (OGP 000 5252). Ils remercient également MM. Jean-Marie Dubois et Paul Gagnon du CARTEL pour la révision et la critique de ce travail ainsi que l'AUPELF-UREF pour sa contribution financière destiné à la présentation de ce travail lors des 6es Journées scientifiques du Réseau Télédétection (Liège, 1995).

10. Références

BANNARI, A. 1996. La télédétection et les indices de végétation pour la détection de la végétation éparse et moyennement dense : cas de l'environnement urbain. Thèse de doctorat, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 230 p.

BANNARI, A., GIBSON, J. R. et MORIN, D. 1993. Le système GEOCOR pour les corrections géométriques des images MEIS. Actes du 16e Symposium canadien sur la télédétection, Sherbrooke, Québec, Canada, juin 1993, p.165-171.

BANNARI, A., HUETE, A. R., MORIN, D. et ZAGOLSKI, F. 1996. Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 10, p. 1885-1906.

BANNARI, A., MORIN, D. and HE. D.-C. 1994. High spatial and spectral resolution remote sensing for the management of the urban environment. Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, vol. III, p. 247-260.

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., GUYOT, G. and MAJOR, D. J. 1989. TSAVI : A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Canada, p. 1355-1358.

BARET, F. and GUYOT, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, vol. 35, p. 161-173.

CHARBONNEAU, L., ROYER, A., HINSE, M., COULOMBE, A. et LAMBERT, É. 1991. Évaluation de la qualité des biotopes urbains par télédétection. 5e Colloque international sur les mesures physiques et signatures en télédétection, Courchevel, France, vol. 2, p. 493-496.

CHAHINE, M. T. (ed). 1983. Chapter 5 : Interaction Mechanisms Within the Atmosphere. *in* R. N. COLWELL (ed). Manual of Remote Sensing. 2nd edition, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, Virginia, USA, The Sheridan Press, p.165-224,

CNES (Centre national d'études spatiales). 1982. Quelques formes urbaines et linéaments à travers SPOT-Simulé et Landsat-3. Rapport final, CNES n° 81/0208 & ATP CNRS n° 1080, France, 32 p.

COLLET, C. et ABEDNEGO, B. 1987. L'évolution du paysage urbain étudiée à l'aide d'un indice de végétation. *in* J.-P. Donnay (dir.), Actes de la journée de recherches F.N.R.S du Groupe de géographie humaine théorique et quantitative : Télédétection satellitaire et espace urbain. Université de Liège, Société de géographie de Liège, notes de recherches n° 9, p. 3-16.

EZRA, C. E., TINNEY, L. R. and JACKSON, R. D. 1984. Effect of soil background on vegetation discrimination using Landsat data. Remote Sensing of Environment, vol. 16, p. 233-242.

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

GALLO, K. P., MCNAB, A. L., KARL, T. R., BROWN, J. F., HOOD, J. J. and TARPLEY, J. D. 1993. The use of vegetation index for assessment of the urban heat island effect. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, n° 11, p. 2223-2230.

GIBSON, J. R. 1994. Photogrammetric Calibration of Digital Electro-optical Stereo Imaging System. Geomatica, vol. 48, n° 2, p. 95-109.

HEILMAN, J.L. and BOYD, W.E. 1986. Soil background effects on the spectral response of a three-component rangeland scene. Remote Sensing of Environment, vol. 19, n° 2, p. 127-138.

HUETE, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295-309.

HUETE, A.R. and TUCKER, C. J. 1991. Investigation of soil influence in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 12, n° 6, p. 1223-1242.

HUETE, A. R., LIU, H., DE LIRA, G. R., BATCHILY, K. and ESCADAFAL, R. 1994. A soil color index to adjust for soil and litter noise in vegetation index imagery of arid regions. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium "IGARSS '94", Pasadena, California, USA, vol. II, p. 1042-1043.

IAURIF (Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'Île-de-France). 1986. Mesurer la végétation urbaine par télédétection : du satellite au terrain. Paris, France, 90 p.

JACKSON, R. D., PINTER, P. J., PAUL, J., REGINATO, R. J., ROBET, 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, USA, 66 p.

JACKSON, R. D., SLATER, P. N. and PINTER, P. J. 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. Remote Sensing of Environment, vol. 13, p. 187-208.

KAUFMAN, Y. J. and TANRÉ, D. 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, n° 2, p. 261-270.

McCOLL, W. D., TILL, S. M. and NEVILLE, R. A. 1984. MEIS II Operational Sensor for Multidisciplinary Applications. Proceedings of the 9th Canadian Symposium on Remote Sensing, St. John's, Nfld, Canada, p. 497-501.

NICOLOYANNI, E. 1990. Un indice de changement diachronique appliqué à deux scènes Landsat MSS sur Athènes (Grèce). International Journal of Remote Sensing, vol. 11, n° 9, p. 1617-1623.

PINTY, B. and VERSTRAETE, M. M. 1992. GEMI : a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. Vegetatio, vol. 101, p.15-20.

PLUMMER, S. E., NORTH, P. R. and BRIGGS, S. A. 1994. The angular vegetation index : an atmospherically resistant index for the second along track scanning radiometer (ATSR-2). Proceedings of the Sixth International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isère, France, p. 717-722.

PRICE, J. C. 1987. Calibration of satellite radiometers and comparison of vegetation indices. Remote Sensing of Environment, vol. 21, p. 15-27.

QI, J. 1993. Compositing multitemporal remote sensing data. Ph.D dissertation, Department of soil and water science, University of Arizona, Arizona, USA, 200 p.

QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A. R., KERR, Y. and SOROOSHIAN, S. 1994a. A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, vol. 47, p. 1-25.

QI, J., KERR, Y. and CHEHBOUNI, A. 1994b. External factors consideration in vegetation index development. Proceedings of the Sixth International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isère, France, p. 723-730.

RICHARDSON, A. J. and WIEGAND, C. L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 43, n° 12, p. 1541-1552.

ROBINOVE, C. J. 1982. Computation with physical values from Landsat digital data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 48, n° 5, p. 781-784.

RONDEAUX, G., STEVEN, M. and CLARK, J. 1994. Biophysical indices from ATSR-2. Proceedings of the Sixth International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isère, France, p. 143-150.

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 / GSFCT Type III Final Report, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 164. p.

TANRÉ, D. C., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J. J., PERBOS, J. et DESCHAMPS, P.Y. 1985. Effets atmosphériques en télédétection : logiciel de simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire. Proceedings of the 3rd International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Les Arcs, France, p. 315-319.

TEILLET, P. M. and SANTER, R. P. 1991. Terrain elevation and sensor altitude dependence in a semi-analytical atmospheric code. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 1, p. 36-44.

TILL, S. M. 1984. Le MEIS II capteur électro-optique multispectral aéroporté. Atelier MEIS, Camsell Hall, Ottawa, Ontario, Canada, 15 p.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 65-73

6

Cartographie écologique par télédétection d'agglomérations urbaines : cas de Namur et de Charleroi (Belgique)

ISABELLE REGINSTER

Laboratoire de télédétection et d'analyse régionale, Université catholique de Louvain, 3, place Louis Pasteur, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique;
téléphone : +32 (10) 47-28-70; télécopieur : +32 (10) 47-28-77;
CÉ : reginster@geog.ucl.ac.be

Résumé

Deux agglomérations en mutation récente illustrent notre étude : Namur et Charleroi, en Belgique. Nous avons réalisé pour chacune de celles-ci une carte écologique. L'imagerie satellitaire et les photographies aériennes ont été exploitées et des méthodes analogiques et numériques ont été testées. C'est la photo-interprétation qui permet d'obtenir le plus d'informations taxonomiques et d'exactitude. Cependant, pour des agglomérations vastes, comme celle de Charleroi, nous avons constaté le caractère de plus en plus indispensable du numérique. Nous avons mis au point une segmentation de l'espace urbain sur base d'informations spectrales, texturales et contextuelles dans le but d'adapter les méthodes numériques de traitement d'image aux réalités physiques et structurelles des différents milieux typiquement urbain, périurbain et rural. Cette adaptation a été testée pour un seuillage différentiel des images de l'indice normalisé de végétation et pour un filtrage différentiel postclassification. Appliquée à l'agglomération de Charleroi, cette technique de classification numérique après segmentation nous a permis d'augmenter les détails taxonomiques et l'exactitude par rapport à une classification numérique exécutée sur l'ensemble de l'image.

1. Introduction

Pour l'aide à la notion du « bon aménagement d'un lieu » utilisée en aménagement du territoire urbain, nous étudions les contributions de la télédétection et du système d'information géographique (SIG) à la détermination de la qualité de l'environnement en agglomération urbaine. Deux milieux urbains belges en mutation récente et présentant des caractéristiques urbanistiques différentes illustrent notre étude : Namur et Charleroi (fig. 1). La ville de Namur est depuis peu capitale de la Région Wallonne : c'est une ville de services. Son emprise urbaine représente une superficie d'environ 50 km^2. Le milieu urbain de Charleroi est plus vaste, environ 130 km^2 : c'est une grande cité industrielle, en mutation d'activités, et on y retrouve de nombreuses friches industrielles et de nouvelles zones d'implantation d'activités.

Nous avons réalisé pour chacune des deux agglomérations une carte écologique, cette dernière comprend des informations sur l'occupation, l'utilisation du sol et les types de « verdurisation » de l'habitat. La « verdurisation » décrit la végétation urbaine en fonction de son type arboré ou herbacé, son abondance et sa répartition. Les objectifs de cette cartographie sont d'obtenir un maximum de détails taxonomiques et d'exactitude, et de mettre en évidence des éléments pertinents pour la qualité de l'environnement. D'un point de vue méthodologique, l'objectif est de montrer les contributions de la télédétection pour ce type de cartographie.

2. Matériel

Deux sources principales d'informations de télédétection ont été exploitées pour la réalisation des deux cartes écologiques, pour les agglomérations de Namur et Charleroi : les photographies aériennes et une image satellitaire.

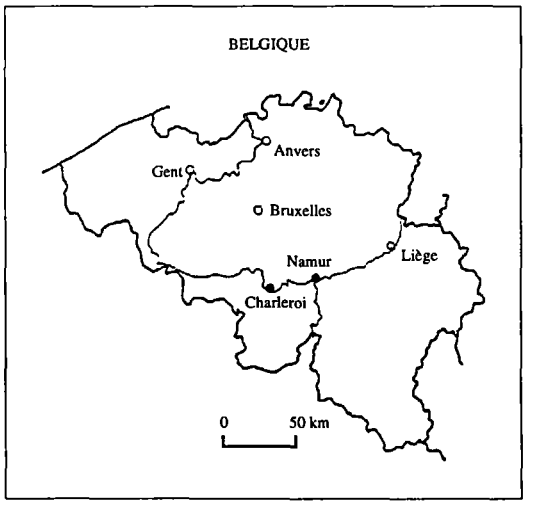


Figure 1. Carte de localisation de Namur et de Charleroi

Les photographies aériennes utilisées sont infrarouges au 1: 25 000. Elles possèdent une haute résolution spatiale et révèlent un fort contraste entre le bâti et la végétation. Les prises de vue datent du 6 août 1991. Par leurs sensibilités à une fenêtre spectrale dans l'infrarouge, ces photographies aériennes offrent des possibilités importantes de différenciation entre les couvertures végétales.

L'image satellitaire utilisée est une image HRV de SPOT du 26 juillet 1990. Deux imagettes ont été extraites de la scène autour des agglomérations de Namur et Charleroi. Nous avons réalisé une correction de bruit de la bande panchromatique (P) qui était affectée d'un lignage dû à une mauvaise calibration des détecteurs. L'intégration des modes P et multibande (XS) a fait l'objet d'un point particulier de recherche. La méthode de remplacement simple de la bande XS2 par la bande P fut choisie pour sa facilité de mise en oeuvre, parce que la perte d'informations due à l'intégration était faible et mesurée. De plus, les canaux P et XS2 ont, dans le cas de notre image, leurs maxima de sensibilité spectrale à peu près pour les mêmes longueurs d'onde. Chaque partie d'image fut également corrigée géométriquement en projection conique conforme de Lambert en vue de sa superposition avec d'autres informations et de son introduction dans un SIG.

D'autre part, pour augmenter les possibilités de détails taxonomiques et d'exactitude, une bonne connaissance de terrain des deux agglomérations s'est avérée indispensable.

Le travail cartographique a été effectué sur les logiciels de traitement d'image ERDAS et IDRISI qui possèdent une série de modules très complets autant pour les méthodes numériques qu'analogiques.

3. Méthodologie

3.1. Choix méthodologique

La démarche méthodologique utilisée pour la réalisation de la carte écologique a été mise au point à partir de l'agglomération de Namur. Elle a été ensuite affinée pour l'agglomération de Charleroi, plus vaste et plus complexe.

Les informations brutes présentes dans les données de télédétection sont spectrales. Ce qui caractérisent les différentes données sont leur résolution et les gammes du spectre électromagnétique pour lesquelles des valeurs de réflectances sont disponibles.

En zone bâtie, les valeurs spectrales présentes sur les photographies aériennes ou dans les images satellitaires sont en relation avec les matériaux de construction des bâtiments. Il n'existe aucun lien entre ces valeurs et l'utilisation de la portion de zone bâtie correspondante : les propriétés spectrales d'une habitation ne sont pas nécessairement différentes de celles d'une industrie. Dans le cas de la végétation, l'occupation et l'utilisation du sol sont en relation avec les propriétés spectrales de la parcelle de terre : une zone possédant des valeurs spectrales homogènes est occupée par un certain type physionomique de végétation et utilisée à une seule ou plusieurs fonctions semblables sur toute sa surface.

Dans le cadre de notre travail, une carte qui indique l'utilisation du sol présente beaucoup d'intérêt puisque certaines fonctions, par exemple industrielle, ont des conséquences directes sur la qualité de l'environnement d'un lieu. Les aspects fonctionnels des bâtiments sont souvent plus importants que la détection des matériaux de construction.

En fonction de cette distinction entre occupation et utilisation du sol, la zone bâtie nécessite une démarche méthodologique particulière, qui peut être différente de celle de l'étude des zones non bâties.

La taille des agglomérations est le second critère qui a orienté nos choix méthodologiques (tab. 1).

Pour les zones bâties, la technique de la photo-interprétation permet de profiter de la synergie entre les photographies aériennes et les images satellitaires : elle permet d'apporter des informations sur l'utilisation du sol. Elle apporte plus de détails que les deux autres techniques numériques de classification testées : la classification dirigée par maximum de vraisemblance et la classification non dirigée ou postassistée par ISODATA.

Tableau 1. Démarche méthodologique en fonction de la taille de l'agglomération

	Petite agglomération Namur 50 km^2	Grande agglomération Charleroi 130 km^2
Zone bâtie	Photo-interprétation	Photo-interprétation
Zone non bâtie	Photo-interprétation	Classification numérique après segmentation

Pour les zones non bâties, le choix méthodologique est moins évident du fait de l'absence de distinction entre occupation et utilisation du sol. Le choix dépend du niveau de détails souhaité dans les types physionomiques de végétation, mais aussi de la taille de la zone d'étude.

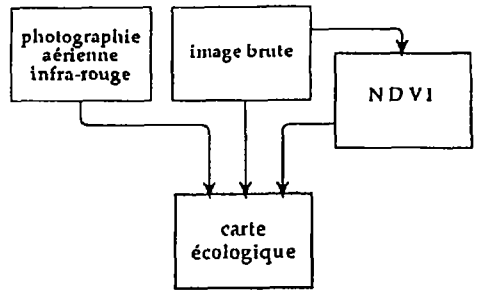
L'exploitation de la synergie entre les photographies aériennes et l'image satellitaire par la photo-interprétation permet d'identifier dix-sept classes de végétation (fig. 6-2a, voir cahier couleur). Lorsque la zone d'étude devient trop grande, le temps de traitements est une variable à prendre en compte dans les choix méthodologiques. Pour l'agglomération de Charleroi, plus vaste que celle de Namur, une segmentation de la zone d'étude a été réalisée pour adapter les techniques de classifications numériques aux réalités physiques et morphologiques des milieux typiquement urbain, périurbain et périphérique (fig. 6-2b, voir cahier couleur). Les démarches méthodologiques des cartes écologiques de Namur (fig. 6-2a, voir cahier couleur) et de Charleroi (fig. 6-2b, voir cahier couleur) sont présentés sur la figure 3.

3.2. Typologie par photo-interprétation

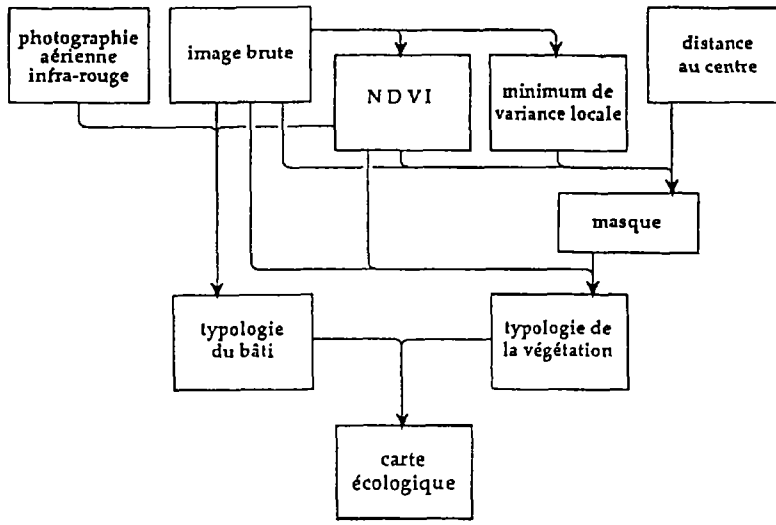
La photo-interprétation produit un zonage de l'espace (MICHEL et LORTIC, 1992). L'analyste identifie un objet sur la base de différents éléments de reconnaissance, la forme, la taille, la texture, la structure, l'ombre et la tonalité, résultant de la réflectance dans les différentes bandes de l'image ou de la photographie, de l'association et de la situation des différents objets (AVERY and BERLIN, 1992).

La clé de la photo-interprétation est un guide pour assister l'interprète; elle est composée de règles de sélection et de règles d'élimination, et elle permet de limiter la subjectivité de la démarche.

Après avoir bien analysé nos sources d'informations, une clé d'identification du bâti fut élaborée; elle reprend pour chaque classe ce qui la caractérise et ce qui la distingue des autres classes. Les critères proviennent le plus souvent des photographies aériennes infrarouges au 1: 25 000, mais aussi de l'image P+XS, la taille du pixel servant parfois de mesure de superficie et permettant de trancher vers l'une ou l'autre affectation. Les limites entre les classes sont justifiées également par des seuils sur l'image de l'indice normalisé de végétation (NDVI).



(a)



(b)

Figure 3. Démarches méthodologiques des cartes écologiques (fig. 6-2, voir cahier couleur) : a) Namur; b) Charleroi

Nous avons distingué huit classes d'habitations en fonction de son type de « verdurisation », c'est-à-dire en fonction du type, de l'abondance et de la répartition de la végétation dans l'environnement proche des habitations.

L'identification et la classification des zones industrielles sont d'un grand intérêt pour notre étude, car elles interviennent directement comme critère de qualité de l'environnement. Nous avons distingué sept groupes de zones industrielles. Outre les informations interprétées sur les photographies aériennes, ce travail nous a demandé de nombreuses visites sur le terrain et l'acquisition de documents.

Les différentes classes de la typologie de la végétation ont été discutées avec les écologues et inspirées de quelques lectures (BUDD, 1991; COOPER *et al.*,1991). C'est la

technique de la photo-interprétation qui permet d'obtenir le plus de précision taxonomique. Pour l'agglomération de Namur, de petite taille, une clé d'identification a été mise au point en se basant sur les photographies aériennes, sur l'image satellitaire, sur l'image du NDVI et en utilisant une segmentation de l'espace urbain pour distinguer les jardins. Dix-sept classes ont pu être identifiées. Pour l'agglomération de Charleroi, plus vaste, le temps mis pour réaliser une typologie de la végétation par photo-interprétation peut devenir excessif. Afin d'affiner la classification numérique, nous avons mis au point une segmentation de l'image.

3.3. Segmentation

L'intérêt d'une approche systémique, c'est-à-dire en segmentant l'espace en unités plus ou moins homogènes, est de pouvoir adapter les traitements de l'image aux réalités physiques et structurelles des différents milieux. Cette approche est connue en télédétection mais peu exploitée en milieu urbain (BARNSLEY *et al.*,1993).

Il existe deux types d'approche de segmentation à l'aide des informations de télédétection : 1) une approche analogique qui consiste à tracer visuellement sur l'image les limites entre les deux milieux, les critères visuels sont souvent difficiles à définir ou 2) une approche numérique, reproductible et le plus souvent basée sur des critères spectraux, texturaux et contextuels. C'est suivant cette seconde approche que nous avons cherché à travailler.

Un des indices de séparabilité entre la zone typiquement urbaine et la périphérie est le degré de minéralité et la structure spatiale de la végétation. Le milieu urbain est très minéral, avec une forte densité du bâti, les jardins ou espaces verts y sont de petites tailles. Dans le milieu périurbain, les jardins, les espaces verts, ou les zones boisées sont de plus en plus fréquents. En milieu rural, on retrouve de grandes cultures et des forêts. Cette différenciation peut être abordée par une analyse de l'information spectrale présente sur les images satellitaires.

Un autre indice de segmentation des zones est la taille des éléments composant le paysage urbain. Sur l'image satellitaire, cet aspect peut être étudié par la taille des zones spectralement homogènes. Dans la partie typiquement urbaine, les valeurs spectrales sont très hétérogènes à cause de la petite taille des objets structurant l'espace. Les zones périurbaines et rurales sont plus diffuses et des objets de plus grandes tailles y sont fréquents. L'étude de l'hétérogénéité spatiale peut se faire par télédétection grâce aux techniques de synthèse de l'information texturale.

Suite à une analyse de corrélation entre les différentes bandes, nous avons choisi le rapport de NDVI et les bandes XS1 et XS3 pour synthétiser les informations spectrales.

Pour les informations texturales, un essai fut réalisé avec des images de variance locale (DAWSON and PARSONS, 1994), pour les différentes bandes brutes et pour le rapport de NDVI. En zone rurale, les valeurs de variances locales sont généralement faibles. On peut observer cependant une ligne plus ou moins épaisse de forte variance marquant la limite entre deux cultures. Cette ligne met en évidence un changement spectral, alors que de part et d'autre de celle-ci, c'est la même occupation et utilisation du sol au sens large : classe culture.

Ce contraste spectral n'a pas de sens dans notre démarche : nous avons donc cherché à l'éliminer. Nous avons mis au point des images de minimum de variances locales. Lors de cette analyse, les valeurs des pixels correspondent à la valeur minimum des variances rencontrées dans leur voisinage proche.

Dans la définition même de l'urbain, du périurbain et du rural, on retrouve la notion de périphérie et de distance au centre-ville. Des informations contextuelles peuvent être

associées aux informations spectrales et texturales pour les compléter.

La notion de distance au centre fut introduite par une image théorique où la valeur de chaque pixel est égale à sa distance au centre.

Les bandes XS1, XS3, NDVI, les images de minimum de variance des bandes XS1, XS2, XS3, NDVI, l'image de distance, sont les huit synthèses des caractéristiques spectrales, texturales et contextuelles qui vont intervenir lors de la segmentation.

Une classification par ISODATA de ces huit bandes a ensuite été lancée; cette méthode permet de choisir le nombre de groupes que l'on désire obtenir et le classement se fait automatiquement par regroupement des pixels ayant des propriétés similaires.

Un schéma récapitulatif présentant les différentes étapes de la segmentation est présenté sur le tableau 2.

Tableau 2. Synthèse des informations en vue de la segmentation

Caractéristiques distinctives des différents milieux	Type de synthèse de l'information	Choix des informations de télédétection	Segmentation
- Minéralité/végétation	Spectrale	Choix des bandes : XS1, XS3, NDVI	Classification par ISODATA
- Taille des objets - Hétérogénéité	Texturale	Minimum de variances locales : mvarXS1, mvarXS2, mvarXS3, mvarNDVI	
- Distance au centre	Contextuelle	Image théorique de distance au centre	

3.4. Classification avec intégration de la segmentation

Le premier intérêt de cette segmentation fut de cerner l'emprise spatiale de l'agglomération de Charleroi. En effet, le périmètre urbain de Charleroi est difficile à définir. Historiquement, l'agglomération fut constituée par la conurbation de plusieurs noyaux villageois qui apparaissent encore dans le milieu périurbain sous forme de taches plus denses, alors qu'en d'autres endroits, le périurbain est plus lâche. La segmentation nous a permis de définir les limites du bâti de l'agglomération pour lesquelles nous avons effectué une typologie par photo-interprétation. Le second intérêt de cette segmentation est de pouvoir adapter les traitements numériques en fonction des caractéristiques des différents milieux typiquement urbain, périurbain et rural et des objets présents au sein de ceux-ci.

Un premier essai de classification numérique par maximum de vraisemblance sur l'ensemble des zones non bâties fut réalisé. Cette méthode nous a permis de distinguer six classes de végétation avec une précision médiocre (78 %).

Grâce à la segmentation, nous avons effectué une classification par maximum de vraisemblance des zones non bâties successivement urbaine, périurbaine et de la périphérie rurale. L'habitat dispersé rural n'avait pas encore été traité.

Nous avons pu l'identifier grâce à un seuil de NDVI adapté. En effet, les valeurs de réflectances de certains de ces mixels peuvent être proches de celles d'un jardin en zone typiquement urbaine. Pour les zones typiquement urbaine et périurbaine, les seuils de NDVI ont également été adaptés.

Ce type de segmentation peut s'avérer également très efficace dans les traitements postclassification. Un filtrage modal, c'est-à-dire qui élimine les pixels isolés et mal classés ne peut être appliqué de la même manière dans les trois milieux typiquement urbain, périurbain et rural. Ceux-ci sont en effet caractérisés par la taille des objets qui le composent.

4. Résultats

Pour chacune des deux cartes écologiques, nous avons produit une légende hiérarchique en trois niveaux. Le premier niveau comprend cinq sous-systèmes : le sous-système construit, le sous-système construit d'utilité publique, le sous-système industriel, le sous-système végétal (non agricole) et le sous-système agricole. Les classes appartenant aux trois premiers sous-systèmes ont été identifiées pour les deux agglomérations par photo-interprétation. Pour les sous-systèmes non construits, comprenant le sous-système végétal et le sous système agricole, la méthode de traitement utilisée est différente en fonction de la taille des agglomérations. Les niveaux de détails sont donc eux aussi variables d'une carte à l'autre : 18 classes de végétation pour Namur et 8 classes pour Charleroi.

La carte écologique de Charleroi présente un aspect un peu particulier puisqu'on y retrouve les résultats de deux techniques de traitement d'image : l'un analogique, la photo-interprétation qui produit un zonage de l'espace bâti, et l'autre numérique, par maximum de vraisemblance, après segmentation, qui produit une classification pixel par pixel. Le degré de précision n'est donc pas semblable sur l'ensemble de la carte.

L'intérêt de ces cartes est de mettre en évidence les différents types d'habitat en fonction de leur type de « verdurisation » : par exemple, les bâtiments d'habitations collectives, les habitations avec grands, petits jardins, les habitations pavillonnaires ouvertes ou de forêt. Elles apportent plus ou moins de détails sur les différents grands types physionomiques de végétation. Elles donnent une idée de l'utilisation du bâti, par exemple industrielle; elles mettent en évidence les grandes routes. Tous ces éléments sont des facteurs pertinents pour la détermination de la qualité de l'environnement.

5. Discussion et conclusion

Si on analyse l'approche utilisée pour réaliser notre carte écologique, on peut s'interroger sur la part d'informations apportées respectivement par les photographies aériennes et par l'image satellitaire HRV de SPOT. C'est grâce à la haute résolution spatiale des photographies aériennes et à la sensibilté de leur film dans l'infrarouge que nous avons pu apporter tant de détails et de précision à la classification.

Dans le cadre de notre étude, l'image HRV nous a servi de support à la numérisation. Corrigée géométriquement, elle représente une base de données sur laquelle on peut lire, traiter et ajouter une multitude d'informations.

D'autre part, il nous faut souligner la richesse des informations spectrales de l'image satellitaire et notamment pour l'étude de la végétation, les informations apportées par le rapport entre les canaux XS3 et XS2 : l'indice normalisé de végétation.

Si on compare les différentes méthodes de traitement, la photo-interprétation est celle

qui apporte le plus de détails taxonomiques et d'exactitude et c'est, d'autre part, la seule qui permet d'extraire des informations d'utilisation du sol.

La photo-interprétation est souvent critiquée pour son manque de rigueur, mais nous avons tenté d'y remédier par l'utilisation d'une clé d'identification basée sur le plus grand nombre de critères de sélection possible, tant analogique que numérique.

Par l'étude de deux agglomérations urbaines de taille différente, nous avons pu constater le caractère de plus en plus indispensable du numérique et de l'image satellitaire plus la taille de la zone d'étude augmente. Le temps mis pour réaliser la classification par photo-interprétation est long et ce facteur doit être pris en compte lors du choix d'une méthode de traitement. Pour l'agglomération de Charleroi, d'une superficie urbaine de 130 km^2, nous avons mis au point une méthode numérique après segmentation pour la classification de la végétation. Nous avons ainsi distingué 8 classes de végétation contre 18 classes par photo-interprétation et 6 par la méthode numérique simple. L'exactitude des différentes cartes a été estimée par le rapport entre le nombre de pixels bien classés et la taille de l'échantillon des pixels vérifiés. Les résultats sont les suivants : 78 % pour la méthode numérique simple, 84 % pour la méthode numérique après segmentation. Nous n'avons pas proposé de seuil d'utilisation ou non de cette méthode par rapport à l'étendue de la zone d'étude car ce choix est toujours à mettre en relation avec les objectifs et les disponibilités de l'étude.

Nous avons mis au point une méthode de segmentation qui tient compte des particularités urbaines, de la variabilité de la nature physique des éléments qui la composent, de la répartition et de la taille des objets structurant l'espace et de leur distance au centre-ville. Le milieu urbain est par définition hétérogène et composé d'une imbrication d'éléments. Une des manières d'augmenter la précision des classifications numériques est d'essayer de segmenter l'espace urbain en fonction de paramètres spectraux, texturaux, et contextuels, et d'adapter ensuite les critères de la classification et de la postclassification à chacune des zones dites homogènes.

6. Références

AVERY, T.H. and BERLIN, G.L. 1992. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation. 5th Edition, Macmillan Publishing Company, 471 p.

BARNSLEY, M.J., BARR, S.L., HAMID, A., MULLER, J., SADLER, G.J. and SHEPHERD, J.W. 1993. Analytical tools to monitor urban areas. Chapter 13 *in* Geographical Information Handling, Research and applications. Edited by Paul M. Mather, John Wiley & Sons, p. 147-183.

BUDD, J. 1991. Remote sensing techniques for monitoring land-cover. Chapter 3 *in* Monitoring for conservation and ecology, F.B. Goldsmith, Clapman and Hall, London, p. 33-59.

COOPER, A., MURRAY, R. and McCANN, T. 1991. Bioindicators and environnemental management. D.W. Jeffrey and B. Madden, Ireland, Academic Press, p. 207-224.

DAWSON, B.R.P. and PARSONS, A.J. 1994. Texture measures for the identification and monitoring of urban derelict land. International Journal of Remote Sensing, vol. 15, n° 6, p. 1259-1271.

MICHEL, A. et LORTIC, B. 1992. Typologie urbaine et télédétection satellitaire : la notion de zones en milieu urbain. L'Espace géographique, n° 2, p. 167-178.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 75-83

7

Caractérisation de la réponse du bâti : application au complexe urbain de Blida (Algérie)

ABDELKADER ABDELLAOUI [1] et ABDERRAZAK ROUGAB [2]

[1] *Département de géographie, Institut des sciences de la Terre, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (USTHB), B.P. 32, El Alia, Alger, Algérie; téléphone : +213 (2) 51-55-75*

[2] *Département de génie électrique, École normale supérieure de l'enseignement technique (ENSET), B.P. 37G, 03000 Laghouat, Algérie; téléphone : +213 (9) 93-17-91*

Résumé

Dans le présent travail, nous avons pour objectif la caractérisation de la réponse du bâti à partir d'images HRV de SPOT. Le complexe urbain de Blida est pris comme zone pilote, dans une première étape. À cet effet, divers algorithmes de traitement (classifications, filtrage, rehaussement, recherche de contours) nous ont permis en premier lieu de délimiter la tache urbaine et les principales artères. Ces traitements n'ont toutefois pas permis de lever les confusions entre le bâti et d'autres thèmes présents dans l'image, notamment au niveau de l'espace périurbain et dans les zones où le bâti a une densité faible ou très faible. Nous avons alors tenté de caractériser la réponse du bâti par d'autres procédures et de déduire un indice du bâti inspiré de formules d'indices de végétation. L'étude de l'hétérogénéité du pixel nous a permis par la suite d'appréhender son effet sur la perception des surfaces bâties. L'application de ces résultats a conduit à une amélioration de la distinction des foyers urbains en zone éparse et en espace périurbain.

1. Introduction

Estimée à 10,2 millions en 1962, la population algérienne a atteint 16,9 millions en 1977 et avoisine 23 millions au recensement de 1987. Cette croissance démographique sans précédent, de plus de 3,8 % en moyenne par an pour la période 1962-1977 et de 3,1 % par an pour la période 1977-1987, s'accompagne en même temps d'un exode massif de population en provenance des hauts plateaux et des montagnes vers les riches plaines côtières du Nord, vers les métropoles et, dans une moindre mesure, vers le Sud.

Le mouvement d'urbanisation s'emballe dès la décennie 1966-1977 et se maintient à un rythme élevé pour la décennie suivante. Ainsi, le taux d'urbanisation du pays passe de 25 %, en 1954, à 31,4 %, en 1965 (seules 95 communes sont alors classées urbaines), puis à 40 % de la population totale, en 1977, pour atteindre 50 %, en 1987. Le nombre d'agglomérations classées urbaines passe de 209 unités, en 1977, à 447 unités, en 1987. Ces transformations se traduisent en fait par la croissance ou la multiplication des petites et moyennes unités urbaines (tab. 1). À titre d'exemple, l'agglomération blidéenne a connu une croissance démographique très forte. Sa population passe en effet de 30 000 habitants, en 1954, à plus de 150 000 habitants, en 1987, soit une multiplication par cinq pour une période de trente ans. Cette augmentation de population a induit un processus d'extension des surfaces bâties de manière à la fois rapide et souvent spontanée. On remarque en effet beaucoup de constructions illicites et d'apparitions incontrôlées de petits foyers urbains. Ceci conduit à un tissu urbain et des formes de croissance non conformes aux schémas prévus et rendent difficile le suivi de l'évolution de l'occupation de l'espace en environnement urbain par des moyens classiques car les documents réalisés sont vite dépassés. L'image satellitaire, moyennant une exploitation appropriée, apparaît alors comme un instrument efficace pour l'analyse de l'évolution de l'occupation de l'espace urbain ou périurbain.

Tableau 1. Évolution des parts de population regroupée selon les tailles de villes durant la période 1966-1987

	Population regroupée en %		
Année	1966	1977	1987
Plus de 100 000 habitants	46,2	46,0	38,7
50 000 à 100 000 habitants	15,5	15,5	16,4
Moins de 50 000 habitants	38,3	38,5	44,9

En fait, les applications urbaines et périurbaines de la télédétection sont relativement récentes. Les satellites de la première génération possédaient une faible résolution spatiale ne répondant pas aux besoins des planificateurs dans le domaine urbain (CHARBONNEAU *et al.*, 1991). La venue du satellite SPOT semble offrir de nouvelles possibilités dans ce domaine. Cependant, un gain en résolution n'améliore pas forcément l'exactitude de la classification dans une zone résidentielle (CUSHNIE, 1987) et une résolution de l'ordre de 5 à 10 m introduit plus de bruits (très haute variabilité interne) qu'une résolution de 20 m (BUCHAU and HUBBARD, 1986). Ces difficultés sont accentuées dans le cas d'environnements spécifiques tels que des zones de transition entre géosystèmes différents, des zones de montagne ainsi que dans le cas d'agglomérations éparses. Ces confusions sont notamment dues à la similitude relative des réponses spectrales des thèmes présents dans

le paysage (sol nu, bâti, jachère, route). Il est dès lors nécessaire de trouver des algorithmes spécifiques permettant d'accentuer les petites différences entre ces réponses spectrales.

2. Particularités de la zone

Le complexe urbain blidéen est situé à une quarantaine de kilomètres de la capitale, Alger. Il est issu de l'absorption, par l'ancienne ville de Blida, des foyers urbains satellites autrefois bien différenciés : Jointville, Guerrouaou, Ouled Yaîch, Béni Tamou et Soumaa. La proximité de la métropole et des centres de décision induit un taux élevé d'accroissement de la population (26 % pour la période 1948-1954, 99,8 % pour la période 1954-1966, 65 % pour la période 1966-1977 et 38 % pour la période 1977-1987) et l'apparition continue de foyers urbains secondaires dans la zone de plaine. La situation géographique particulière au piémont de l'Atlas blidéen favorisait l'extension des surfaces bâties aux dépens des zones agricoles. Si la tache urbaine principale (densité forte du bâti) peut être aisément mise en évidence et délimitée à partir de l'image HRV de SPOT par des traitements classiques, les foyers urbains secondaires sont, par contre, difficilement discernables des autres thèmes de l'espace périurbain à cause des confusions avec les parcelles en jachère et avec les sols nus. Les serres apparaissent également avec une réponse très voisine des surfaces bâties et leurs formes géométriques augmentent leur confusion avec le bâti (apparence de bâtiments).

3. Caractérisation de la réponse du bâti

3.1. Analyse préliminaire

La localisation du site urbain principal et des échantillons d'analyse sur l'image a été réalisée à l'aide d'une carte topographique au 1: 200 000 établie en 1963 et d'une carte des limites administratives de la wilaya de Blida réalisée en 1989 par l'Entreprise nationale des études hydrauliques (ENHYD). Les échantillons sont choisis sur des zones homogènes pour les différents thèmes présents sur l'image ainsi que sur des surfaces non homogènes dans le but d'analyser l'effet de l'hétérogénéité du pixel. L'analyse statistique des échantillons nous a permis de préciser les limites de classes des thèmes. La réponse de la végétation se distingue nettement de celles des autres thèmes (tab. 2).

Tableau 2. Limites des classes et valeurs moyennes des réponses en compte numérique des thèmes principaux de l'image de Blida; le thème végétation est bien différencié

	XS1		XS2		XS3	
	Limites de classes	Valeur moyenne	Limites de classes	Valeur moyenne	Limites de classes	Valeur moyenne
Végétation	39-58	45,7	28-48	32,8	86-131	111,9
Bâti	66-100	82,5	65-106	83,3	53-82	74,4
Route et piste	49-77	59,8	38-73	54,5	72-100	86,1

L'analyse comparative des histogrammes d'occurrence dans chacun des trois canaux fait apparaître des formes particulières pour le thème urbain. En effet, les histogrammes du bâti (fig. 1a) dans les trois canaux ont des formes quasi régulières ou gaussiennes centrées pratiquement sur une même valeur de compte numérique égale à 70. Par contre, les trois histogrammes de la végétation (fig. 1b) ont des formes moins régulières à cause de l'hétérogénéité spectrale du thème.

Dans une représentation graphique du canal XS2 (rouge) par rapport au canal XS3 (proche infrarouge), le thème bâti se situe légèrement en dessous de la droite des sols (fig. 2).

3.2. La réponse du bâti

Les courbes de réponses spectrales de la végétation, de l'eau et des sols nus sont classiques (courbes expérimentales établies en laboratoire). Elles sont utilisées soit pour définir des indices spécifiques (indices de végétation, par exemple, droite des sols) ou pour aider à l'interprétation des images multibandes. Il n'en est pas encore de même du thème urbain à cause notamment de la difficulté d'en préciser une réponse caractéristique simple.

Afin de représenter au mieux la réponse de la surface bâtie, nous avons sélectionné plusieurs fenêtres de taille 3x3 dans les zones urbaines denses sur l'image de Blida. Des fenêtres ont été également sélectionnées pour les thèmes végétation et route. La figure 3 permet de comparer les réponses moyennes en compte numérique (CN) relatives des trois thèmes (1- végétation, 2- route et 3- bâti). On peut remarquer que la réponse en compte numérique du bâti (3) varie peu sur l'intervalle des trois canaux du capteur HRV de SPOT et que cette courbe croît très légèrement sur le canal XS2.

3.3 Définition d'un indice du bâti

Un indice du bâti devrait traduire les faibles variations de la réponse du bâti dans le visible et le proche infrarouge, accentuer la différence de réponse entre le bâti et les autres thèmes de réponses voisines (sol nu, piste, route) tout en prenant en compte le caractère hétérogène du thème (différents matériaux de construction, différents stades de réalisation de la construction).

La réponse des sols nus se traduit globalement par une fonction légèrement croissante dans l'intervalle 500-950 nm (HINSE *et al.*, 1989). La réponse de l'eau est, par contre, décroissante dans cet intervalle et tend vers zéro dans le domaine de l'infrarouge. La présence d'eau dans le sol se traduit par une réponse intermédiaire. La réponse de l'urbain présente, dans l'intervalle 500-950 nm, un léger maximum aux environs de 650 nm (ABDELLAOUI *et al.*, 1994). Ainsi, la différence PIR-R (proche infrarouge - rouge) se traduit par des valeurs faibles, négatives pour l'urbain et pour des sols humides et positives pour des sols secs; mais ces valeurs sont toutes relativement proches et ne permettent pas de différencier ces thèmes dans une analyse d'image par des algorithmes de classifications ou l'application d'algorithmes spécifiques (indices de végétation par exemple, ACP). Partant de ces considérations, nous avons défini une combinaison de canaux pour accentuer la différence entre les valeurs absolues (PIR-R) pour les surfaces bâties et les sols; ceci conduit à proposer un indice des surfaces bâties (ISU) de la forme :

$$ISU = A - B * (R/PIR)$$

où A et B sont des constantes égales respectivement à 100 et 25 pour une image HRV de SPOT; R et PIR correspondent respectivement aux valeurs des canaux XS2 et XS3.

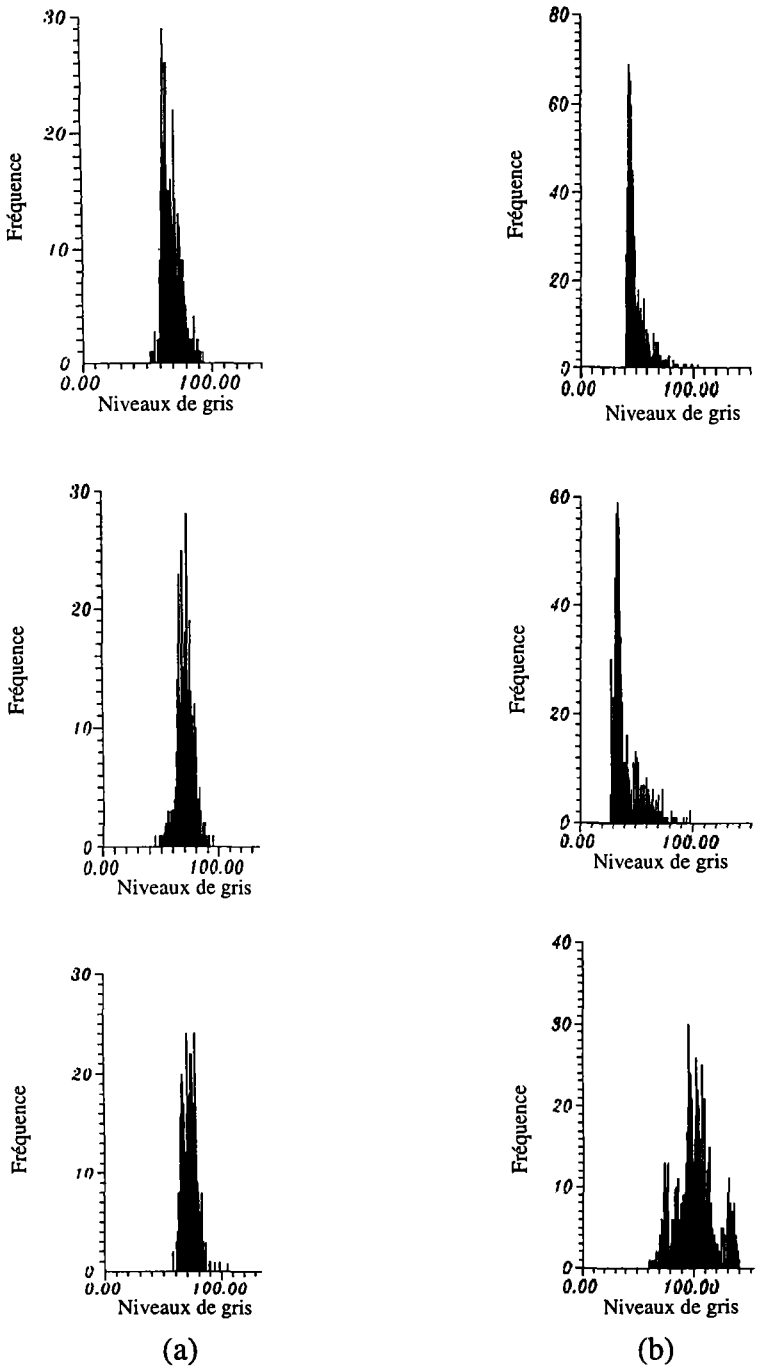


Figure 1. Histogrammes des trois canaux XS1, XS2, XS3 pour les deux principaux thèmes présents dans l'image: a) bâti-routes-pistes; b) végétation

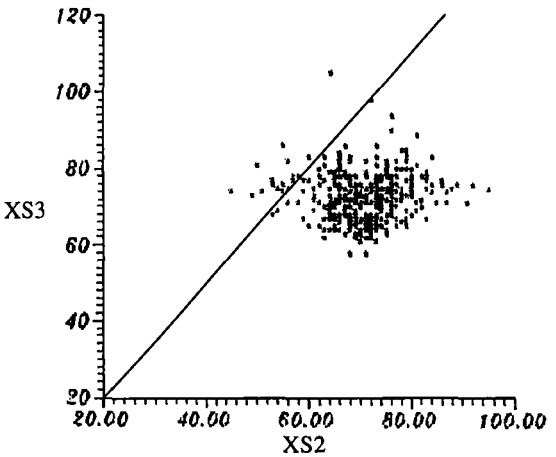


Figure 2. Représentation dans l'espace XS2-XS3 du thème bâti

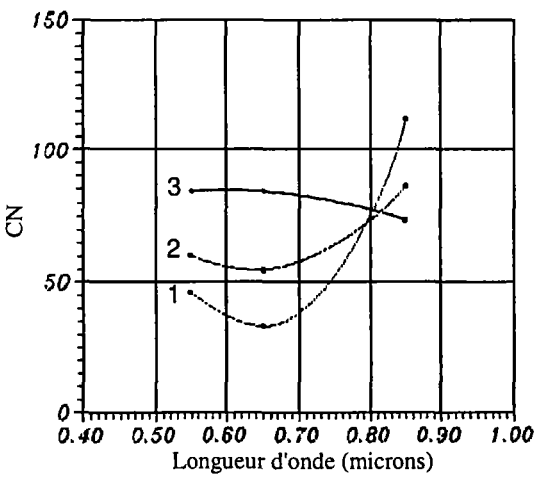


Figure 3. Réponses moyennes en compte numérique (CN) relatives des trois thèmes (1- végétation, 2- route et 3- bâti)

4. Présentation des résultats et discussion

Les traitements classiques (classifications, compositions de canaux) permettent de mettre en évidence la tache urbaine en zone d'habitat dense telles le centre urbain de Blida ou la zone de Béni Méred au nord de la ville de Blida. Les voies de communication (voie ferrée, route nationale et grandes artères) sont également discernables. Cependant, en zone éparse, les surfaces bâties sont confondues avec les sols nus, les terres non labourées et les zones

de serres. L'application d'indices de végétation ne permet pas de lever ces ambiguïtés comme on le voit sur la figure 4 qui représente l'indice de végétation par différence normalisée NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Des analyses spécifiques de détection de contour peuvent aider à distinguer les sols non labourés en zones agricoles des serres (contours réguliers) et des surfaces bâties (existence de nombreux micro polygones).

L'application de l'indice des surfaces bâties ISU à l'image de Blida a permis d'améliorer l'analyse de l'environnement urbain. En zone d'habitat dense, la surface bâtie se distingue plus nettement de son environnement. Les voies de communication apparaissent avec un aspect différent de la construction (cas des pistes d'aérodrome; fig. 5). En zone éparse, notamment en zone agricole, les sols nus (champs non labourés) se différencient des constructions comme on le voit sur la figure 6 qui représente une fenêtre agrandie de l'image de l'indice ISU. La réponse des serres reste très voisine de celle des constructions pour notre zone d'étude et nous n'arrivons pas encore à différencier ces deux thèmes. Cependant, la forme très régulière des serres et leur taille (de l'ordre de deux à trois pixels) permet de les distinguer des foyers urbains secondaires ou en formation.

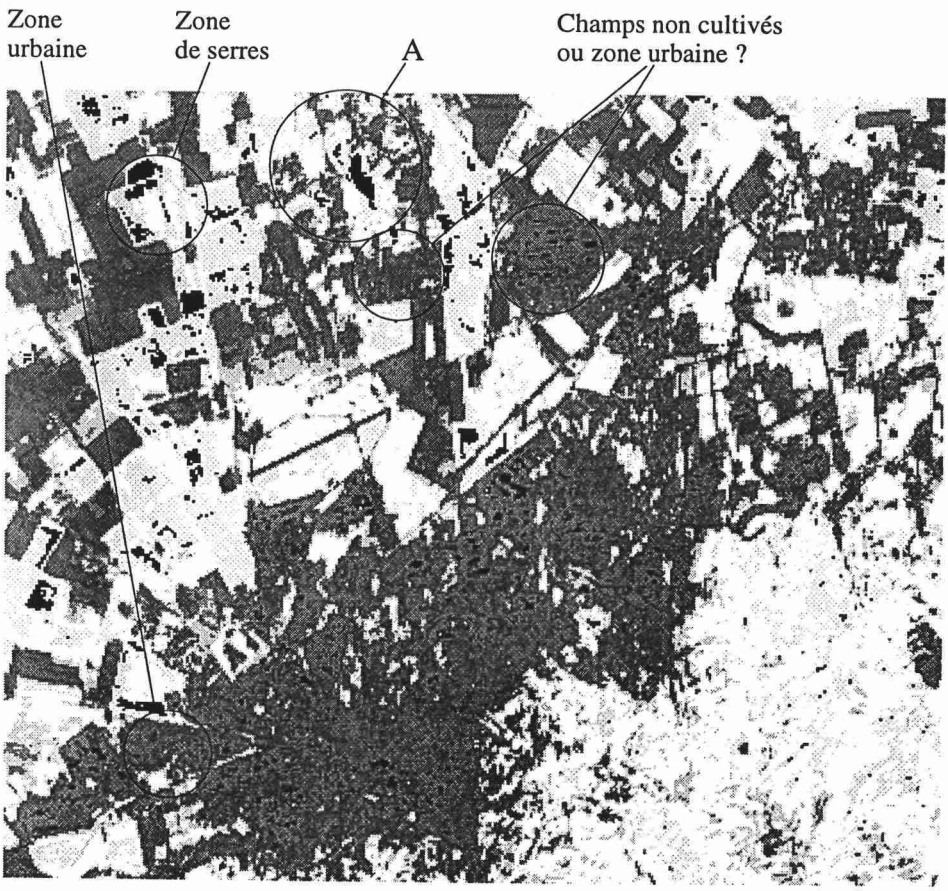


Figure 4. Image NDVI de Blida; cette image ne permet pas de lever les confusions de thèmes en zone éparse (exemple de la zone A)

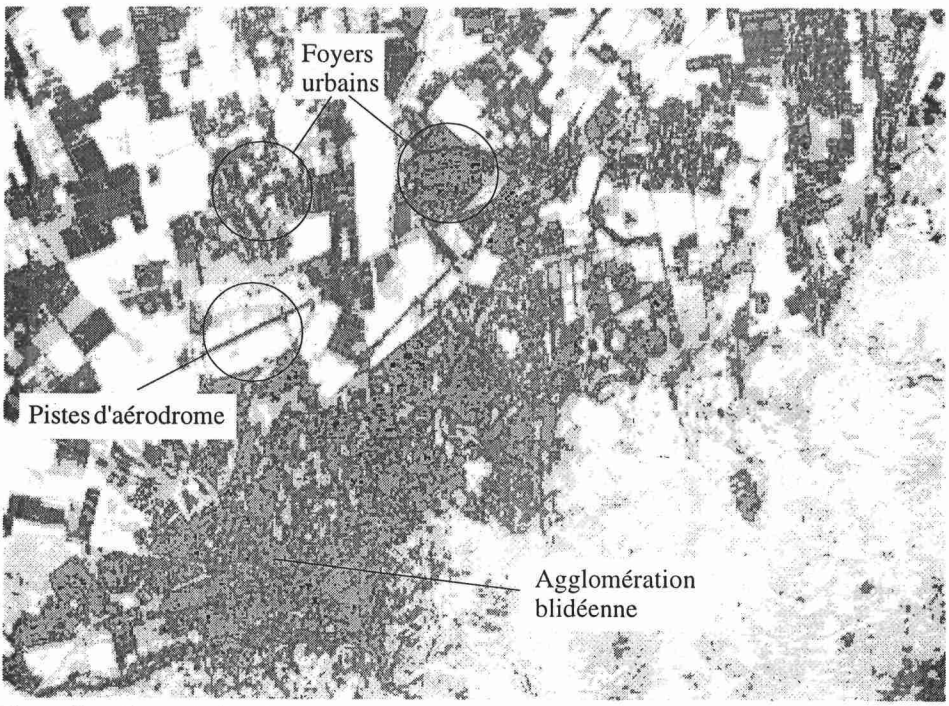


Figure 5. Image indice du bâti

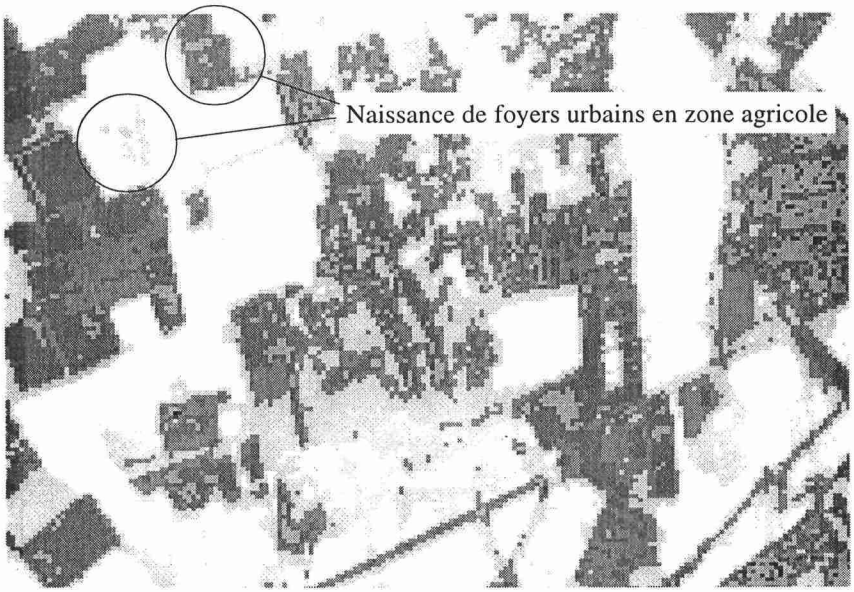


Figure 6. Agrandissement de l'image indice du bâti en zone éparse

5. Conclusion

Les zones de transition montagne-plaine en pays à fort taux de croissance démographique se caractérisent souvent par un processus de rivalité entre l'activité agricole et la demande en logements qui se traduit par une extension urbaine notable (croissance de la métropole et des taches urbaines principales et apparition de foyers urbains secondaires en périphérie ou autour de fermes). Outre l'utilisation de techniques classiques (photographies aériennes, enquêtes, levés), la télédétection (notamment les images à haute résolution et les algorithmes appropriés) peut s'avérer un outil complémentaire efficace pour le suivi de l'extension des surfaces bâties. Même si la complexité du thème urbain limite les investigations, la mise au point d'algorithmes particuliers, tel l'indice des surfaces bâties (ISU) permet de lever un certain nombre d'ambiguïtés dans la différenciation de l'urbain, notamment en zones d'habitat éparse et en zones de naissance de foyers urbains secondaires.

6. Références

ABDELLAOUI, A., ROUGAB, A. et BENTRIA, B. 1994. Caractérisation du bâti et SIG pour une agglomération à fort taux de croissance: cas de l'agglomération blidéenne. Colloque international « Télédétection, SIG et Formation », GDTA, Toulouse, France, 9-10 mai 1994.

BUCHAU, G.M. and HUBBARD, N.E. 1986. Remote sensing in land use planning : an application in west central scotland using SPOT simulation data. International Journal of Remote Sensing, vol. 7, n° 6, p. 767-777.

CHARBONNEAU, L., ROYER, A., HINSE, M., COULOMBE, A. et LAMBERT, É. 1991. Évaluation de la qualité des biotopes urbains par télédétection. 5e Colloque international sur les mesures physiques et signatures en télédétection, Courchevel, France, vol. 2, p. 493-496.

CUSHNIE, J. L. 1987. The interactivce effects of spatial resolution and degree of internal variability within land cover type on classification accuracies. International Journal of Remote Sensing, vol. 8, n° 1, p. 15-29.

HINSE, M., GWYN, Q.H., BONN, F., MERZOUK, M., BADRAOUI, M. et SERRAOU, L. 1989. Réflectance spectrale des sols de Settat (Chaouia, Maroc). Actes Éditions, série « Travaux sur le terrain », Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Maroc, 132 p.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 85-92

8

Processus d'intégration de données TM de Landsat et SAR de ERS-1 appliqué à un site urbain et périurbain algérien

YOUCEF SMARA [1], JUERG LICHTENEGGER [2], AICHOUCHE BELHADJ-AISSA [1] et MOHAMED MAHROUR [3]

[1] *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) 51-55-75; télécopieur : +213 (2) 51-50-39*

[2] *Agence spatiale européenne, Institut européen de recherche spatiale (ESRIN), via Galileo Galilei, B.P. 64, 00044 Frascati, Italie; téléphone : +39 (6) 94-18-01; télécopieur : +39 (6) 94-180-361*

[3] *Département de géographie et d'aménagement du territoire, Institut des sciences de la terre, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El-Alia, Bab-Ezzouar, 16111 Alger, Algérie; téléphone : +213 (2) 51-55-75; télécopieur : +213 (2) 51-59-92*

Résumé

L'objectif de cet article est l'évaluation des techniques d'intégration de données multisources de télédétection. En effet, la combinaison et la complémentarité des données TM de Landsat et SAR de ERS-1 ont été envisagées en vue de l'amélioration de l'interprétation visuelle des données satellitaires dans le domaine des milieux urbains et périurbains de la zone présaharienne et plus précisément de la ville de Laghouat (Algérie) et de sa périphérie. Les résultats obtenus à partir des techniques telles que l'analyse en composantes principales et la transformation en intensité, teinte, saturation (ITS) sur des données TM seules ou intégrées à des données SAR, permettent un rehaussement qualitatif des images où les aspects urbains et les aspects périphériques, tels que la végétation, les zones ensablées et les oueds sont bien discriminés. L'apport de la composante radar sur le plan de la

discrimination des zones à rugosité différente est fondamental. Par ailleurs, la possibilité de pondération des données radar par rapport aux données optiques nous offre des résultats qui permettent de souligner les traits structuraux, font apparaître de nouvelles informations dans les zones humides, accentuent les phénomènes liés à la topographie et à la morphologie ainsi qu'un rehaussement remarquable du réseau hydrographique de la région.

1. Introduction

Les techniques d'intégration des images optiques et radar connaissent, ces dernières années, un grand développement sur les plans méthodologique et pratique (RIGNOT *et al.*,1991; BROWN *et al.*, 1993; SOLBERG *et al.*, 1994; CLEMENT *et al.*, 1993; HARRIS and MURRAY, 1990). En effet, devant l'accroissement de données satellitaires, il est devenu nécessaire de combiner les images de différents capteurs optiques et radar dans le but d'améliorer l'interprétation thématique à partir de l'information contenue dans ces images.

Les données optiques de télédétection fournissent des images multibandes contenant des informations sur l'occupation des sols. Le grand inconvénient dans l'acquisition de ces données est la dépendance de la lumière et la couverture nuageuse. La télédétection active radar, quant à elle, est capable de traverser les nuages et elle est indépendante du soleil. Les caractéristiques de l'imagerie radar sont la haute résolution spatiale, la bonne observation de la morphologie du terrain et la bonne distinction des zones humides.

Dans cet article, nous nous proposons de présenter un processus d'intégration de données TM de Landsat (janvier 1989) et SAR de ERS-1 (octobre 1992) appliqué à une zone présaharienne et plus précisément à la ville de Laghouat et ses environs.

2. Présentation de la zone d'étude

Le choix de la zone d'étude décrite (fig.1) a été dicté par la disponibilité des données multisources sur la région. Elle correspond à un carré d'environ 25 x 25 km, situé au nord du piémont sud de l'Atlas saharien, dans lequel se situe la ville de Laghouat.

La région choisie présente un intérêt remarquable car elle est considérée comme une zone de transition entre les reliefs montagneux et les plateaux présahariens (ESTORGES, 1965). Ce type de relief est aussi un domaine fragile soumis à l'agression de divers agents de dynamiques externes susceptibles de perturber gravement l'activité humaine, en particulier les dynamiques hydrique et éolienne. En effet, la ville de Laghouat, qui est une ville saharienne avec sa végétation dense et ses hauts palmiers (fig. 8-2, voir cahier couleur), présente déjà des signes d'ensablement sur sa bordure ouest. L'Homme, aussi, contribue à la dégradation du milieu par des aménagements mal conçus (épandages salins provoqués par l'étalement des eaux usées de l'irrigation en aval des zones cultivées) ou des techniques inadaptées aux conditions du milieu (techniques culturales essentiellement).

L'étude de la région a été réalisée en utilisant des cartes topographiques de différentes échelles (1: 100 000 à 1: 500 000 de 1958), des photographies aériennes (1: 50 000 de 1950) et des données satellitaires suivantes :

- données TM (30 x 30 m) issues de la scène 196/37 du 01-01-1989;
- données SAR/ERS-1 (12,5 x 12,5 m) de type PRI et GEC issues des scènes 6723/2925 du 28-10-1992 et 12234/2925 du 17-11-1993.

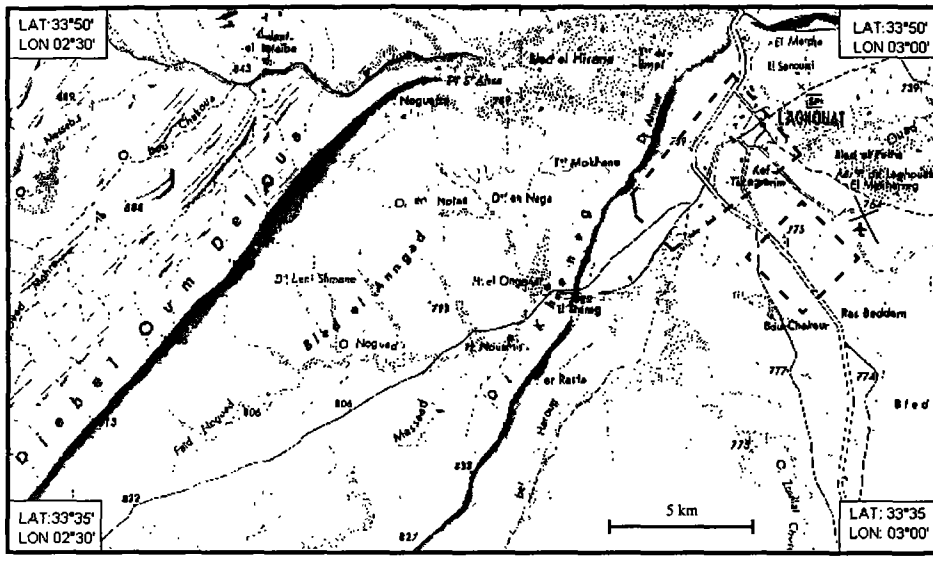


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

3. Méthodologie adoptée pour l'intégration des données

Les techniques de fusion d'images sont nombreuses (par exemple, MEHL *et al.*, 1994; POHL and VAN GENDEREN, 1994; HAACK and SLONECKER, 1994). Les procédures photographiques peuvent être utilisées pour le traitement des données (YÉSOU *et al.*, 1993), mais actuellement les méthodes numériques telles que les combinaisons linéaires et non-linéaires des canaux, l'analyse en composantes principales et la transformation ITS (intensité, teinte et saturation) figurent parmi les techniques essentielles du processus d'intégration de données multisources que nous proposons (fig. 3).

3.1. Prétraitements des données

Le prétraitement concernant les données TM est essentiellement axé sur l'amélioration de la qualité du contraste des images.

La première étape de prétraitement des données SAR correspond à la transformation des données 16 bits en données 8 bits et ce, afin de faciliter la manipulation ainsi que la combinaison avec les autres données optiques qui sont, généralement, sur 8 bits.

La seconde étape consiste à réduire le chatoiement inhérent aux images SAR car il est un des problèmes majeurs que soulève l'utilisation de ces images (LEE,1981; LOPES *et al.*,1990; CURLANDER and McDONOUGH,1991; FROST *et al.*,1982). Ce phénomène, le chatoiement, n'est pas un bruit au sens propre mais traduit, de façon déterministe, la nature même du champ électromagnétique. Le chatoiement se comporte comme un bruit multiplicatif dans le sens que le niveau de chatoiement augmente avec l'intensité de la rétrodiffusion radar. L'intensité du chatoiement obéit à la loi exponentielle négative

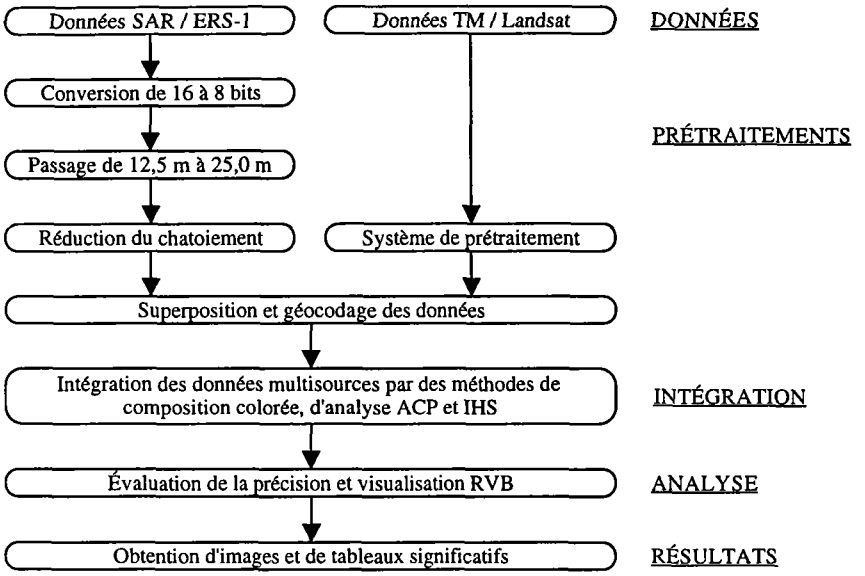


Figure 3. Schéma du processus d'intégration proposé

(GOODMAN, 1976) dont la fonction de densité de probabilité s'écrit de la manière suivante :

$$PDF(i) = (1 / \langle i \rangle \cdot \exp\{-1 / \langle i \rangle\}$$

où $\langle i \rangle = E\{i\}$ qui représente la moyenne de l'image.

Actuellement, les méthodes locales opérant dans le domaine spatial (dans une fenêtre allant de 3 x 3 à 11 x 11 pixels) sont utilisées dans la plupart des cas. Parmi celles-ci, les méthodes adaptatives dans lesquelles le filtrage s'adapte à la variance locale telles que les filtres E.P.S. (*Edge Preserving Smoothing*) (NAGAO and MATSUYAMA, 1980; KUAN *et al.*,1985; FROST *et al.*, 1982) et MAP (maximisant la probabilité *a posteriori*) sont les plus connus. Des résultats de ces filtres sont présentés sur la figure 4. Nous avons choisi d'utiliser le filtre de Frost (7 x 7) pour la suite de notre travail, car il permet de réduire le chatoiement tout en préservant des petites unités de forte rétrodiffusion très utiles pour la sélection des points d'appui lors de la rectification géométrique.

3.2. Superposition géométrique des données multisources

Une correction géométrique, pour la superposition des images TM sur les images SAR (géocodées et rééchantillonnées à 25 m) prises comme référence, a été effectuée à l'aide de plusieurs points d'appui. L'erreur résiduelle est inférieure à deux pixels au niveau des points d'appui. Par contre, elle est visiblement plus grande au niveau des zones à relief. La grande distorsion géométrique due aux problèmes de raccourcissement, de basculement et d'ombre dans les zones à relief (inhérents à la visée oblique et au principe de la géométrie

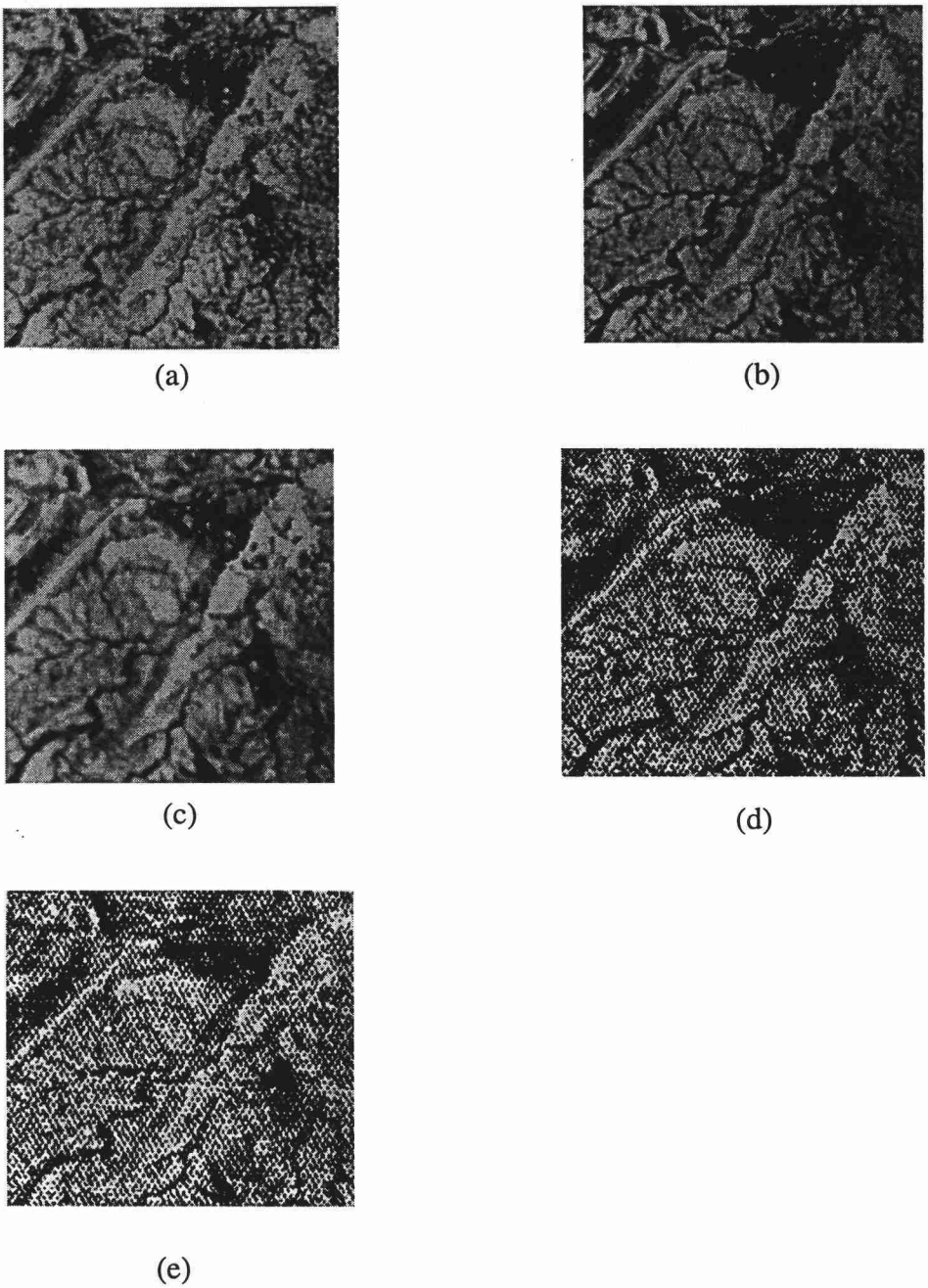


Figure 4. Images radar SAR de la zone de Laghouat : a) image originale; b) image filtrée par le filtre MAP; c) image filtrée par le filtre de Frost avec un masque de 7 x 7; d) image filtrée par le filtre EPS avec un masque de 5 x 5; e) image filtrée par le filtre de Kuan avec un masque de 5 x 5

de l'imagerie radar) ne nous a pas permis de localiser des points d'appui précis. L'absence de modèle numérique d'altitude sur les zones d'étude nous a limité dans la précision de la rectification des images et particulièrement dans les zones à relief telles que les djebel Oum Deloua et El-ahmar.

3.3. Analyse des données

En ce qui concerne les techniques d'intégration de données, nous avons utilisé l'ACP (analyse en composantes principales) pour l'intégration des données optiques (TM) et radar (SAR). En effectuant cette opération sur les données TM et SAR, nous obtenons des néo-canaux parmi lesquels le canal CP2 qui reprend quasi intégralement les données SAR (0,9964 du canal SAR original). Par contre, l'utilisation de l'ACP sur les canaux I.H.S obtenus nous a permis, à travers une composition des trois canaux de composantes principales, de discriminer plusieurs thèmes (fig. 8-5, voir cahier couleur), tels que les parties ensablées (en jaune) sur la bordure est du djebel Ahmar, les structures linéaires des routes et la zone industrielle (en blanc) et les zones de végétation (en orange).

Les méthodes d'intégration de données par la transformation ITS sont de plus en plus utilisées pour la combinaison de données multisources telles que les données satellitaires multibandes, les données géophysiques, géochimiques, etc. (HARRIS and MURRAY, 1990). La transformation I.H.S se réfère à la perception des paramètres de couleurs par l'être humain (GILLESPIE *et al.*,1986). Pour notre étude, la transformation ITS a été utilisée en appliquant celle-ci sur les canaux TM1,TM2 et TM3. Le résultat donné (fig. 8-6, voir cahier couleur) sous forme de composition colorée des canaux intensité, teinte et saturation décrit bien les structures linéaires de la ville de Laghouat ainsi que les zones sableuses ou sols nus (en rouge) qui montrent le risque d'ensablement du côté ouest de la ville. À partir de ces néo-canaux (I, H et S), nous remplaçons le canal intensité par des données radar du SAR et ensuite nous effectuons la transformation ITS inverse. Le problème majeur de l'intégration par la méthode ITS est la pondération donnée au canal de remplacement. Nous voyons que si le canal SAR seul est substitué au canal intensité, il prend un poids trop important lors de la transformation inverse et cela nous donne un résultat relativement limité en ce qui concerne la ville de Laghouat (fig. 8-7a, voir cahier couleur). Le réseau hydrographique environnant est, quant à lui, rehaussé de manière significative (fig. 8-7b, voir cahier couleur). De meilleurs résultats sont obtenus si le remplacement du canal intensité est réalisé par un canal issu de la combinaison proposée par YÉSOU *et al.* (1993) que nous avons adaptée pour l'imagerie TM qui est :

$$\text{canal substitut} = \alpha\,(\text{canal radar}) + \beta\,(\text{canal optique}) + \mu$$

avec α égal à 1 ou 2, β prenant les valeurs de 0, 1, 1,5, 2 ou 3 et μ étant pris à 0 ou à la moyenne du canal optique. Dans le cas présent, plusieurs tests nous ont permis de sélectionner le canal TM5 car il présente bien les aspects urbains et les infrastructures avec les paramètres $\alpha = 1$, $\beta = 3$ et $\mu = 0$. Le canal de substitution est donc égal à : SAR + 3 (TM5). En effet, le résultat (fig. 8-8, voir cahier couleur) nous donne une meilleure appréciation de la ville de Laghouat où les limites des thèmes sont plus nettes que sur la figure 8-7a (voir cahier couleur). En effet, nous remarquons les zones de végétation importantes en vert, les sites industriels à forte réflectance en rouge, la ville de Laghouat apparaît en rouge, vert et jaune, ce qui confirme bien la confusion entre le bâti et la végétation montrée sur la figure 2. Les zones sombres correspondent, quant à elles, globalement aux champs cultivables. La pondération proposée laisse apparaître une certaine saturation du blanc qu'il faudra réduire.

Les compositions colorées ont été effectuées sur la base d'un choix judicieux des canaux à composer. Plusieurs compositions colorées ont été élaborées avec différents canaux et dans différentes conditions de dynamique. La figure 8-9 (voir cahier couleur) montre la composition des canaux TM1 (en vert), TM4 (en rouge) et SAR (en bleu) où les aspects de rugosité apparaissent très nettement en bleu alors que les zones lisses correspondant aux zones sableuses apparaissent en jaune. Ces opérations nous ont permis une première appréciation des images comme nous pouvons le constater sur les résultats obtenus.

4. Conclusion

Combinées aux images multibandes, les données radar se révèlent très complémentaires. En effet, elles soulignent les traits structuraux et elles accentuent les phénomènes liés à la topographie et à la géomorphologie. La présente étude nous a permis d'obtenir des résultats qui restent tributaires de paramètres essentiels tels qu'un excellent géocodage de toutes les données (l'utilisation d'un modèle numérique d'altitude est nécessaire), un bon filtrage des données SAR ainsi qu'une normalisation de toutes les données pour une bonne intégration et enfin une vérification et une validation des méthodes proposées sur le terrain.

Ces résultats nous ont montré l'intérêt de combiner différents types de données pour une interprétation optimale des états de surfaces (luminosité, rugosité, géométrie, etc.) bien que l'étude de la ville de Laghouat est relativement difficile tant les aspects de l'urbain et de la végétation sont liés. Le site de la zone industrielle est bien visible de par sa structure différente par rapport au bâti. L'utilisation des données SAR pleine résolution (12,5 x 12,5 m) devrait améliorer sensiblement les résultats avec la condition d'un bon rééchantillonnage des données optiques.

5. Remerciements

Cette présente étude fait partie d'un projet de coopération entre le Laboratoire de traitement d'images de l'Institut d'électronique (USTHB) et l'Agence spatiale européenne (ESA). Les auteurs tiennent à remercier vivement cette dernière pour la mise à disposition des données SAR de type PRI et GEC ainsi que des moyens de calcul de l'Institut européen de recherche spatiale (ESRIN).

6. Références

BROWN, J. F., LOVELAND, T. R., MERCHANT, J. W., REED, B. C. and OHLEN, D. O. 1993. Using multisource data in global land-cover characterization : Concepts, Requirements and Methods. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 59, n° 6, p. 977-987.

CLEMENT, V., GIRAUDON, G., HOUZELLE, S. and SANDAKLY, F. 1993. Interpretation of remotely sensed images in a context of multisensor fusion using a multispecialist architecture. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 31, n° 4, p. 779-791.

CURLANDER, J. C. and McDONOUGH, R. N. 1991. Synthetic aperture radar : systems and signal processing. Wiley Series in Remote Sensing, Wiley & Sons, New York, 647 p.

ESTORGES, P. 1965. La bordure saharienne du djebel Amour. Travaux de l'Institut de recherche saharien, vol. XXIV, Alger, p. 31-46.

FROST, V. S., STILES, J. A., SHANMUGAN, K. S. and HOLTZMAN, J. C. 1982. A model for radar images and its application to adaptative digital filtering of multiplicative noise. IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. pami-4, n° 2, p. 157-165.

GILLESPIE, A. R., KAHLE, A. B. and WALKER, R. E. 1986. Color enhancement of highly correlated images. Decorrelation and H.S.I. constrast stretch. Remote Sensing of Environment, vol. 20, p. 209-235.

GOODMAN, J. W., 1976. Some fundamental properties of speckle. Journal of Optical Society of America, vol. 66, n° 11, p. 1145-1149.

HAACK, B. N. and SLONECKER, E. T. 1994. Merged spaceborne radar and thematic mapper digital data for locating villages in Sudan. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 60, n° 10, p. 1253-1257.

HARRIS, J. R. and MURRAY, R. 1990. I.H.S. transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56, n° 12, p. 1631-1641.

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. pami 7, n° 2, p. 165-177.

LEE, J. S. 1981. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. Computer Graphics and Image Processing, vol. 17, p. 24-31.

LOPES, A., TOUZI, R. and NEZRI, E. 1990. Adaptative speckle filters and scene heterogeneity. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, n° 6, p. 992-1000.

MEHL, H., MILLER, H. and REIMER, M. 1994. Application of ERS-1 and optical data for mapping of geological features in Argentina. Proceedings of second ERS-1 Symposium, 11-14 october 1994, Hamburg, Germany, p. 907-910.

NAGAO, M. and MATSUYAMA, T. 1980. A structural analysis of complex aerial photographs. Plenum Publishing Corporation, New York, 199 p.

POHL, C. and VAN GENDEREN, J. L. 1994. Geometric integration of multi-image information. Proceedings of second ERS-1 Symposium, 11-14 october 1994, Hamburg, Germany, p. 1255-1260.

RIGNOT, E. J. M., KOWK, R., CURLANDER, J. C. and PANG, S. S. 1991. Automated multisensor registration : Requirements and Techniques. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,vol. 57, n° 8, p. 1029-1038.

SOLBERG, A H. S., JAIN, A. K. and TAXT, T. 1994. Multisource classification of remotely sensed data : fusion of Landsat TM and SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, n° 4, p. 768-778.

YÉSOU, H., BESNUS, Y., ROLET, J., PION, J.-C. and AING, A. 1993. Merging Seasat and Spot imagery for the study of geological structures in a temperate agricultural region. Remote Sensing of Environment, vol. 43, p. 265-279.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 93-101

9

Segmentation d'images satellitaires par analyse spectrale et mesures texturales appliquées à des sites urbains algériens

AICHOUCHE BELHADJ-AISSA, MOSTEFA BELHADJ-AISSA et YOUCEF SMARA

Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (USTHB), B.P. 32 El-Alia, Bab-Ezzouar Alger, Algérie; téléphone : +213 (2) 51-55-75 (poste 806), télécopieur : +213 (2) 51-50-39

Résumé

Le travail présenté consiste en l'étude, l'implantation et l'évaluation d'un processus de segmentation spectrale-texturale d'images, extraites de scènes TM de Landsat et HRV de SPOT, correspondant à des sites urbains algériens. Les approches proposées sont : 1) l'approche par classification dirigée des images multibandes, pour une première identification des thèmes, utilisant la méthode de classement selon la distance de Mahalanobis; 2) l'approche d'analyse de texture par deux méthodes, l'une structurale basée sur le concept des unités de texture et l'autre statistique, permet de générer des images caractéristiques de la texture à partir des matrices de cooccurrence des niveaux de gris; 3) la troisième approche est la classification par combinaison de l'information spectrale et texturale. Deux aspects d'intégration sont étudiés, à savoir, la combinaison des images texturales et spectrales comme variables d'entrée à la classification paramétrique et l'intégration de la signature de texture dans la règle de décision de classement des pixels de l'image. Les procédures de segmentation d'images sont testées sur deux régions urbaines algériennes : Blida et Laghouat. La validation des traitements effectués est faite par comparaison qualitative des images résultantes aux photographies aériennes au 1: 20 000 et à la carte au 1: 50 000 pour Blida. Pour Laghouat, l'interprétation est basée sur la carte au 1: 200 000 et les observations relevées lors d'une sortie sur le terrain.

1. Introduction

L'information contenue dans les images de télédétection réside dans la réponse spectrale et dans l'organisation spatiale des objets. La donnée radiométrique des unités terrestres, sur plusieurs bandes spectrales, discrimine celles-ci selon leur couleur, leur composition minéralogique, l'humidité du sol, etc.; l'information spatiale complémentaire, quant à elle, informe sur la structure de ces unités à savoir, la rugosité, la forme ainsi que la connexité. En effet, la segmentation constitue une étape importante dans plusieurs applications d'analyse d'images de télédétection et se situe en préalable à la plupart des schémas d'interprétation pour l'identification et la quantification des différentes unités de la surface terrestre présentes dans l'image. Le principe de la segmentation d'images multibandes est de produire une répartition de celles-ci en régions possédant certaines caractéristiques d'homogénéité spectrale et structurale. Dans ce contexte, l'intérêt de l'intégration de l'information spatiale est dû au fait que les réponses des unités terrestres sont représentées par un ensemble de pixels de réflectances moyennes. Cependant, la segmentation basée sur l'analyse ponctuelle des différents pixels peut conduire à un taux de confusion important entre les classes. Les techniques souvent utilisées pour combiner les informations spatiales et spectrales sont l'insertion d'un ou de plusieurs paramètres texturaux sous forme d'images dérivées (néo-canaux), ou de signatures de texture dans les procédures de classification multibande.

Dans cet article, nous proposons une méthodologie de segmentation, appliquée à des images satellitaires représentant un milieu urbain et périurbain, dans laquelle les classifications purement spectrales ont été réalisées sur des images originales et des axes produits à partir d'une analyse en composantes principales. Une analyse texturale a été faite par deux approches : 1) les matrices de cooccurrence des niveaux de gris (MCNG) et 2) le spectre de texture. Une procédure de combinaison est établie avec un choix judicieux des paramètres texturaux.

2. Méthodologie adoptée

2.1. Zones d'étude

Les sites sélectionnés pour cette étude sont les villes de Blida et de Laghouat (fig. 1). La ville de Blida est située à environ de 50 km au sud d'Alger et présente un développement urbain important entouré par différents types d'occupation du sol (aéroport, parcelles agricoles, boisés, etc.) (fig. 2). L'image, sur trois canaux correspondant à cette ville est extraite d'une scène HRV de SPOT de 1986. La deuxième zone d'étude est la ville de Laghouat et ses environs, située sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien. Cette ville est d'une construction particulière intercalée par des palmiers et le milieu environnant est sableux avec quelques chaînons montagneux (fig. 3). L'image correspondante est extraite de la scène TM de Landsat de 1989. La taille des images traitées est de 256 x 256 pixels.

2.2. Analyse spectrale

La classification multibande constitue la première étape de l'analyse spectrale. Pour cela, nous avons implanté et appliqué le classificateur de Mahalanobis (RICHARDS, 1993) dont

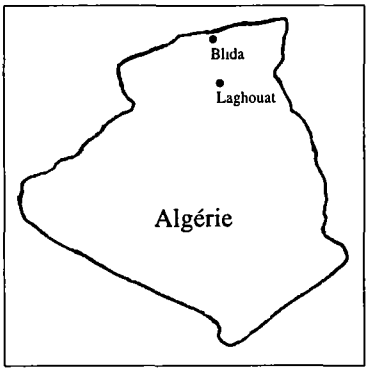


Figure 1. Localisation des deux régions d'étude : Laghouat et Blida

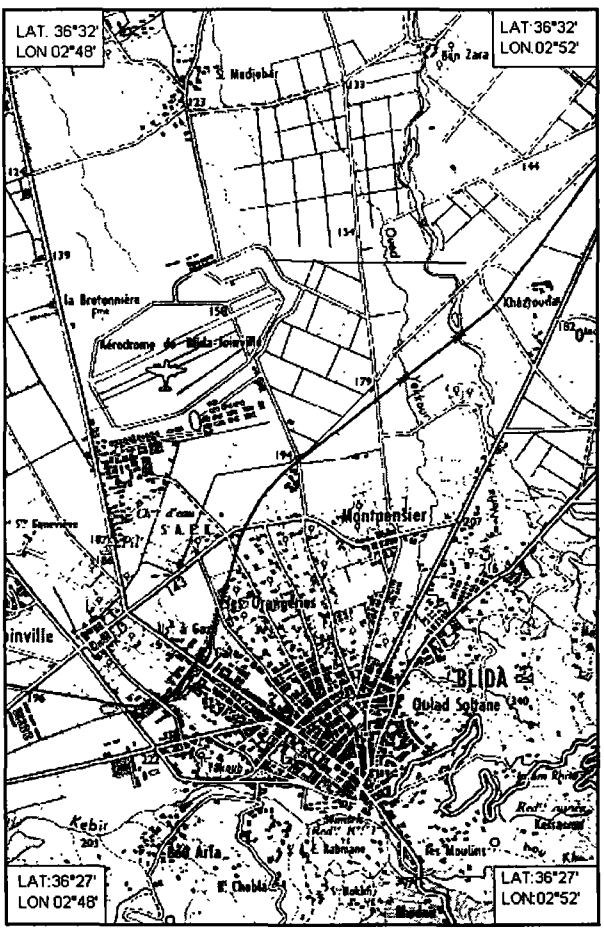


Figure 2. Carte de la ville de Blida

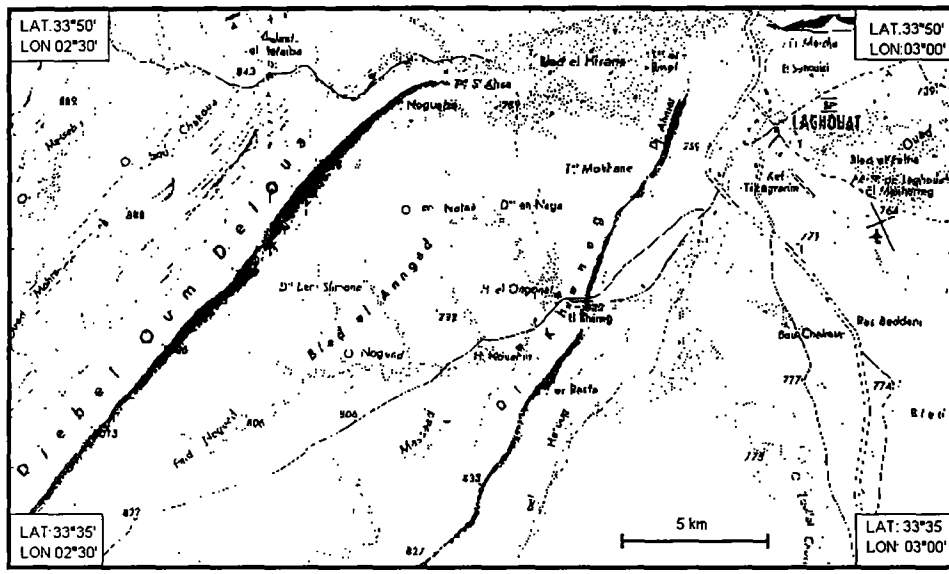


Figure 3. Carte de la ville de Lagouat (1956)

le carré de la distance estimée est donné par l'expression suivante :

$$d^2(X,Mj) = (X - Mj)^T C^{-1} (X - Mj) \quad (1)$$

où les composantes de vecteur $X = (X1, X2,...,XK)^T$ sont les radiométries du point dans chaque canal, Mj et C sont respectivement le vecteur moyen des niveaux de gris estimé pour la classe j et la matrice variance-covariance des classes; la règle de décision est : le pixel $X=(X1, X2,... XK)^T$ appartient à la classe j si $d^2(X,Mj) = \text{Min}\{d^2(X,Mc)\}$ avec $c = 1,...j...N$ (nombre de classes). Les paramètres M et C sont estimés à partir des échantillons d'entraînement représentant les classes prédéfinies. Pour la localisation des classes ainsi que le repérage et l'extraction des échantillons, une classification non dirigée (RICHARD and DEAN, 1988), dérivée de la méthode des « K-moyennes » convergentes est effectuée sur les deux zones d'étude afin de nous donner une répartition de l'état de surface. L'information complémentaire pour l'extraction des échantillons est issue des photographies aériennes. Par la suite, une classification avec les néo-canaux décorrélés dérivés de la transformée de Hotelling a été effectuée. La transformée de KL (RICHARDS, 1993) permet de générer des images décorrélées et de concentrer le maximum d'énergie dans les premiers axes de l'analyse en composantes principales (ACP). Ces deux premiers canaux ACP sont sélectionnés pour l'extraction des paramètres texturaux.

2.3. Analyse texturale

La notion de texture intervient dans de nombreux problèmes d'analyse, de classification et d'interprétation des images de télédétection. La texture est la propriété spatiale de premier niveau. Elle définit les relations entre les niveaux de gris dans un voisinage de pixels qui contribue à la formation de l'image. Plusieurs approches d'analyse, de

discrimination et de classification texturales ont été proposées et développées (HARALICK *et al.*,1973; FERNAND and ZHIGANG, 1992; WANG and HE,1990). Dans ces approches, on utilise différents concepts mathématiques, de la statistique d'ordre supérieur aux modèles stochastiques, markoviens et de Gibbs. Dans cet article, nous nous sommes intéressés à l'implantation et l'application des méthodes statistiques d'analyse de texture. La première méthode est basée sur la dépendance des niveaux de gris (matrice de cooccurrence) alors que la deuxième est basée sur le concept des unités de texture en intégrant l'information radiométrique dans les statistiques calculées.

La matrice de dépendance des niveaux de gris (HARALICK *et al.*, 1973) est construite par la fonction de densité de probabilité conjointe $F(i,j \mid d,q)$ dont la formation est la suivante :

$$F(i,j / d,\theta) = \#\{(x_1,y_1),(x_2,y_2) \in D / G(x_1,y_1) = i, G(x_2,y_2) = j \text{ pour } d \text{ et } \theta\} \qquad (2)$$

où D est défini par la fenêtre de traitement. Ces dimensions dépendent de la structure de l'image à analyser, (x_1,y_1) et (x_2,y_2) sont les coordonnées des deux pixels traités, séparés par la distance d, i et j sont les niveaux de gris des fonctions $G(x_1, y_1)$, $G(x_2, y_2)$ et θ est la direction d'analyse. Dans notre cas, nous avons calculé les matrices de cooccurrence pour deux tailles de fenêtre (5 x 5; 8 x 8) et, par ailleurs, pour ne pas privilégier une direction particulière, nous avons établi la matrice moyenne suivant les quatre directions principales (0°, 45°, 90°, 135°) et une distance $d = 1$ avec optimisation de l'espace mémoire en faisant un recodage vectoriel en fonction des niveaux de gris de la fenêtre. Ensuite, plusieurs paramètres texturaux de signification physique différente sont implantés et appliqués sur les néo-canaux 1 et 2 de l'ACP permettant ainsi la génération des images caractéristiques de la texture. Pour cette étude, nous avons utilisé l'entropie (*ENT*) et l'inertie (*INT*) (DESACHY, 1991) dont les expressions sont respectivement :

$$ENT = -\sum_{i=0}^{Ng-1}\sum_{j=0}^{Ng-1} F(i,j / d,\theta) \times \log\{F(i,j / d,\theta)\} \qquad (3)$$

$$INT = \sum_{i=0}^{Ng-1}\sum_{j=0}^{Ng-1} (i-j)^2 F(i,j / d,\theta) \qquad (4)$$

où Ng est le niveau de gris maximum. L'inertie donne une valeur élevée quand la probabilité de transition entre deux niveaux de gris est située de part et d'autre de la diagonale principale de la matrice de cooccurrence. En effet, l'inertie augmente quand la différence entre deux niveaux de gris devient importante. L'entropie, quant à elle, mesure le degré de « désordre » dans la transition entre deux niveaux de gris. La dynamique des images obtenues est normalisée entre 0 et 255 niveaux de gris afin de permettre, d'une part, une interprétation visuelle et, d'autre part, leurs combinaisons avec les images multibandes. La deuxième méthode de génération d'images de texture est basée sur le principe du spectre de texture (WANG and HE, 1990). La procédure est mise en oeuvre avec intégration du niveau de gris dans les expressions des paramètres texturaux. Un formalisme de normalisation est appliqué pour chaque image caractéristique. La méthode est développée comme suit : l'image d'entrée (premier axe de l'ACP) est recodée en trois niveaux de gris (0,1,2) en utilisant une fenêtre 3 x 3. Les valeurs (0,1,2) sont attribuées aux pixels de la fenêtre comme suit :

$$V_i = \begin{array}{l} 0 \text{ si } Ng_i < Ng_o \\ 1 \text{ si } Ng_i = Ng_o \\ 2 \text{ si } Ng_i > Ng_o \end{array}$$

où Ng_i ($i = 1,...8$) sont les niveaux de gris des pixels qui entourent le point central et Ng_o est le niveau de gris du point central.

La répartition des trois niveaux de gris dans la fenêtre 3 x 3 définit les unités de texture dont leurs attributs sont donnés par l'expression suivante :

$$U = \sum_{i=1}^{8} Vi \times 3^{i-1} \tag{5}$$

où Vi est la nouvelle valeur du point qui est égale à 0, 1 ou 2 et i indique la position de Vi dans la fenêtre 3 x 3. Le spectre de texture, défini sur un domaine Lx.Ly > 3 x 3, représente la fréquence d'occurrence $F(U_k / Ng_o)$ d'une unité de texture U_k ($k = 0,1,...6\ 560$) associée à un niveau de gris Ng_o dans Lx.Ly (KOURGLI et BELHADJ-AISSA, 1996). À partir de ce spectre, plusieurs paramètres sont calculés où chacun révélera un aspect de la texture. Pour cette étude, nous avons utilisé la symétrie absolue (*SA*) et symétrie d'orientation (*SO*) dont les expressions sont respectivement :

$$SA(Ng) = \frac{\{1 - \sum_{k=0}^{3\,279} |F(k,Ng_o) - F((6\,560 - k),Ng_o)|\}}{\sum_{k=0}^{6\,560} F(k,Ng_o)} \tag{6}$$

$$SO(Ng) = \{1 - 1/4 \sum_{m=1}^{4} \frac{\sum_{k=0}^{6\,560} |F_m(k,Ng_o) - F_{m+4}(k,Ng_o)|}{2 \times \sum_{k=0}^{6\,560} F_m(k,Ng_o)} \tag{7}$$

où $F(k,Ng_o)$ est la fréquence de présence, dans une fenêtre Lx.Ly, d'une unité de texture Uk dont le niveau de gris du point central est Ng_o. Les images dérivées des deux paramètres avec un domaine 8 x 8 et 16 x 16 et un pas de déplacement 1 mettent en évidence les parcelles de structures différentes.

2.4. Combinaison spectrale-texturale

Dans cette étape, le problème de l'addition de l'information contextuelle ou spatiale est considéré. Plusieurs aspects d'intégration sont étudiés, certains portent sur l'introduction d'information contextuelle sous forme d'images caractéristiques dans les procédures de classification multibande (MARCEAU *et al.*, 1990; HE *et al.*, 1994), d'autres portent sur la modélisation de la texture par une signature texturale estimée sur des parcelles échantillons. Cette information est intégrée dans la fonction discriminante d'un classificateur tel que : le minimum de distance, distance de Mahalanobis. En pratique, et quelle que soit la méthode adoptée, certains aspects sont à prendre en compte lors de la combinaison multibande à savoir : 1) les images texturales ont une résolution spatiale beaucoup plus faible que les données spectrales; ceci est dû au fait que les paramètres texturaux sont

extraits à partir d'une fenêtre contenant un groupe de pixels; les pixels des images de texture sont donc fortement corrélés spatialement; 2) étant donné qu'à partir d'une image monocanal, on peut créer plusieurs images texturales, comment alors peut-on intégrer toutes ces données avec les images multibandes? De plus, ces données sont dérivées de différents espaces de mesure n'ayant pas les mêmes significations physiques. En effet, la segmentation spatiale-spectrale obéit aux conditions suivantes : l'image est segmentée en régions X_i, $i = 1,..N$ telles que :

a) $\cup_{i=1}^{N} X_i = X$ (chaque pixel appartient à une des régions);

b) X_i est une région connexe pour tout i (chaque région est contiguë);

c) $P(X_i)$ est vrai pour tout i (cette condition définit les propriétés qui distinguent une région d'une autre au sens de niveau de gris et de la texture);

d) $P(X_i \cup Y_j)$ est faux pour $i \neq j$ (chaque région est distincte des autres).

Dans cet article, les schémas de segmentation contextuelle adoptés et testés sont : 1) la classification dirigée à partir des canaux originaux combinés à des images texturales qui sont l'entropie, l'inertie, la symétrie absolue et la symétrie géométrique prises séparément; pour la région de Blida, les images originales sont XS1, XS2, XS3 et pour la ville de Laghouat, les données utilisées sont les canaux TM1, TM5 et TM7; 2) la classification dirigée par intégration de la signature de texture dans la règle de décision de classement; en effet, les signatures de texture des parcelles échantillons de taille 8 x 8, sont déterminées sur les premiers canaux ACP; les dynamiques de ces derniers sont réduites à quatre niveaux de gris avec un choix judicieux des seuils. Les signatures de texture sont les éléments des matrices de cooccurrence des plans bit. La classification, dans ce cas là, revient à estimer les paramètres statistiques qui sont les moyennes et les variances sur la radiométrie des échantillons, et les moyennes et les variances à partir des signatures de texture. La règle de décision est que, pour un pixel donné $X = (X_1, Xn)^T$, la distance à la classe C_i est donnée par $d(X,C_i) = \alpha T + \beta R$ où T et R sont respectivement les paramètres déduits des signatures de texture et des radiométries des échantillons de la classe C_i. Les facteurs α, β sont des cœfficients de pondération de l'aspect textural ou spectral (DESACHY, 1991). Cette méthode de classification contextuelle ne présente pas l'inconvénient de la méthode de combinaison qui réside dans le choix des images caractéristiques à intégrer; en effet, c'est une méthode directe, cependant, la précision de la classification dépend de plusieurs facteurs, entre autres le seuillage à quatre niveaux de gris, la taille des échantillons qui entraîne la représentativité de la signature de texture, etc.

3. Résultats et discussions

Le résultat de la classification automatique au sens des « K-moyennes » convergentes est une initiation au processus de segmentation dans la mesure où il nous donne une première appréciation sur la partition des thèmes (fig. 9-4, voir cahier couleur). Cependant, le tissu urbain, dans le cas de l'image de Blida (fig. 9-4a, voir cahier couleur), est confondu avec les champs agricoles (parcelles situées en haut de l'image). Cette confusion s'est reproduite dans l'image résultat (fig. 9-5a, voir cahier couleur) de la classification au sens de Mahalanobis, mais d'autres classes sont mises en évidence telles que les structures linéaires comme l'aéroport et le réseau routier localisé à droite de l'image. Quant à la classification avec les axes ACP (fig. 9-5b, voir cahier couleur), la zone urbaine de Blida est bien discriminée des parcelles agricoles ainsi que de la région montagneuse (l'entrée de Chéfa est située au bas à droite de l'image). Elle est décomposée en plus de classes que

dans l'image précédente avec le réseau routier qui apparaît à l'intérieur du tissu urbain.

En ce qui concerne les résultats de l'analyse spatiale, les images sur la ville de Laghouat représentent respectivement l'inertie et la « symétrie absolue ». Ces paramètres sont calculés sur une fenêtre de 8 x 8 et l'image inertie (fig. 9-6a, voir cahier couleur) présente un aspect très hétérogène à l'exception des régions de sol nu (couleur bleu, bleu foncé et vert). La structure la plus hétérogène est celle des deux chaînons de montagnes dont le premier sépare la ville de Laghouat (partie centrale de l'image) en deux parties, l'ancienne ville à droite de l'image et la nouvelle ville à gauche. Le deuxième chaînon se trouve à gauche de l'image. Quant à l'image « symétrie absolue » (*SA*), l'information donnée par ce paramètre présente un aspect textural (fig. 9-6b, voir cahier couleur); son interprétation au sens identification des thèmes reste difficile dans ce cas-là, car la fenêtre d'analyse de 8 x 8 est petite pour évaluer les statistiques des unités de texture. Une fenêtre de 32 x 32, par exemple, donne une image plus interprétable en localisation de thèmes, mais l'inconvénient est que les pixels générés, formant cette image, sont fortement corrélés à cause de la résolution spatiale plus réduite. En effet, la précision de la classification multibande par combinaison de l'image *SA* de 8 x 8 est meilleure que dans le cas de *SA* avec 32 x 32. L'évaluation de la classification combinée est basée sur une interprétation visuelle par comparaison avec les photographies aériennes de 1992. La figure 9-7a (voir cahier couleur) est le résultat d'une classification avec XS1, XS2, XS3 et *SA* de la région de Blida : nous remarquons que le bâti est mieux identifié, particulièrement le bâti le plus dense (couleur rouge). L'image de la figure 9-7b (voir cahier couleur) est une classification purement texturale de la région de Blida : la particularité de ce résultat est que les thèmes sont regroupés dans des partitions spatialement plus larges. Par ailleurs, la partie montagneuse est représentée par une classe bien distincte (couleur rouge).

Ces résultats restent tributaires de plusieurs facteurs à considérer dans de telles méthodologies à savoir : 1) la représentativité des échantillons dans chaque cas nécessitant ces données; 2) l'influence de la quantification (passage de 256 à 4 niveaux de gris) sur la génération des images de texture; 3) l'influence de la taille de la fenêtre sur l'extraction de l'information spatiale; 4) le choix des paramètres texturaux en fonction du type d'image; 5) la disponibilité des données exogènes (données de terrain, cartes topographiques et thématiques, photographies aériennes, à des dates plus ou moins proches).

4. Conclusion

Le but de ce travail était la mise au point d'une méthodologie de segmentation des images multibandes avec l'exploitation de la réponse spectrale et de la structure spatiale des différentes unités terrestres. Les méthodes d'analyse de texture développées n'ont pas été utilisées que pour l'amélioration de la classification multibande mais aussi la distinction purement texturale. Cependant les méthodes de segmentation texturale trouvent leurs applications en géologie structurale. Par ailleurs, l'analyse multibande joue un rôle prédominant pour la caractérisation des états de surface avec une bonne résolution spatiale, tandis que l'analyse de texture apporte une information complémentaire pour améliorer la qualité de la classification. Les résultats de cette étude restent à valider par des mesures quantitatives sur le terrain.

5. Remerciements

Nous tenons à remercier le professeur DONG-CHEN HE, du Centre d'applications et de recherches en télédétection de l'Université de Sherbrooke, pour les conseils et les encouragements qu'il nous a prodigués.

6. Références

DESACHY, J. 1991. Interprétation automatique d'images satellites : le système ICARE. Thèse de doctorat d'État, Université Paul Sabatier, Toulouse.

FERNAND, S. and ZHIGANG, F. 1992. Maximum likelihood unsupervised textured image segmentation. Graphical Models and Image Processing, vol. 54, n° 3, p. 239-251.

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.

HE, D. C., WANG, L., BAULU, T., MORIN, D. et BANNARI, A. 1994. Classification spectrale et texturale des données d'images SPOT en milieu urbain. International Journal of Remote Sensing, vol. 15, n° 10, p. 2145-2152.

KOURGLI, A. et BELHADJ-AISSA, A. 1996. Approche structurale de génération d'images de texture. International Journal of Remote Sensing (sous presse).

MARCEAU, D. J, HOWARTH, P. J., DUBOIS, J.-M. and GRATTON, D. J. 1990. Evaluation of the grey-level cooccurrence matrix (GLCM) method for land-cover classification using SPOT imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, n° 4, p. 513-519.

RICHARD, A. J. and DEAN, W. W. 1988. Applied multivariate statistical analysis. Prentice-Hall International, p. 543-584.

RICHARDS, J. A. 1993. Remote sensing digital image analysis. Spinger-Verlag, Germany, 340 p.

WANG, L. and HE, D.-C. 1990. A new statistical approach for texture analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56, n° 1, p. 61-66.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 103-111

10

Transformée de Hough et morphologie mathématique : amélioration et performances

FARID ALILAT et SALIHA LOUMI

Laboratoire de traitement d'image, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El-Alia, Bab Ezzouar, 16111 Alger, Algérie; télephone : +213 (2) 51-55-75 (poste 806); télécopieur : +213 (2) 51-59-92

Résumé

Les améliorations proposées pour la transformée de Hough jusqu'à maintenant ont été axées principalement sur la quantification de l'espace de paramètres. Cependant, la bonne précision se fait au détriment de l'occupation mémoire et du temps de traitement. Pour résoudre ce problème, nous avons élaboré une méthodologie par laquelle, dans un premier temps, nous établissons les expressions fondamentales de l'espace mémoire et du temps de traitement et, dans une seconde étape, nous proposons une modification des paramètres dans ces deux expressions. L'algorithme développé a donné de bons résultats en gain, en espace mémoire et en temps de traitement tout en conservant la précision de la transformée de Hough avec la quantification diagonale. La méthodologie développée a été appliquée pour résoudre le problème de la séparation des routes en milieu urbain. La séparation des textures urbaines et rurales de l'image considérée est obtenue par la dimension fractale et la D-dimension estimées par la morphologie mathématique. L'image test utilisée est l'image HRV de SPOT de Grenoble. Les résultats sont présentés sous forme d'images et de données numériques.

1. Introduction

Le traitement de l'image se caractérise par le volume considérable d'informations à traiter. Nous nous sommes intéressés à une technique mathématique qui est la transformée de Hough, qui permet la compression des données, par le passage d'un espace à un autre espace. Elle a été reconnue comme une technique robuste pour l'analyse de l'extraction de formes, par sa résistance au bruit et par ses propriétés d'implémentation « hardware ». Toutefois, cette transformée présente l'inconvénient d'un espace mémoire occupé et d'un temps de traitement important. Afin de pallier à ces problèmes, nous proposons : 1) la réduction des champs des paramètres de Hough; 2) un choix adéquat du pas de quantification; 3) la réduction de l'information image par la morphologie mathématique.

2. Paramétrisation et quantification

La transformée de Hough permet de détecter, dans des images, la présence de courbes paramétriques appartenant à une famille connue, à partir d'un ensemble de points sélectionnés appelés points caractéristiques. La transformée de Hough associée à la famille de courbes F est la transformation g définie sur l'espace de paramètres Ω par :

$$g : M \rightarrow \Omega \tag{1}$$

M étant l'ensemble des points sélectionnés. Pour détecter une courbe quelconque, il faut paramétrer l'espace Ω. La paramétrisation utilisée est la paramétrisation normale ou polaire, qui exprime l'équation d'une droite par la relation :

$$\rho = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta) \tag{2}$$

L'ensemble des points constituant la droite, est représenté par un ensemble de sinusoïdes, qui se coupent en un seul point A de coordonnée (ρ,θ), caractéristique de la droite recherchée. Bâtir l'espace (ρ,θ) consiste d'abord à quantifier l'espace Ω. Un bon choix de la quantification doit : 1) garantir une bonne précision donc une bonne détection; 2) réduire l'espace mémoire; 3) réduire le temps de traitement.

Plusieurs quantifications ont été proposées : 1) la quantification dynamique de Slogan (MAITRE, 1985); 2) la quantification uniforme; RISSE (1989) propose $\Delta\rho = 1/N\ (N-1)^2$ et $\Delta\theta = 1/2(N-1)^2$; par contre YUEN (1991) suggère $\Delta\rho = 1$ et $\Delta\theta = 2/N$; 3) la quantification diagonale de LEUNG (1993) qui utilise $\Delta\rho = 1/2\sqrt{2}$ et $\Delta\theta = 1/2N$ où N est la taille de l'image carrée.

Pour notre part, nous avons proposé une variante de la quantification diagonale, qui tient compte des directions à détecter (MEZRED, 1994), le pas de quantification étant fonction de la direction.

3. Amélioration des performances de la transformée de Hough

Afin de pallier aux problèmes de l'importance de l'espace mémoire et du temps de traitement, nous proposons de réduire les champs de θ et de ρ, de prendre un choix adéquat du pas de quantification (LOUMI *et al.*, 1995b) et de réduire l'information de l'image par la morphologie mathématique.

3.1. Réduction du champ de θ

Pour $\theta \in [0,2\pi]$, toute droite est exprimée par un ρ positif. Cependant, si on considère une droite Δ_2 ayant $\theta_2 \in [\pi,2\pi]$, cette droite peut être vue comme la droite Δ_1 ayant $\theta_1 \in [0,\pi]$ mais avec un ρ_1 négatif. En effet pour :

$$\theta_2 = \theta_1 + \pi \tag{3}$$

$$\rho_2 = x \cos \theta_2 + y \sin \theta_2 \tag{4}$$

$$\rho_2 = x \cos \theta_2 + y \sin \theta_2 = -(x \cos \theta_1 + y \sin \theta_1) = -\rho_1 \tag{5}$$

le champ de θ a été réduit de moitié.

3.2. Réduction du champ de ρ

Jusqu'à présent le centre de traitement est considéré en haut à gauche, dans ce cas on a :

$$\rho_{min} = -N \text{ et } \rho_{max} = +N\sqrt{2}.$$

Nous proposons de déplacer cette origine au centre de l'image, ce qui nous permet d'écrire : $\rho_{min} = -N\sqrt{2}/2$ et $\rho_{max} = +N\sqrt{2}/2$. Nous obtenons donc un gain en espace mémoire de : $N(1+\sqrt{2})/N\sqrt{2} = 1,707$.

Nous avons donc adopté cette position pour origine.

3.3. Choix du pas de quantification

La quantification diagonale permet une détection précise des courbes. L'inconvénient de cette quantification est l'importance de l'espace mémoire occupé et du temps traitement. Nous proposons une variante de cette technique, qui fixe le pas de quantification suivant la direction des droites à détecter. Pour la détection des droites à 0°, 90° et 180°, nous proposons un pas de quantification (Δρ,Δθ) de (1,90°) et un pas de (1/√2,90°) pour les directions de 45° et 135° (fig. 1). Pour la détection des autres directions, nous adoptons la quantification diagonale.

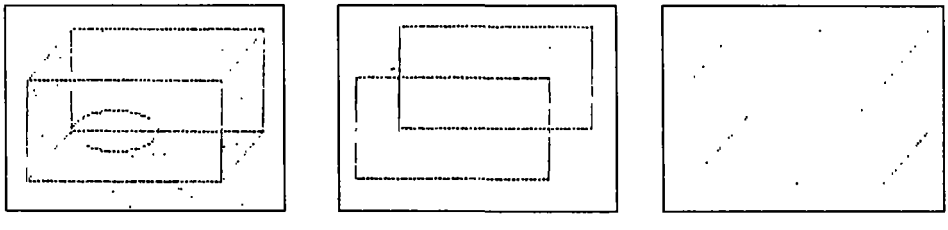


Figure 1. Variation du pas de quantification en fonction de la direction de la droite a) image originale; b) détection des directions 0°,90° et 180° avec un pas de quantification de (1,90°); c) détection des directions 45° et 135° avec un pas de quantification de (1/√2,45°)

3.4. Compression de l'information

Les représentations multirésolutions avec des techniques de morphologie mathématique sont celles qui conviennent le plus pour l'analyse des caractéristiques spécifiques de la taille et de la forme dans l'image. Nous avons considéré la dilatation comme transformation morphologique nous permettant de comprimer l'information contenue dans l'image (LOUMI *et al.*, 1995a).

Nous définissons l'opération de compression σ par :

$$\sigma = Z^2 \rightarrow S \tag{6}$$

$$F(x) \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} (F \oplus B')(x) \;\; \text{si } x \in S \\ 0 \text{ ailleurs} \end{array} \right\} \tag{7}$$

où S = $\{(2i,2j) \setminus (i,j) \in Z\}$;
B = élément structurant;
B′ = symétrique de B par rapport à son centre;
⊕ = opération de dilatation.

Nous avons considéré comme élément structurant deux disques de rayon 1 et 2. Sur la figure 2, nous présentons l'opération de compression. Nous remarquons que ces deux éléments ne donnent pas une réponse unique; pour ce faire, nous proposons l'élément $B^{(2)}$ qui vérifie les conditions suivantes :

- $B \oplus S = Z^2$
- $Br \oplus Bs = \emptyset$ si $r, s \in S$
- $(0,0) \in B$

Sur la figure 3, nous présentons le résultat de l'échantillonnage. Cependant, en appliquant cette opération à une droite, nous remarquons qu'elle se dédouble. Pour remédier à ce défaut, nous proposons comme élément structurant B :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow B' = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

Nous obtenons avec cette méthode deux droites de même direction mais avec des niveaux de gris différents (■ = 256 et □ = 255) (fig. 4).

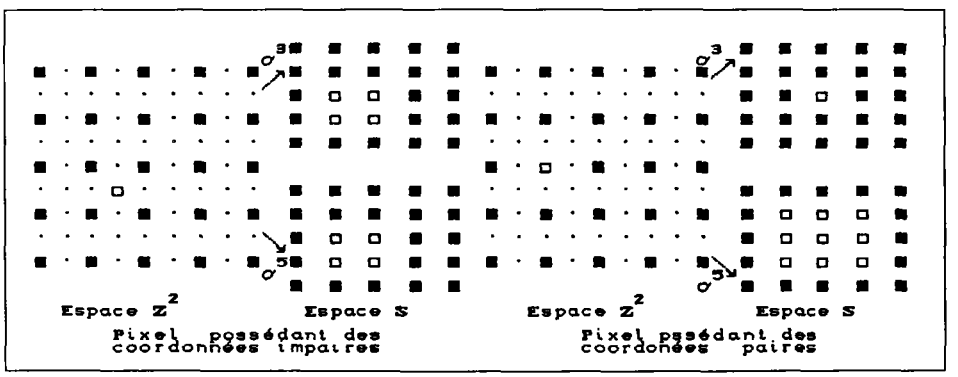


Figure 2. Échantillonnage morphologique avec deux disques de rayon 1 et 2

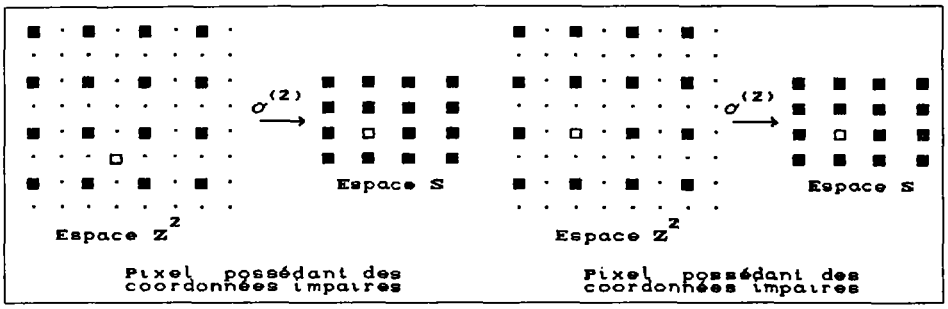


Figure 3. Compression avec l'élément structurant B^2

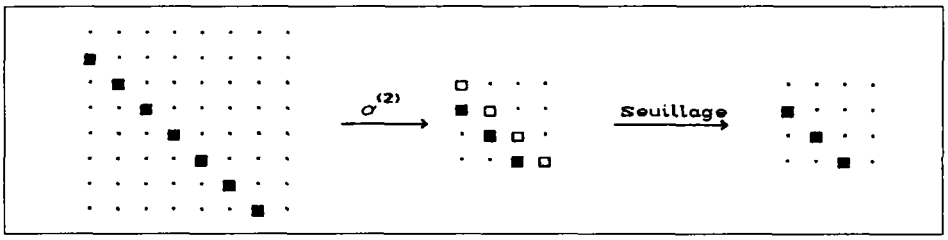


Figure 4. Échantillonnage morphologique avec l'élément structurant B

4. Évaluation des résultats

Des mesures ont été faites sur l'image test de la figure 5a où apparaît un cercle et 5 droites de directions différentes caractérisées par des angles de 0°, 45°, 90°, 122°, 135°, 145° et 180°. Le nombre de points est de 436. En introduisant les améliorations proposées, la détection des droites s'effectue en 4 étapes : 1) détection séparée des droites horizontales avec une quantification (1,90°) (fig. 5b); le nombre de points caractéristiques est réduit à 348 (fig. 5c); cette étape est imposée par le choix de l'élément structurant lequel ne détecte pas ces directions; 2) compression du nombre de points restants par morphologie mathématique à 173 points (fig. 5d); 3) détection des droites de 0°, 45° et 135° avec la quantification ($1\sqrt{2}$,45°) (fig. 5e); sur la figure 5f, nous présentons les 134 points restants; 4) détection des droites de directions quelconques; sur la figure 5g, nous présentons la détection des droites de 122° et 145° avec la quantification diagonale.
Il est à remarquer que la figure 5h, résultat de la détection, est nettement moins bruitée que la figure 5a. Les quelques points encore existants sont dans la direction des droites détectées. Les améliorations apportées ont permis un gain en espace mémoire de 4,5 et en temps de traitement dans un rapport de 12 tout en conservant la qualité et la précision de la détection.

5. Application au cas urbain

La méthodologie développée a été appliquée pour résoudre le problème de la séparation des routes du milieu urbain. À la différence des bâtis, les routes sont caractérisées par des

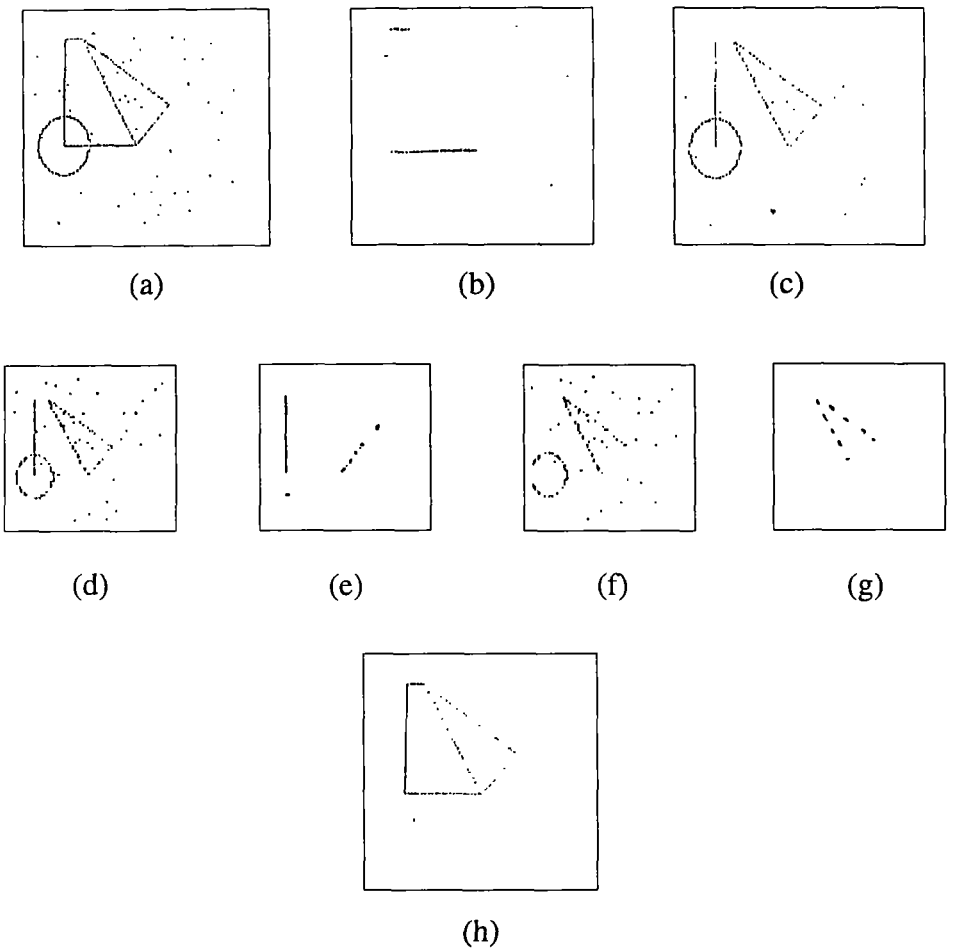


Figure 5. Illustration des différentes étapes de l'algorithme développé; a) image originale; b) détection des directions 90° avec (1,90°); c) soustraction de l'image originale et l'image de la figure 5b; d) compression par échantillonnage morphologique; e) détection des droites de 0°, 45° et 135° avec ($1/\sqrt{2}$,45°); f) soustraction de l'image de la figure 5d et de la figure 5e; g) détection des autres directions par quantification diagonale; h) image résultat de la détection de toutes les droites

segments linéaires facilement détectables par notre technique. La dimension fractale et la D-dimension estimées par la morphologie mathématique ont permis de séparer les textures urbaines des textures rurales (LOUMI and SANSAL,1994). Pour ce faire, nous nous sommres basés sur la formule de Richardson donnée par :

$$I(x,S) = Ks^{d-D} \tag{9}$$

où $I(x,s)$ = intensité du pixel x à l'échelle s;
d = dimension topologique de l'espace métrique;

D = dimension fractale;
K = D-dimension fractale.

Sur la figure 6, nous illustrons la méthodologie appliquée. Nous avons appliqué cette méthode sur l'image test (fig. 7) avec 4 éléments structurants qui privilégient 4 directions :

$$B1 = \begin{bmatrix} * & 1 & * \\ * & 0 & * \\ * & 1 & * \end{bmatrix} \quad B2 = \begin{bmatrix} * & * & * \\ 1 & 0 & 1 \\ * & * & * \end{bmatrix} \quad B3 = \begin{bmatrix} 1 & * & * \\ * & 0 & * \\ * & * & 1 \end{bmatrix} \quad B4 = \begin{bmatrix} * & * & 1 \\ * & 0 & * \\ 1 & * & * \end{bmatrix} \qquad (10)$$

Les images obtenues sont en niveaux de gris avec un bon contraste des zones rurales et urbaines. La séparation se fait par un simple seuillage. Cependant, le choix du seuil se pose. La figure 8 illustre le résultat avec un seuil assez élevé, ce qui impose un prétraitement. La détection des routes s'est faite par l'algorithme développé (fig. 9).

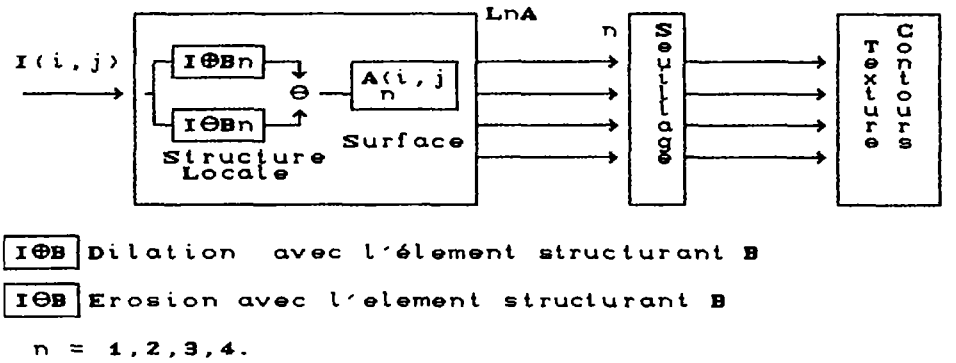


Figure 6. Organigramme du calcul des images de la dimension fractale et de la D-dimension

Figure 7. Image HRV de SPOT de Grenoble (256 x 256 pixels)

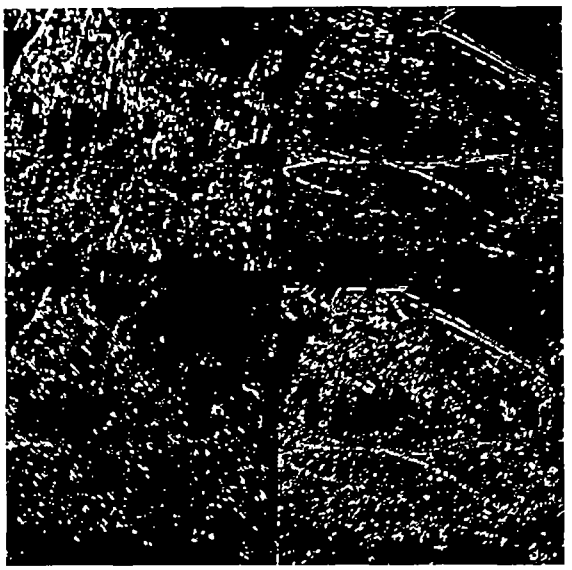


Figure 8. Image obtenue en appliquant l'organigramme de la figure 6 dans les quatre directions (horizontale, verticale, diagonales) et détection des différentes droites

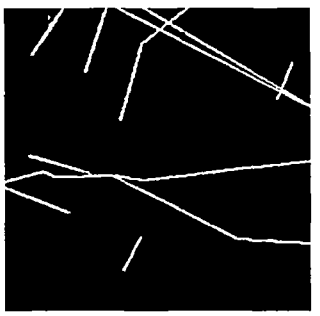


Figure 9. Détection des routes par la méthodologie proposée

6. Conclusion

Dans cette étude, nous avons développé et mis en oeuvre une technique de la transformée de Hough améliorée. Les améliorations ont été axées sur l'occupation de l'espace mémoire et le temps de traitement. L'espace mémoire a été réduit en modifiant les limites du champ de θ et la position du centre de traitement d'une part et, d'autre part, en utilisant un pas de quantification variable suivant la direction de la droite à détecter. La réduction du temps de traitement s'est faite par la compression de l'image en utilisant la morphologie mathématique. À précision égale avec la transformée de Hough à quantification diagonale notre technique nous a permis d'obtenir un gain en espace mémoire de 4,5 et en temps de traitement de 12. La méthodologie appliquée à la détection des routes en milieu urbain a donné des résultats satisfaisants.

7. Références

LEUNG, D. N. K. 1993. Diagonal quantization for the Hough Transform. Pattern Recognition Letters, vol. 14, p. 181-189.

LOUMI, S. and SANSAL, B. 1994. Directional mathematical morphology for the textural segmentation of urban image. ISMM'94-58, Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Paris, 5-9 sept. 1994.

LOUMI, S., ALILAT, F., MEZRED, A. and SANSAL, B. 1995a. Combination of mathematical morphology and Hough transform. Mediterranean Conference on Electronics and Automatic Control, MCEA 95, Grenoble, France.

LOUMI, S., ALILAT, F. and SANSAL, B. 1995b. Pattern recognition by mathematical morphology and Hough transform. RSS-95, Remote Sensing Society, 11-14 sept. 1994, University of Southampton, Southampton, United Kingdom.

MAITRE, H. 1985. Un panorama de la transformée de Hough. Traitement du signal, vol. 2, n° 4.

MEZRED, A. 1994. Contribution de la morphologie mathématique à l'amélioration des performances de la transformée de Hough. Mémoire d'ingénieur.

RISSE, T. 1989. Hough transform for the line recognition : complexity of evidence accumulation and cluster detection. Computer vision, Graphic and Image Processing, vol. 46, p. 327-345.

YUEN, S. K. Y. 1991. An approch to quantization of Hough space. 7th Scandinavian Conference on Image Analysis, p. 733-740.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 113-120

11

Application d'un processus itératif de classification dirigée à un site urbain et périurbain algérien

NADIA OUARAB et YOUCEF SMARA

Laboratoire de traitement d'image, 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) 51-55-75; télécopieur : +213 (2) 51-50-39

Résumé

Dans cet article, nous avons pour but d'améliorer la méthode de la classification fondée sur le maximum de vraisemblance. Une nouvelle méthode à plusieurs étages est proposée, par celle-ci nous réduisons le temps de calcul tout en maintenant la précision. Le processus consiste en : 1) la réduction du nombre de canaux bruts en canaux caractéristiques; 2) la sélection d'un ensemble d'échantillons d'entraînement; 3) le calcul des fonctions discriminantes linéaires avec un nombre initial de canaux caractéristiques et le développement d'un critère de troncature; 4) l'augmentation du nombre de canaux à chaque étage et la réduction des classes; 5) l'utilisation de tout l'ensemble des caractéristiques et l'affectation du pixel à la classe dont la valeur de la fonction discriminante est la plus élevée. La méthode décrite est appliquée à une imagette d'une scène TM de Landsat de la ville de Laghouat (Algérie). Les résultats obtenus sont comparés avec ceux des méthodes classiques telles que le minimum de distance, la distance de Mahalanobis et le maximum de vraisemblance. Les tests d'application montrent que cette technique offre de nombreux avantages tant dans la précision que dans le temps de calcul.

1. Introduction

De nombreuses méthodes de classification d'images de télédétection ont été développées ces deux dernières décennies dans le but de distinguer les différents types d'occupation du sol dans ces images (SWAIN and DAVIS, 1978; RICHARDS, 1986). Les méthodes de classification dirigées sont celles qui utilisent des connaissances *a priori* sur les zones à classifier et la règle de décision basée sur le maximum de vraisemblance est la plus communément utilisée pour l'analyse des images satellitaires (RICHARDS, 1986). L'implantation standard de cette méthode (BORSTAD and LILLESAND, 1991; FOODY *et al.*, 1992) requiert la sélection de sites d'entraînement représentant les différentes classes à cartographier. Les données de ces sites d'entraînement sont utilisées pour l'estimation des paramètres des fonctions de densité de probabilité de chaque classe spectrale (DUDA and HART, 1973). Généralement, le modèle de probabilité normale multivariable est choisi, les vecteurs moyens et les matrices de variance/covariance des échantillons définissent les fonctions de densité de probabilité; celles-ci sont utilisées pour le calcul des règles de classification des pixels. Malgré les avantages certains de la méthode du maximum de vraisemblance (la maîtrise de la base théorique, la facilité de mise en oeuvre et son application à différents types d'occupation du sol); l'implantation a montré un grand handicap de cette méthode, soit le temps de calcul. En effet, les travaux réalisés par RICHARDS (1986) montrent que la méthode nécessite $(N^2 + N) \cdot C$ multiplications et $(N^2 + 2N + 1)$ additions pour N bandes spectrales et C sites d'entraînement. Ceci représente un temps très long de calcul pour des images de télédétection dont le nombre de bandes spectrales est important tel que celui du spectromètre imageur à haute résolution (HIRIS) du système E.O.S (*Earth Observation System*). L'HIRIS, désigné pour acquérir des images d'une résolution de 30 m x 30 m dans 192 bandes spectrales allant de 0,4 à 2,5 µm, permet une meilleure discrimination des thèmes (GOETZ and HERRING, 1989). Pour remédier à ce problème, il existe plusieurs moyens aussi bien matériels (processeurs plus rapides, architecture parallèle, etc.) (BORSTAD and LILLESAND, 1991) que logiciels (CHULHEE and LANDGREBE, 1991). Nous présentons ici le classificateur à plusieurs étages étudié par LANDGREBE (1991) qui réduit substantiellement le temps de calcul tout en maintenant la précision.

2. Méthodologie

Le temps de traitement est un facteur influent dans l'évaluation des classificateurs pour l'analyse des données de télédétection, en particulier quand la quantité d'informations à traiter est considérable. En employant les algorithmes de sélection de caractéristiques (MAUSEL *et al.*,1990), le nombre de canaux sera alors réduit sans perte significative d'informations. Des travaux (MAUSEL *et al.*, 1990; CHITROUB and BELHADJ-AISSA, 1993) furent réalisés pour limiter la taille d'échantillons d'entraînement en utilisant des méthodes telles la transformation de Karhunen-Loeve (MUASHER and LANDGREBE, 1983), la méthode de divergence et la distance de Bhattacharyya. Pour la réduction du nombre de canaux, des techniques telles que l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse canonique sont aussi utilisées pour la décorrelation des canaux. Ceci conduit à un ensemble de néo-canaux caractéristiques représentatifs de moindre dimension. Dans le classificateur basé sur le maximum de vraisemblance gaussien, comme le temps de traitement est proportionnel au carré du nombre de caractéristiques, il est alors possible de le réduire considérablement par exploitation des techniques précitées.

2.1. La classification gaussienne au sens du maximum de vraisemblance

Dans le classificateur gaussien conventionnel au sens du maximum de vraisemblance, la fonction discriminante est calculée pour toutes les classes en utilisant tout l'ensemble des caractéristiques; la classe qui nous donne la plus grande valeur est choisie comme étant le résultat de la classification d'une observation donnée. La règle de décision s'exprime par :

$$X \in w_i \quad \text{si} \quad g_i(X) > g_j(X) \quad \text{pour} \quad i \neq j \tag{1}$$

où $g_i(X)$ est la fonction de densité de probabilité discriminante donnée par :

$$g_i(X) = -Ln\left|\Sigma_i\right| - (X - M_i)^t \Sigma_i^{-1} (X - M_i) + Ln\left[p(w_i)\right] \tag{2}$$

où Σ_i = matrice de variance-covariance de la classe w_i;
M_i = vecteur moyen de la classe w_i;
$p(w_i)$ = probabilité de la classe w_i;
$|\Sigma_i|$ = déterminant de la matrice w_i.

Dans le cas où les classes sont équiprobables, $Ln[p(w_i)]$ n'est plus discriminant et l'expression de $g_i(X)$ devient :

$$g_i(X) = -Ln\left|\Sigma_i\right| - (X - M_i)^t \Sigma_i^{-1} (X - M_i) \tag{3}$$

2.2. La classification à plusieurs étages

Dans le classificateur à plusieurs étages, à chaque étage intermédiaire une portion de caractéristiques est utilisée pour calculer les fonctions discriminantes. Les classes dont les valeurs des fonctions discriminantes sont inférieures au seuil, que nous calculerons par la suite, sont à éliminer (FEIVESON, 1983). À l'étage final tout l'ensemble des canaux caractéristiques est utilisé. On peut donc réduire le nombre de classes aux étages suivants où plus de caractéristiques sont utilisées (SWAIN and HAUSKA, 1977) et réduire ainsi le temps de traitement. Le synoptique général du classificateur à plusieurs étages est représenté par la figure 1.

3. Procédure

3.1. Algorithmique

Soit un classificateur à plusieurs étages (N étages) où n caractéristiques sont utilisées au Nième étage dont l'organigramme général est représenté par la figure 2. Le gain de temps peut être réalisé en évitant les calculs redondants dus aux procédures mathématiques tels que les inversions et le calcul du déterminant des matrices de variance-covariance de dimension « n » ainsi que les opérations arithmétiques comme les multiplications, additions et soustractions des mêmes matrices.

Pour cela, il faut utiliser les valeurs des fonctions, c'est-à-dire utiliser :

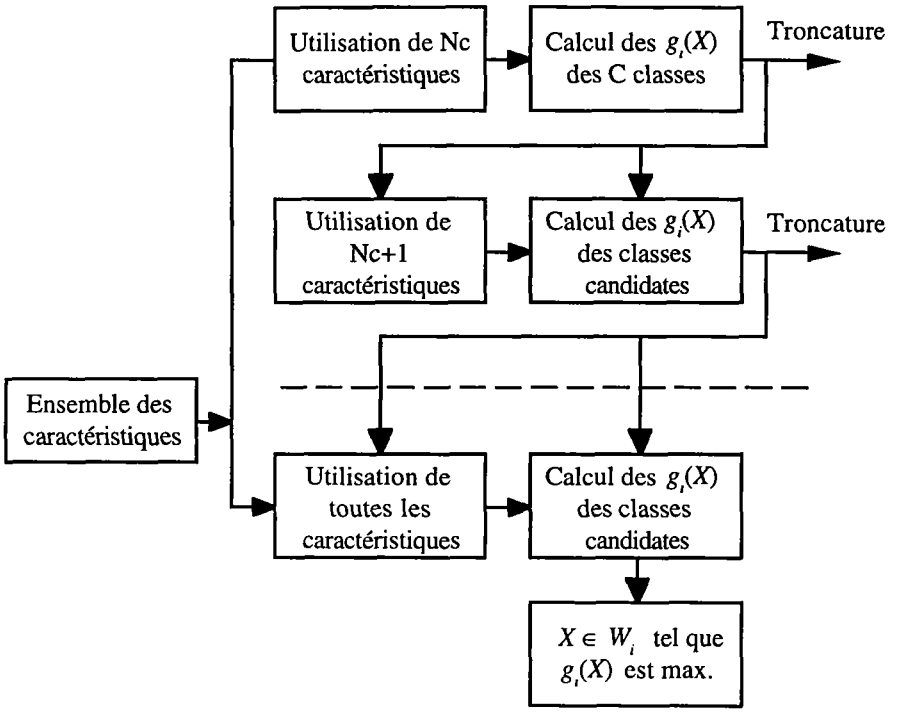


Figure 1. Synoptique général du classificateur à plusieurs étages

$(X_n - M_n)^t \Sigma_n^{-1} (X_n - M_n)$ pour le calcul de $(X_{n+1} - M_{n+1})^t \Sigma_{n+1}^{-1} (X_{n+1} - M_{n+1})$

où Σ_n = matrice de variance-covariance de n caractéristiques;
Σ_{n+1} = matrice de variance-covariance de (n+1) caractéristiques.

La matrice Σ_{n+1} s'exprime par :

$$\Sigma_{n+1} = \begin{bmatrix} \Sigma_n & u \\ u^t & a \end{bmatrix} \tag{4}$$

où u correspond au vecteur colonne de n éléments (variance-covariance) de la matrice Σ_{n+1}. La matrice Σ_{n+1} est inversible si Σ_n est inversible; c'est-à-dire $a - u^t \Sigma_n^{-1} u \neq 0$.

La matrice de variance-covariance est alors inversée sans la procédure d'inversion, d'où un gain en temps :

$$\Sigma_{n+1}^{-1} = \begin{bmatrix} \Sigma_n^{-1} + \alpha \Sigma_n^{-1} u u^t \Sigma_n^{-1} & -\alpha \Sigma_n^{-1} u \\ -\alpha u^t \Sigma_n^{-1} & \alpha \end{bmatrix} \tag{5}$$

où $\alpha = (a - u^t \Sigma_n^{-1} u)^{-1}$. Le calcul de A_{n+1} est donné par :

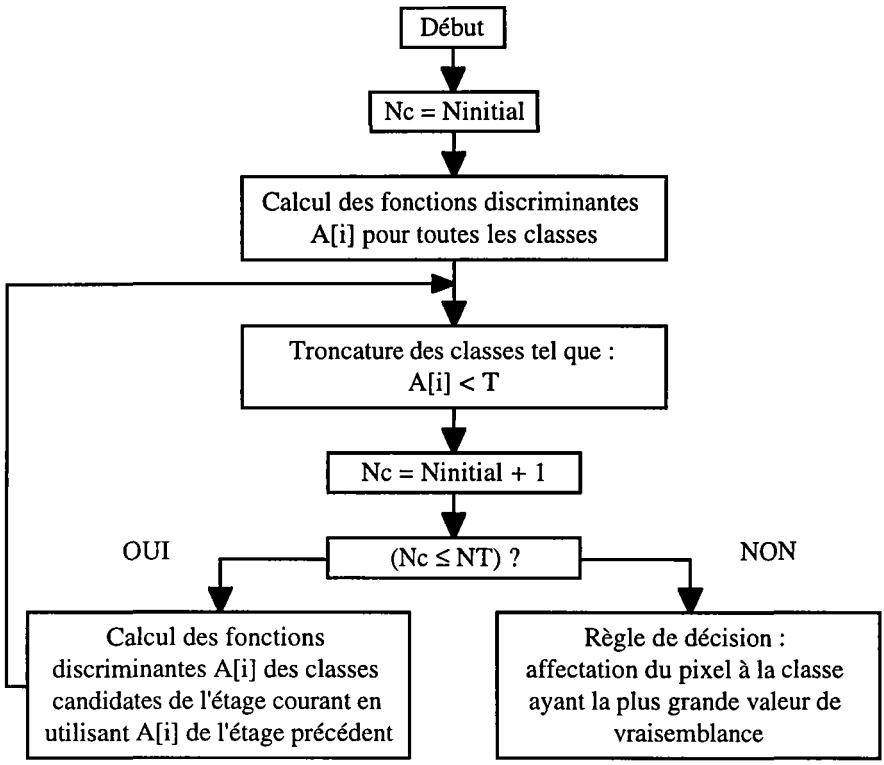


Figure 2. Organigramme général du classificateur à plusieurs étages

$$A_{n+1} = A_n + \alpha\left[\left(u'\Sigma_n^{-1}u\right)\left\{(u'\Sigma_n^{-1}X) - 2(X_{n+1} - M_{n+1}\right\} + (X_{n+1} - M_{n+1})^2\right] \quad (6)$$

avec $A_n = (X_n - M_n)'\Sigma_n^{-1}(X_n - M_n)$ et $X = X_n - M_n$.

3.2. Troncature des classes

La troncature des classes se fait par un critère qui est le taux de vraisemblance. À chaque étage où un nombre précis de caractéristiques est utilisé, les classes qui ont les plus petites valeurs de fonctions discriminantes sont comparées au seuil T donné par :

$$T = \left(\sum_{i=1}^{C} A[i] / C\right) - D \quad (7)$$

où D est un paramètre choisi par l'utilisateur et C correspond au nombre total de classes. Si $g_i(X) < T$, la classe w_i est alors tronquée avec un faible taux d'erreur intervenant dans la précision.

4. Test et résultats

Nous présentons les résultats obtenus à partir de notre processus de classification à plusieurs étages. Les tests sont effectués sur une imagette composée de 6 canaux de 400 x 400 pixels correspondant à la zone de Laghouat (fig. 3) qui est extraite de la scène TM de Landsat 196/36 acquise le 1er janvier 1989. Le choix de cette zone a été dicté par la disponibilité des données satellitaires et de photographies panoramiques acquises lors d'une visite sur le terrain. Les échantillons d'entraînement sont produits à partir d'une classification de type non dirigée basée sur la méthode de Forgy, dont l'image classifiée représente six catégories d'occupation du sol (fig. 11-4, voir cahier couleur).

Le nombre d'échantillons est limité au nombre de 100 sur chaque canal pour chaque classe. Trois méthodes classiques développées et comparées avec celle décrite précédemment sont des références en classification dirigée : 1) le minimum de distance (MINID); 2) le maximum de vraisemblance (MAXIM); 3) la distance de Mahalanobis (MAHAL), dont la matrice de variance-covariance est définie comme la moyenne de toutes les matrices de toutes les classes. Après avoir étudié et implanté les différentes méthodes de classification pour l'obtention de six classes à partir de trois canaux sélectionnés (TM2, TM4 et TM5), nous avons pu mieux discriminer le bâti et la végétation. Les images classifiées par les différentes méthodes sont représentées sur la figure 11-5 (voir cahier couleur) et les résultats de pourcentages d'occupation des classes sont donnés sur le tableau 1.

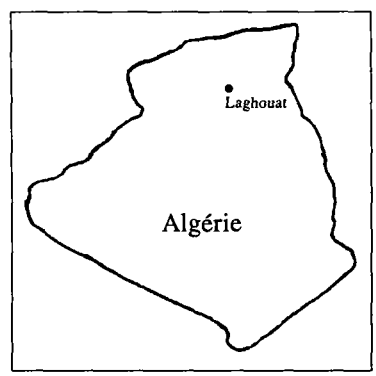


Figure 3. Localisation de la région d'étude: Laghouat

5. Discussion et conclusion

Nous avons vu que le choix des méthodes ainsi développées dépend essentiellement de deux facteurs qui sont la précision et le temps de calcul. Sur ces aspects, nous pouvons faire les constatations suivantes.

Tableau 1. Pourcentage d'occupation de chaque classe ainsi que le temps d'exécution des quatre méthodes de classification dirigée en comparaison avec l'image de référence obtenue par la méthode de Forgy

Classe	Méthode de référence (FORGY)	Minimum de distance (MINID)	Distance de Mahalanobis (MAHAL)	Maximum de vraisemblance (MAXIM)	Méthode à plusieurs étages
C1	1,10	0,00	13,69	5,93	5,92
C2	11,10	0,50	16,66	14,46	13,15
C3	8,20	5,82	5,14	6,48	6,48
C4	33,90	28,96	1,82	32,11	29,26
C5	29,10	0,02	14,68	22,44	27,50
C6	16,70	65,12	47,98	18,54	17,65
Temps d'exécution (s)	3 633	974	3 134	3 306	2 603

Par son principe se limitant à la mesure des distances, la méthode du minimum de distance (MINID) ne nous permet pas d'obtenir une bonne classification car, à la demande de six classes, seules trois classes sont présentes et avec beaucoup d'imprécision; le temps de calcul, quant à lui, est de loin, le plus court. La méthode de Mahalanobis est un peu plus rapide que la méthode du maximum de vraisemblance, mais avec des classes imprécises si nous les comparons avec la référence (image de Forgy). Les méthodes du maximum de vraisemblance et à plusieurs étages donnent pratiquement la même représentation des classes (sauf pour les classes 4 et 5) et le gain de temps de la deuxième méthode par rapport à la première est d'environ 28 %.

Sur le plan de l'interprétation des thèmes contenus dans les images classifiées, les aspects urbains et les aspects périphériques tels que la végétation, les zones ensablées et les oueds sont bien distingués.

Une vérification sur le terrain ainsi qu'une étude quantitative sur la base d'une matrice de confusion élaborée à partir d'échantillons terrain et des classifications nous permettront de vérifier la validité des résultats obtenus. Cette vérification sera effectuée dès que les conditions seront réunies, c'est-à-dire l'accès au terrain, disposer d'un moyen de positionnement précis (de type GPS), etc. Nous pensons que ce premier résultat est encourageant dans le sens où lorsque nous aurons plus de canaux à traiter, le gain de temps sera plus appréciable avec la méthode à plusieurs étages.

6. Références

BORSTAD, P. V. and LILLESAND, T. M. 1991. Rapid maximum likelihood classification. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 57, n° 1, p. 67-74.

CHITROUB, S. et BELHADJ-AISSA, A. 1993. Amélioration de la classification supervisée de données satellitaires par un choix optimal de caractéristiques. Quatorzième Colloque du Groupe de recherche et d'études sur le traitement de signal et des images (GRETSI), 13-16 septembre 1993.

CHULHEE, L. and LANDGREBE, D. A.1991. Fast likelihood classification. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 29, p. 509-517.

DUDA, R. O. and HART, P. E. 1973. Pattern classification and scene analysis. John Wiley & Sons, New York, 724 p.

FEIVESON, A.H. 1983. Classification by thresholding. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-5, n° 1, p. 48-54.

FOODY, G. M., CAMPBELL, N. A., TRODD, N. M. and WOOD, T. F. 1992. Derivation and applications of probabilistic measures of class membership from the maximum-likehood classification. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 58, n°9, p. 1335-1341.

GOETZ, A. F. H. and HERRING, M. 1989. The high resolution imaging spectrometer (HIRIS) for EOS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 27, n° 2, p. 136-144.

MAUSEL, P. W., KRAMBRE, W. J. and LEE, K. 1990. Optimum band selection for supervised classification of multispectral data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56, n° 1, p. 75-83.

MUASHER, M. J. and LANDGREBE, D. A. 1983. The K-L expansion as an effective feature ordering technique for limited training sample size. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-21, n°4, p. 438-442.

RICHARDS, J. A. 1986. Remote sensing digital image analysis: An introduction. Springer-Verlag, Berlin, 281 p.

SWAIN, P. H. et HAUSKA, H. 1977. The decision tree classifier : design and potential. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. GE-15, n°3, p. 142-152.

SWAIN, P. H. and S. M. DAVIS (eds), 1978. Remote sensing: the quantitative approch. McGraw-Hill, New York, 395 p.

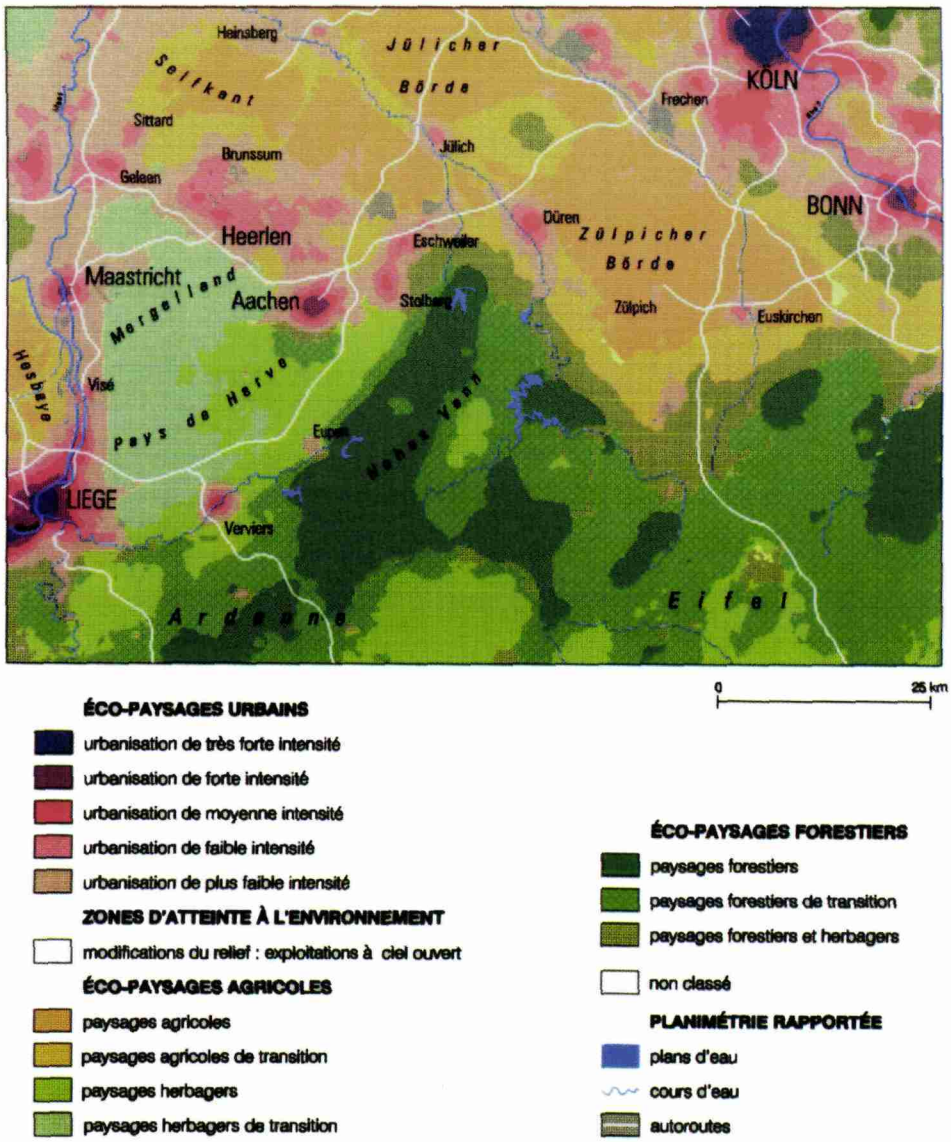


Figure 2-4. Région Rhin-Meuse : les grandes unités éco-paysagères. Les unités ont été déterminées par classification du « colorama » de potentiels d'une image MSS du 29 août 1975

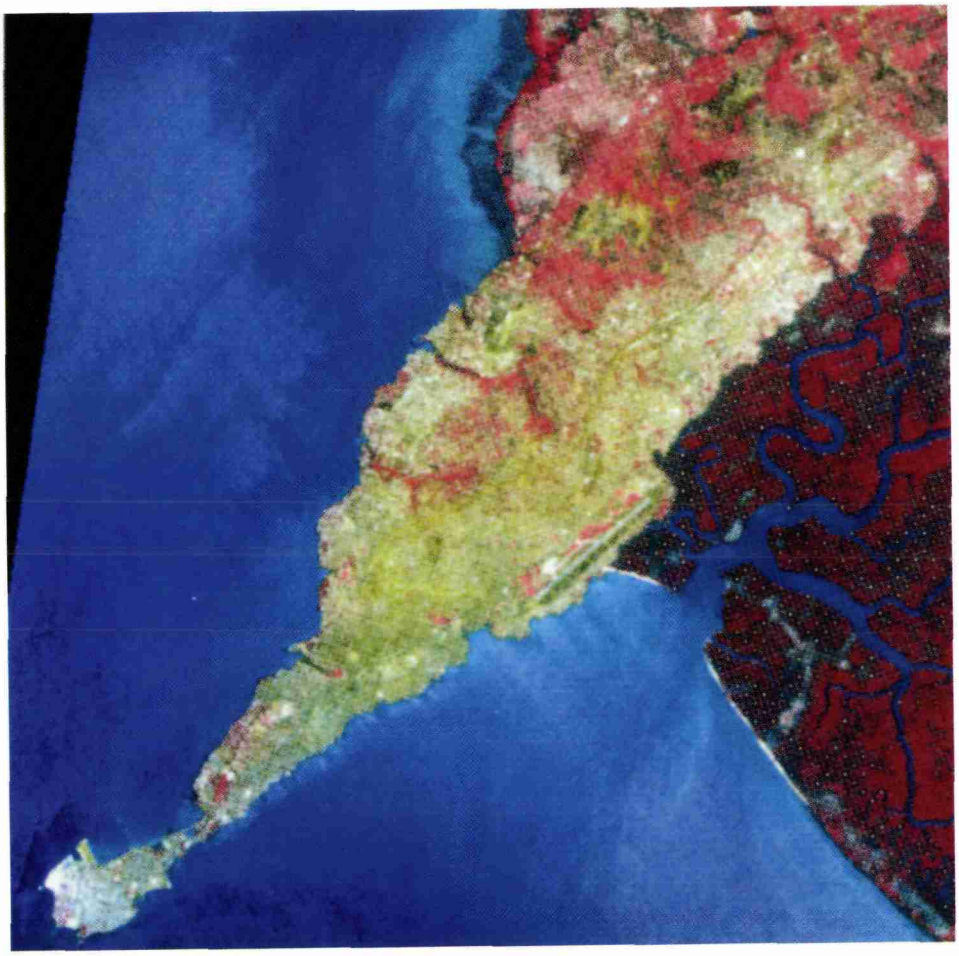


Figure 4-2. Image HRV (XS) de SPOT de mars 1990. Combinaison colorée où le canal vert est en bleu, le canal rouge en vert et le canal infrarouge en rouge

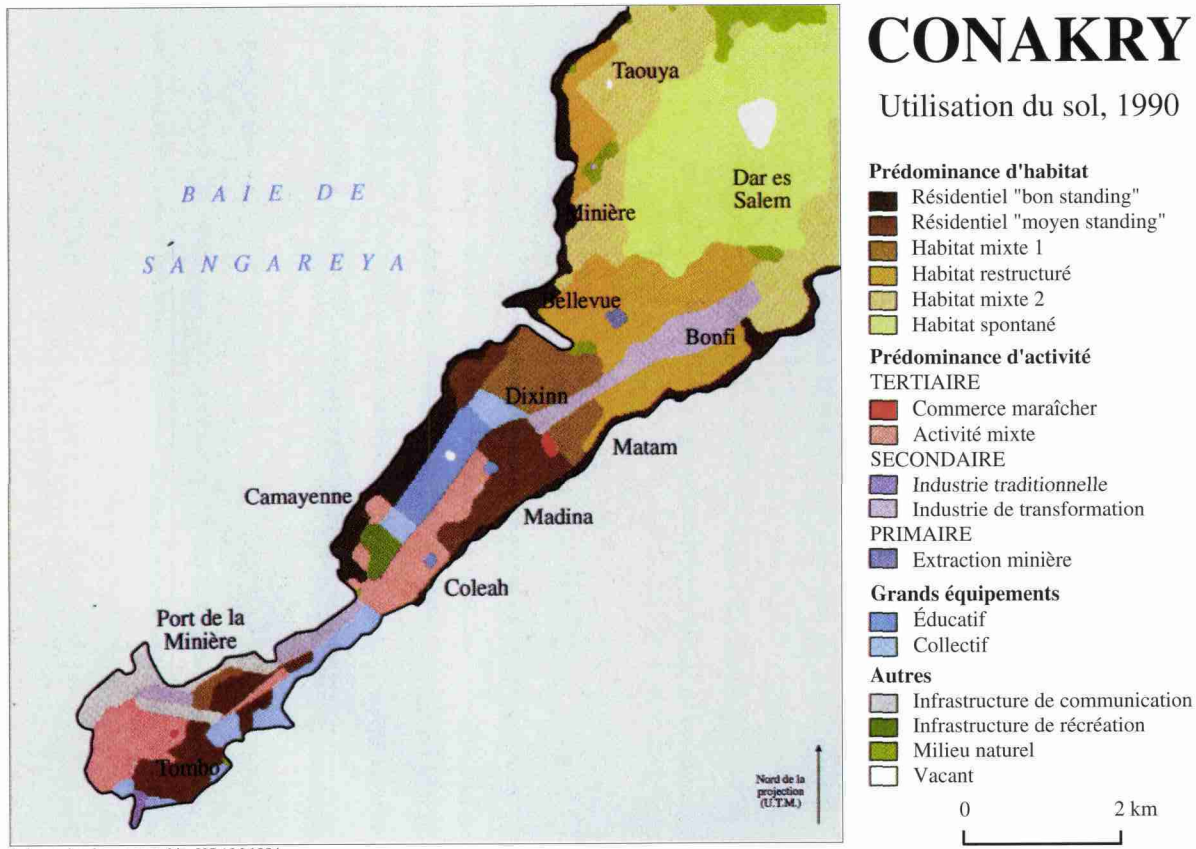
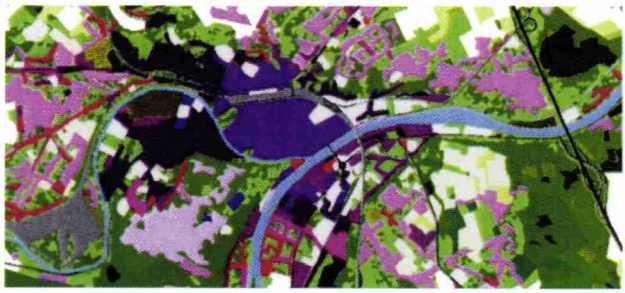


Figure 4-4. Carte de l'utilisation du sol de Conakry d'après l'image HRV (XS) de SPOT de mars 1990

(a)



0 1 km

(b)

0 1 km

Légende simplifiée

Violet-rouge-rose	Les types d'habitat
Verts	Les types de végétation
Bleu	Eau
Brun	Industries
Jaune	Terres agricoles

Figure 6-2. Cartes écologiques : a) Namur; b) Charleroi (voir fig. 3 pour les démarches méthodologiques)

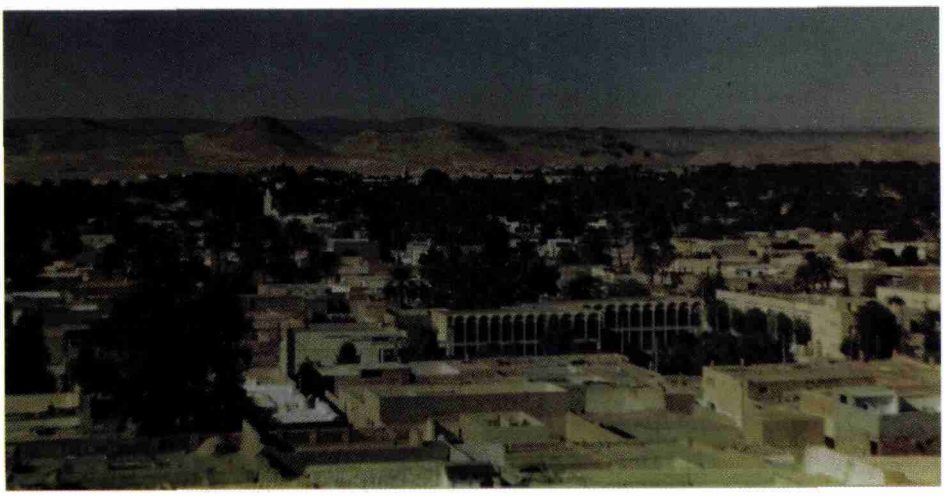


Figure 8-2. Vue d'ensemble sur la ville de Laghouat (Algérie)

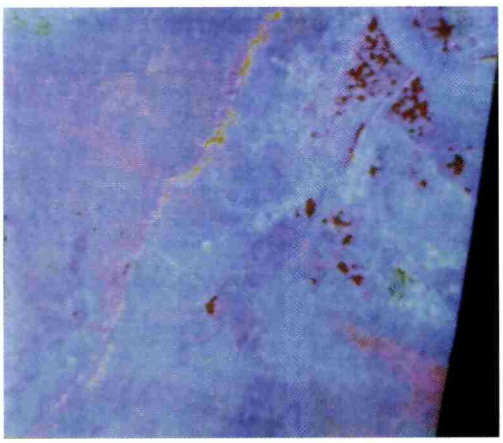


Figure 8-5. Composition colorée des canaux composantes principales issus des canaux ITS : les parties ensablées (en jaune) sur la bordure est du djebel Ahmar, les structures linéaires des routes et la zone industrielle (en blanc), les zones à végétation (en orange)

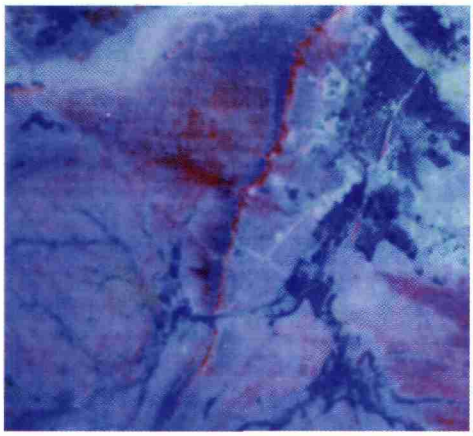
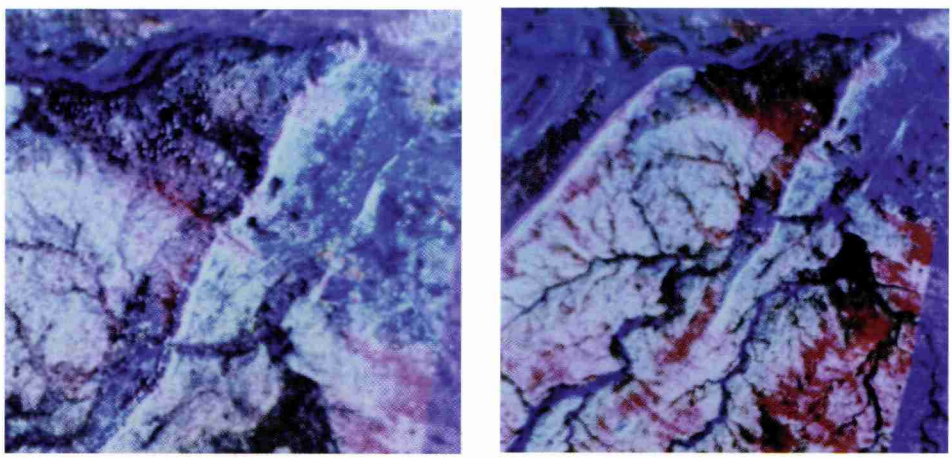


Figure 8-6. Composition colorée des canaux intensité (rouge), teinte (vert) et saturation (bleu) issus de la transformation ITS effectuée sur les canaux originaux TM1, TM2 et TM3. Cette image décrit bien les structures linéaires de la ville de Laghouat ainsi que les zones sableuses ou terrains nus (en rouge) qui montrent le risque d'ensablement du côté ouest de la ville



(a) (b)

Figure 8-7. Composition colorée des canaux issus de la transformation inverse ITS-RVB où le canal SAR remplace le canal intensité : a) le résultat est relativement limité au niveau de la ville de Laghouat qui apparaît en bleu à droite de l'image; b) le réseau hydrographique environnant de la ville de Laghouat est rehaussé de manière significative

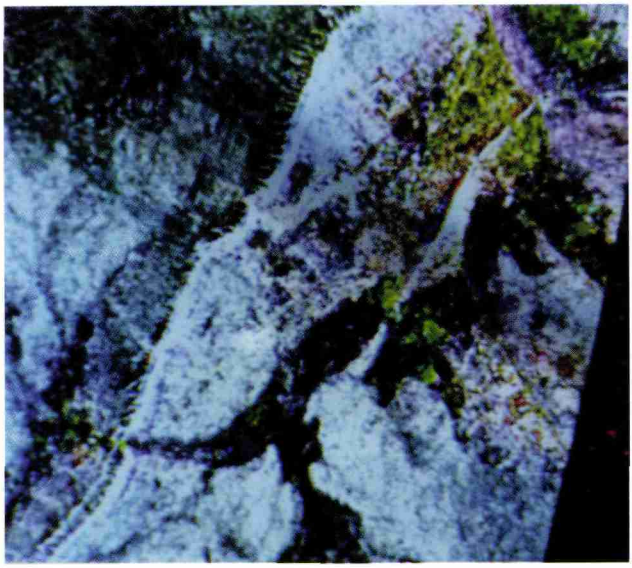


Figure 8-8. Composition colorée des canaux issus de la transformation ITS-RVB où le canal substitut (SAR + 3 TM2) remplace le canal intensité : les zones de végétation importantes apparaissent en vert, les sites industriels à forte réflectance en rouge, la ville de Laghouat apparaît en rouge, vert et jaune, et les zones sombres correspondent, quant à elles, globalement aux champs cultivables

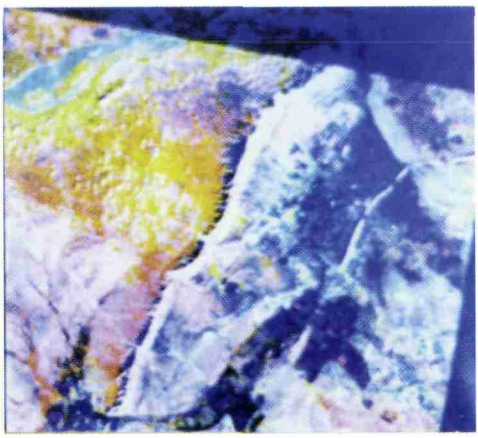
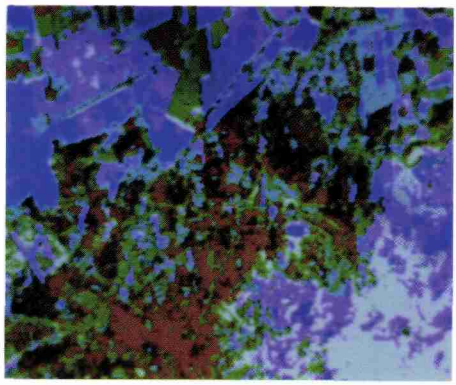
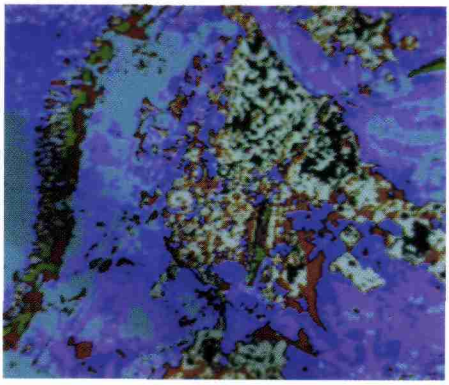


Figure 8-9. Composition colorée de canaux TM2 (vert), TM4 (rouge) et SAR (bleu) : les aspects de rugosité apparaissent en bleu alors que les zones lisses correspondant aux zones sableuses apparaissent en jaune



Orange	Noyau de la ville
Bleu/vert	Urbain moins dense et champs agricoles
Gris	Entrée de la zone montagneuse

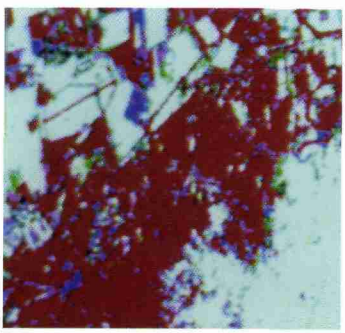
(a)



Gris /vert foncé	Structure urbaine
Bleu	Sol nu
Violet/bleu foncé	Zones humides
Rouge	Zones de sable plaqué sur les versants de montagne

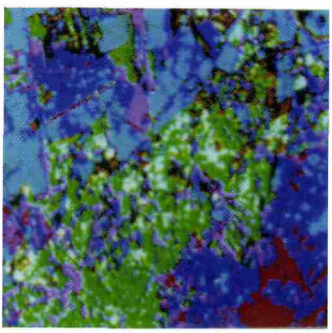
(b)

Figure 9-4. Résultats de la classification automatique : a) l'image HRV de la ville de Blida; b) l'image TM de la ville de Laghouat



Rouge	Ville avec ses extensions
Blanc	Région montagneuse et régions agricoles

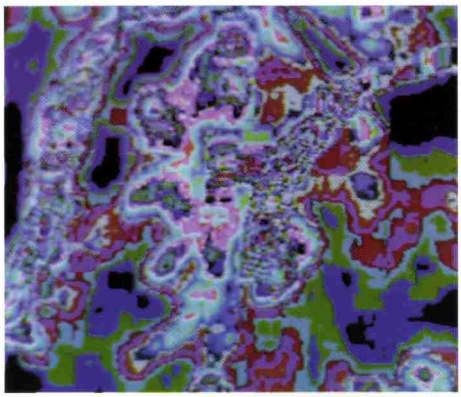
(a)



Bleu clair	Parcelles agricoles
Vert	Tissu urbain
Bleu foncé/rouge	Discrimination en deux thèmes de la zone montagneuse

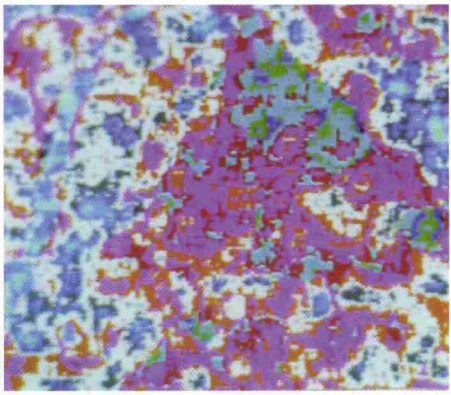
(b)

Figure 9-5. Images résultat de la classification dirigée de la ville de Blida : a) à partir des canaux XS1, XS2, XS3; b) à partir des axes ACP produits des trois canaux HRV



Bleu foncé/vert	Sols nus de même texture
Bleu/rose/vert	Stuctures montagneuses très hétérogènes

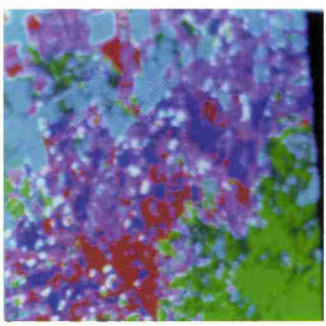
(a)



Gris	Sol nu
Bleu	Chaînons de montagnes
Rose/orange/rouge	Constructions urbaines de même texture

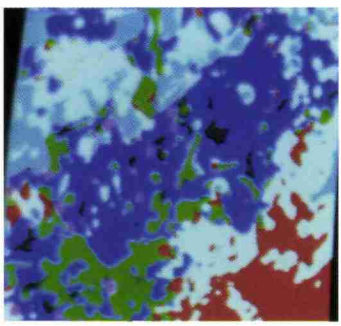
(b)

Figure 9-6. Images résultats pour la zone de Laghouat : a) du paramètre inertie calculé à partir de la matrice de cooccurrence moyenne du premier axe ACP; b) du paramètre « symétrie absolue » calculé à partir du spectre de texture du premier axe ACP



Rouge	Urbain dense
Rose	Urbain moins dense
Vert clair	Montagne
Bleu	Champs agricoles

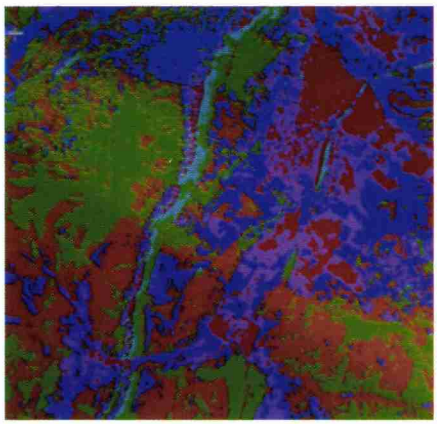
(a)



Vert	Urbain dense de même texture
Bleu foncé	Urbain moins dense de même texture
Gris	Zone de l'aéroport
Rouge	Strucuture montagneuse

(b)

Figure 9-7. Images résultat de la ville de Blida : a) à partir d'une classification combinée (XS1,XS2,XS3, *SA*); b) à partir d'une segmentation texturale combinée (*INT*, *ENT*, *SA*, *SO*)



Violet	C1 : végétation moins dense sur sols argileux
Bleu ciel	C2 : dunes et sable vif localisés sur le versant sud de Oum Deloua et Djebel Lahmar
Rouge	C3 : constructions (ville de Laghouat et village de Kheneg) ou végétation dense naturelle (oueds) ou cultivée, ou ombre portée sur les versants nord des crêtes
Marron	C4 : hamadas (ou glacis) encroûtées à végétation steppique (peu dense)
Bleu	C5 : formations sableuses éoliennes prélevées des oueds
Vert	C6 : formations éoliennes avec légère végétation steppique

Figure 11-4. Image classifiée de la région de Laghouat à partir de la méthode non dirigée de Forgy

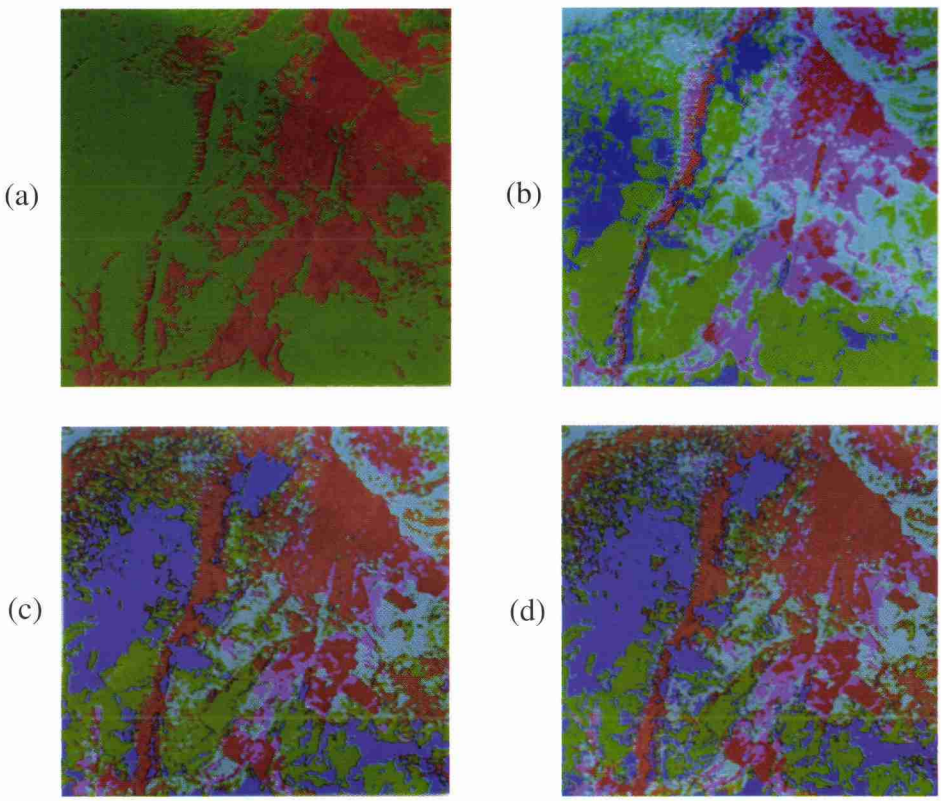


Figure 11-5. Images classifiées par différentes méthodes : a) minimum de distance; b) distance de Mahalanobis; c) maximum de vraisemblance; d) classificateur à plusieurs étages

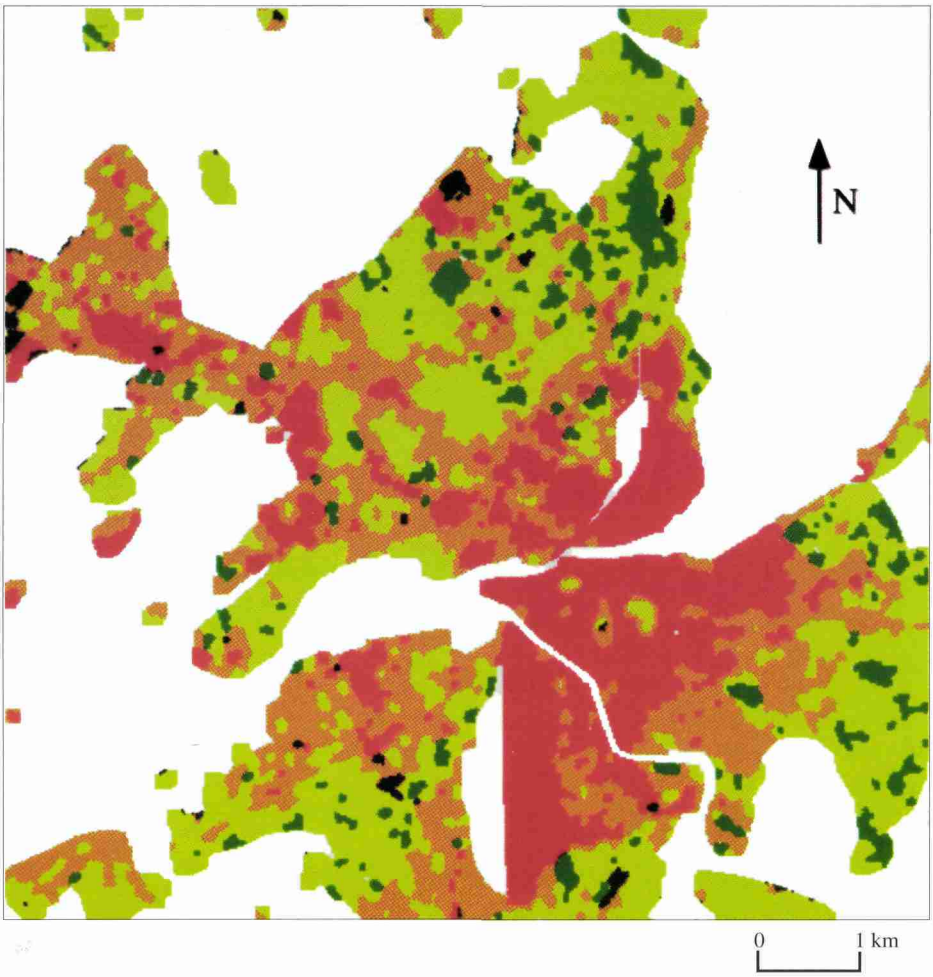
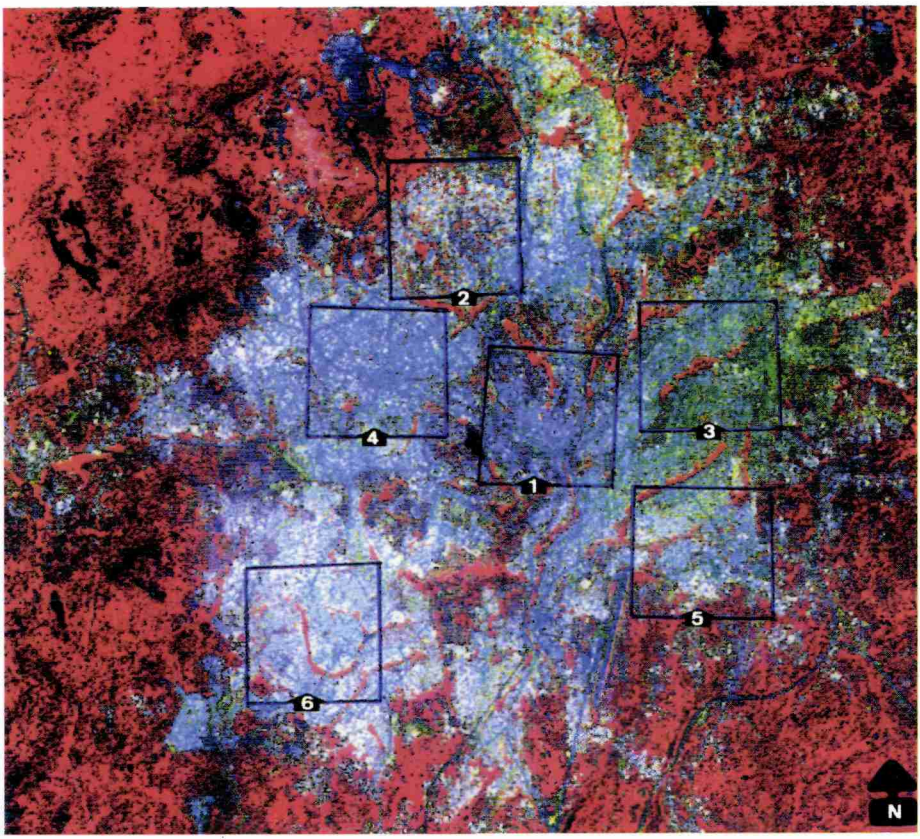


Figure 12-2. Résultats de la classification au sein de la zone d'habitat de la région de Genève



1 Centre-ville
2 Bastos
3 Essos
4 Briqueterie
5 Ekounou
6 Biyemassi

Figure 14-2. Localisation des quartiers-témoins de la ville de Yaoundé sur l'image HRV (XS) de SPOT du 7 février 1992

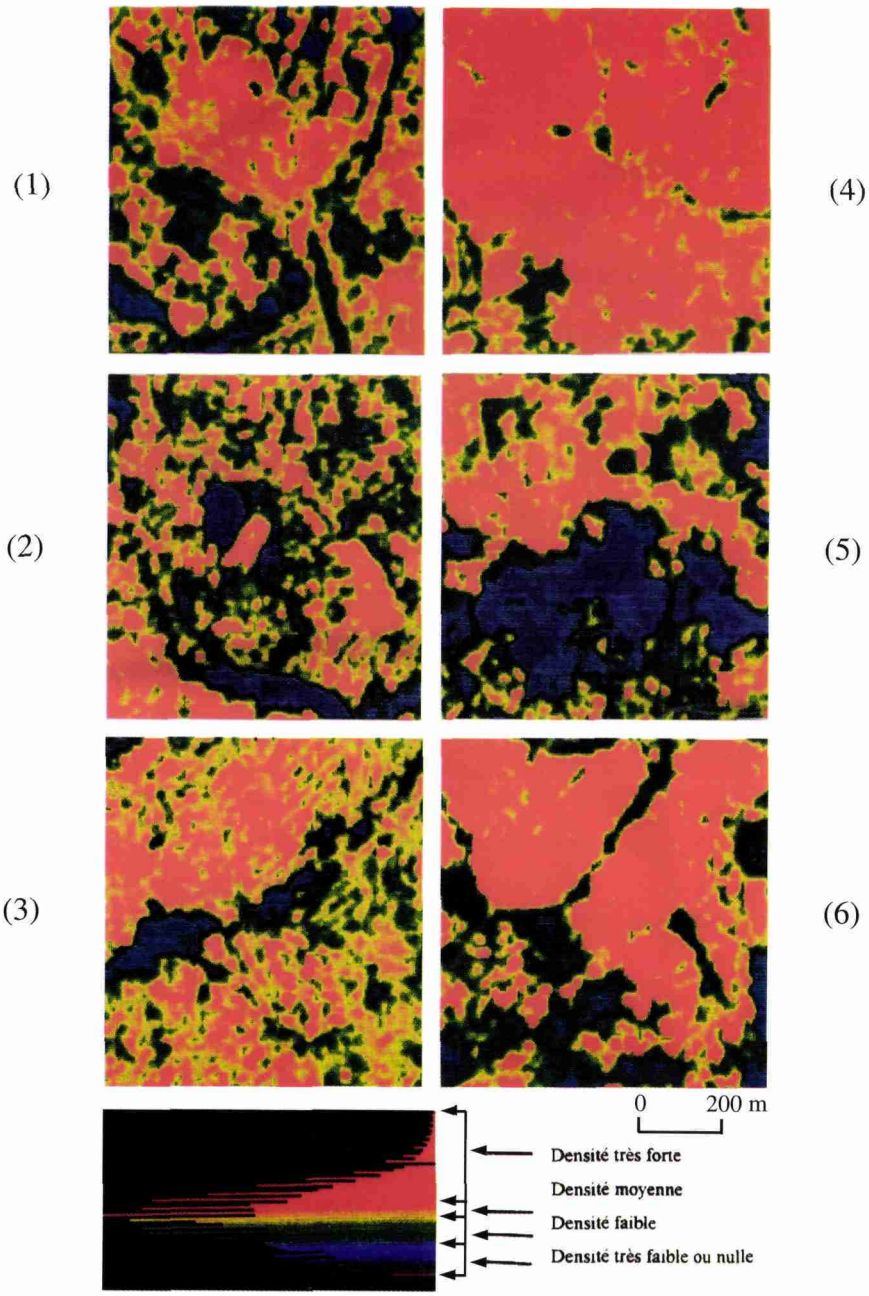


Figure 14-4. La densité du bâti par quartier selon l'indice de brillance : 1) centre-ville; 2) Bastos; 3) Essos; 4) Briqueterie; 5) Ekounou; 6) Biyemassi

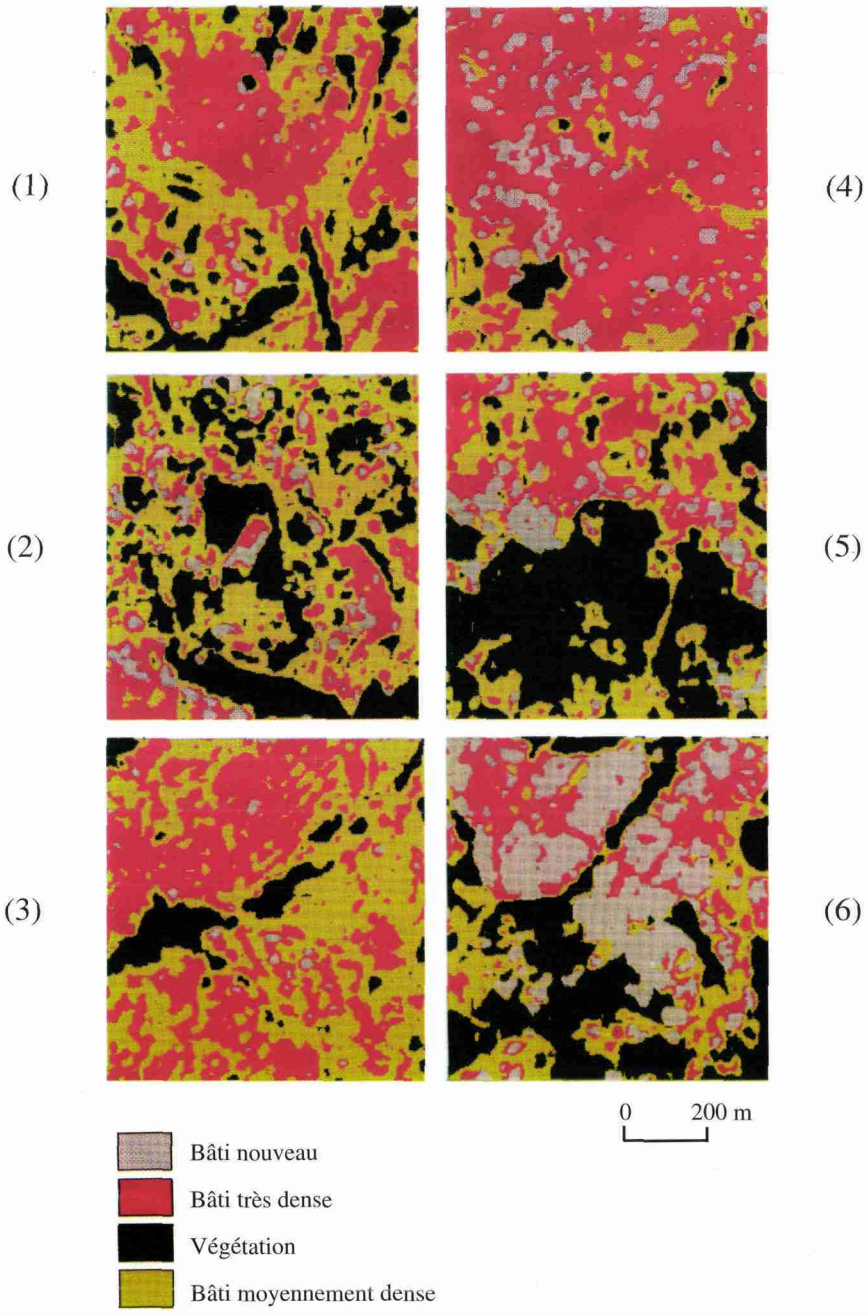


Figure 14-5. L'organisation de l'occupation du sol par quartier selon une classification non dirigée en 4 classes : 1) centre-ville; 2) Bastos; 3) Essos; 4) Briqueterie; 5) Ekounou; 6) Biyemassi

Photo J. Champaud

Figure 14-6. Photographie aérienne oblique du centre-ville

Photo J. Champaud

Figure 14-7. Photographie aérienne oblique du quartier Bastos

Photo J. Champaud

Figure 14-8. Photographie aérienne oblique du quartier Essos

Photo J. Champaud

Figure 14-9. Photographie aérienne oblique du quartier Briqueterie

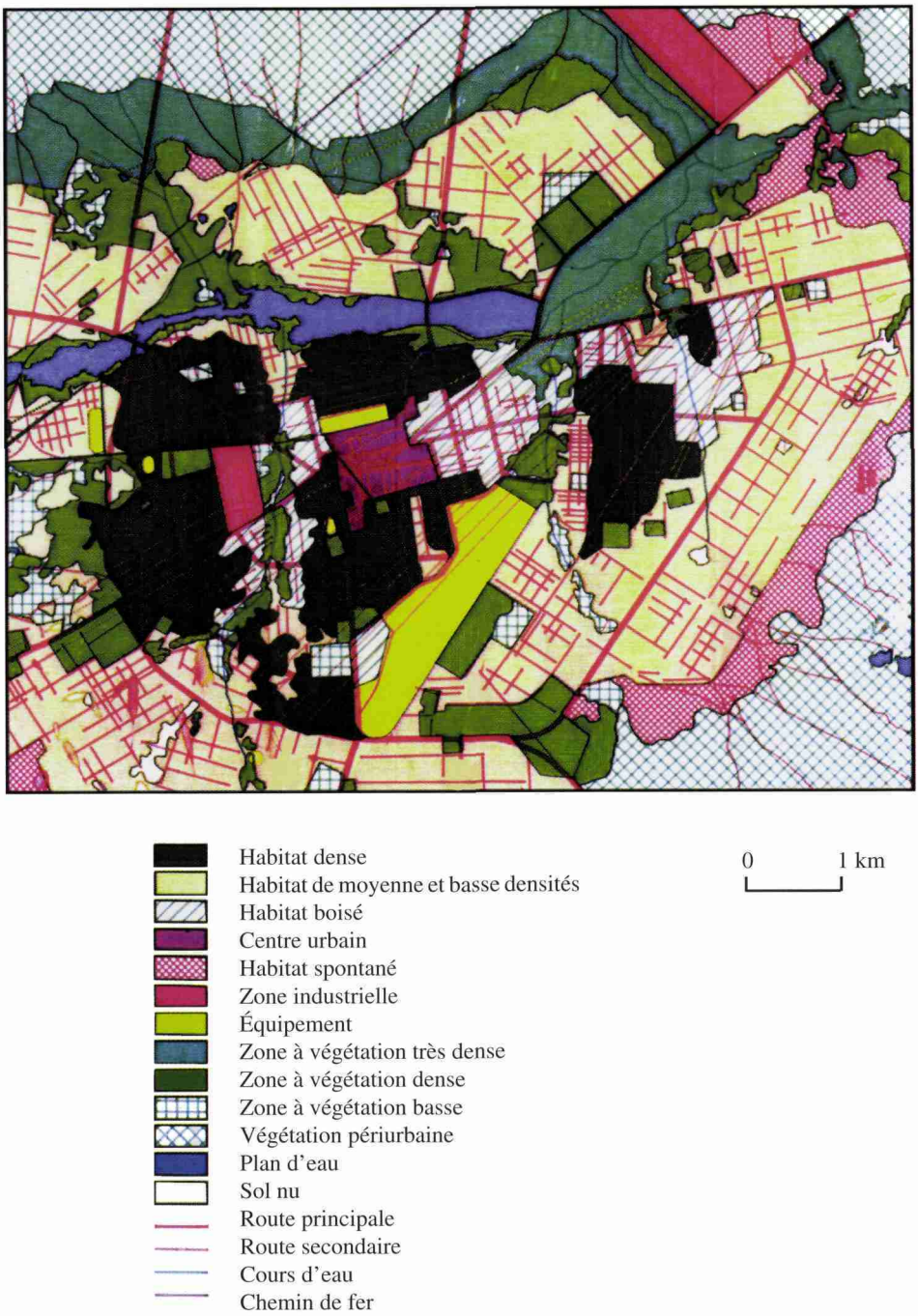


Figure 15-2. Carte d'occupation du sol de la ville de Ouagadougou par image-interprétation de l'image HRV (P + XS) du 17 septembre 1992

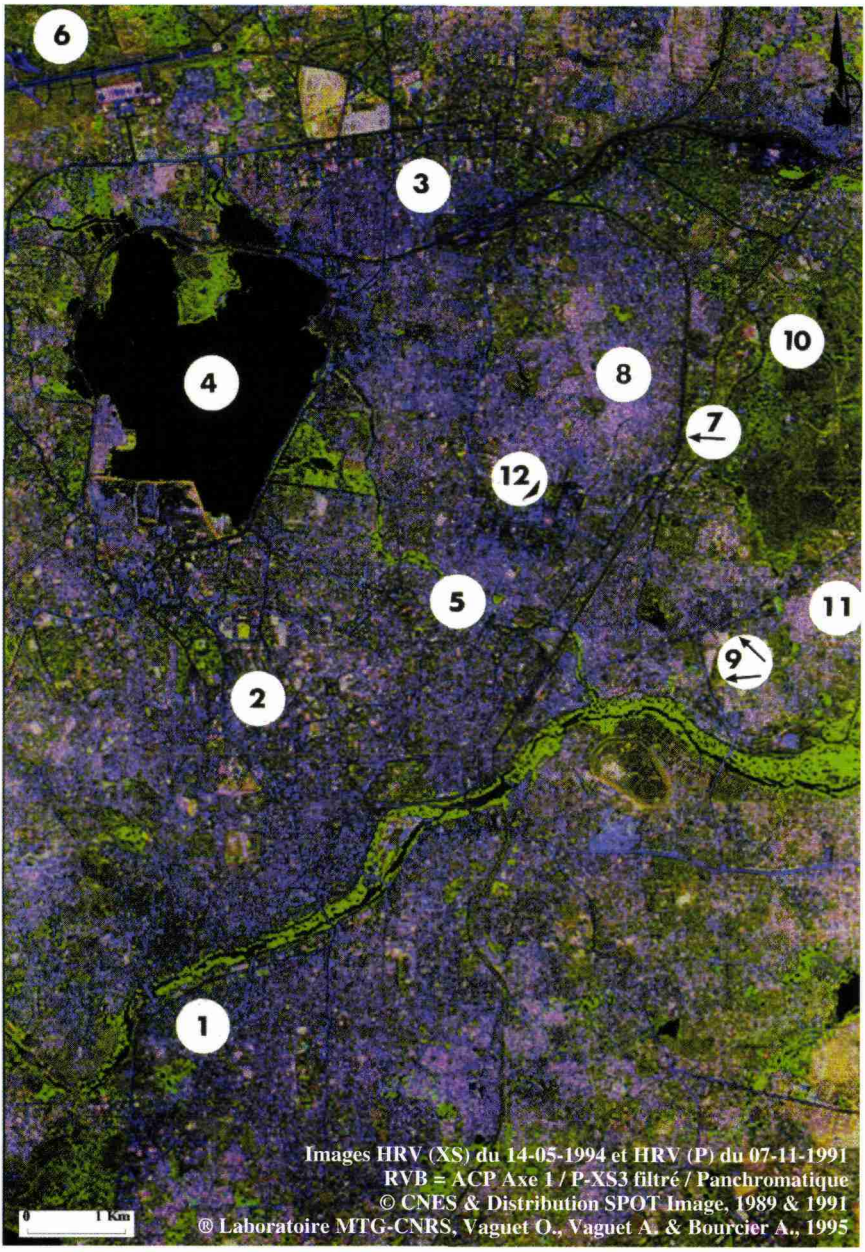
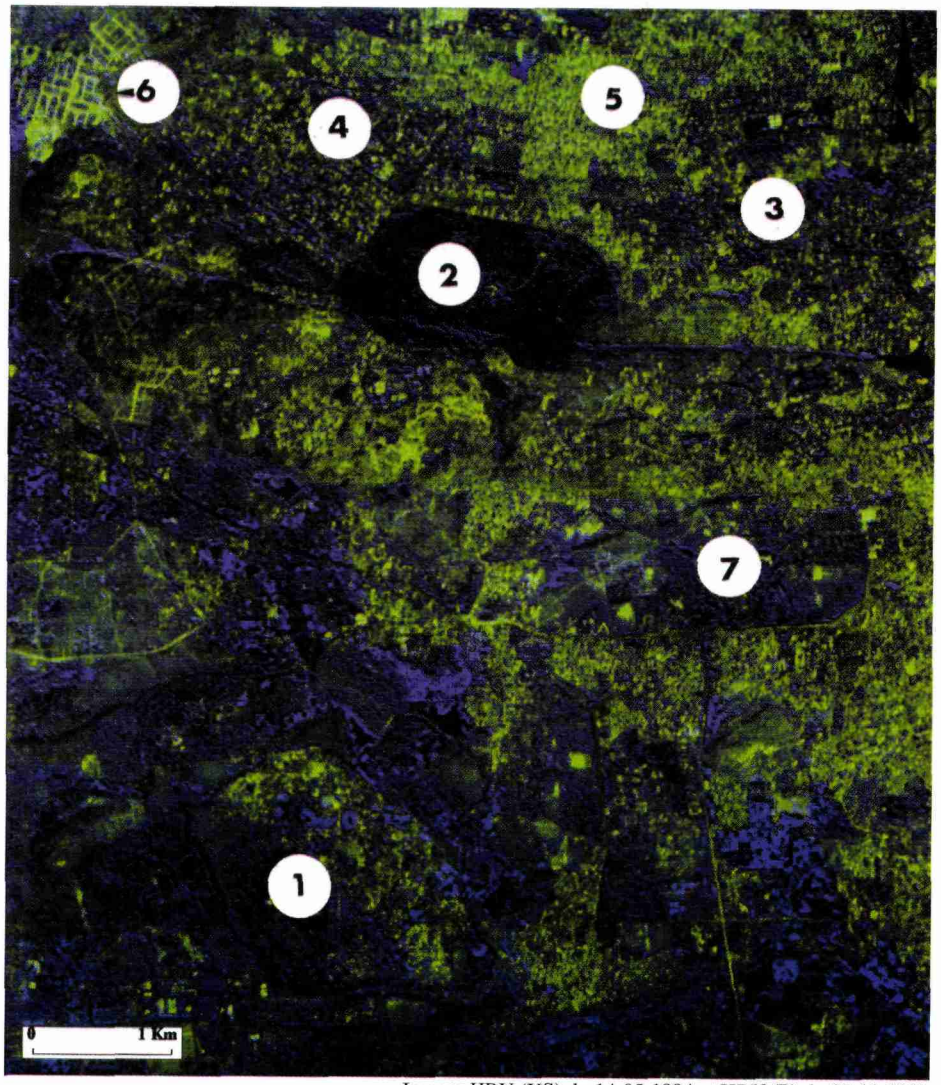


Figure 16-1. Hyderabad (Inde centrale), une métropole polycentrique : 1) le cœur historique; 2) l'actuel centre des affaires; 3) Secunderabad; 4) le lac Husain Sagar; 5) les extensions entre Hyderabad et Secunderabad; 6) la zone industrielle de Sanathnagar; 7) la voie ferroviaire; 8) le tissu urbain dense continu; 9) un nouveau front d'urbanisation; 10) l'Université d'Osmania; 11) la reprise de l'urbanisation; 12) Azamabad



Images HRV (XS) du 14-05-1994 et HRV (P) du 07-11-1991
RVB = Panchromatique filtré / Panchromatique / PXS3 filtré.
© CNES & Distribution SPOT Image, 1989 & 1991
® Laboratoire MTG-CNRS, Vaguet O., Vaguet A. & Bourcier A., 1995

Figure 16-2. Hyderabad et son extension occidentale : 1) le fort de Golconde; 2) la colline granitique de type inselberg; 3) quartier chic de « Banjara Hills »; 4) un semis d'habitat individuel sur de grandes parcelles; 5) un bâti juxtaposé; 6) une implantation d'un réseau de desserte; 7) une réserve foncière privée

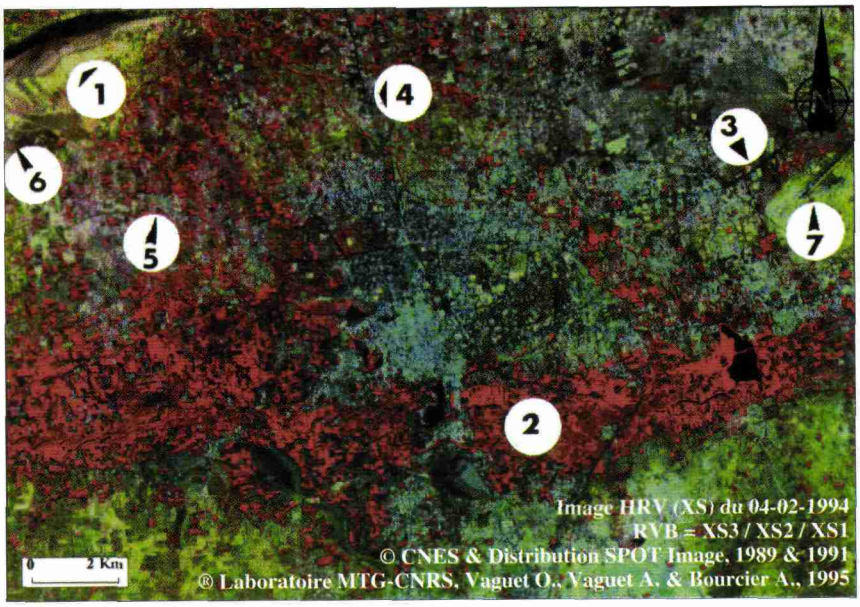


Figure 16-3. Le site urbain de Coimbatore : 1) les Ghats occidentaux; 2) la bande de cultures irriguées; 3) un axe ferroviaire; 4) axe routier et voie ferrée en direction de Mettupalayam; 5) l'Université de Bharathiar; 6) temple de Maruthamalai

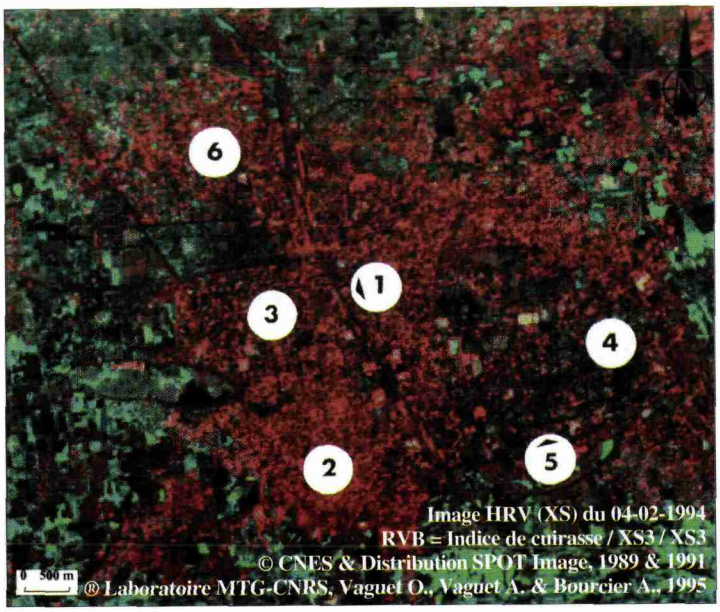


Figure 16-4. Coimbatore, physionomie urbaine : 1) la voie ferrée; 2) le centre des affaires; 3) une extension de première génération; 4) ancien secteur britannique; 5) le quartier du champ de course; 6) les quartiers résidentiels récents

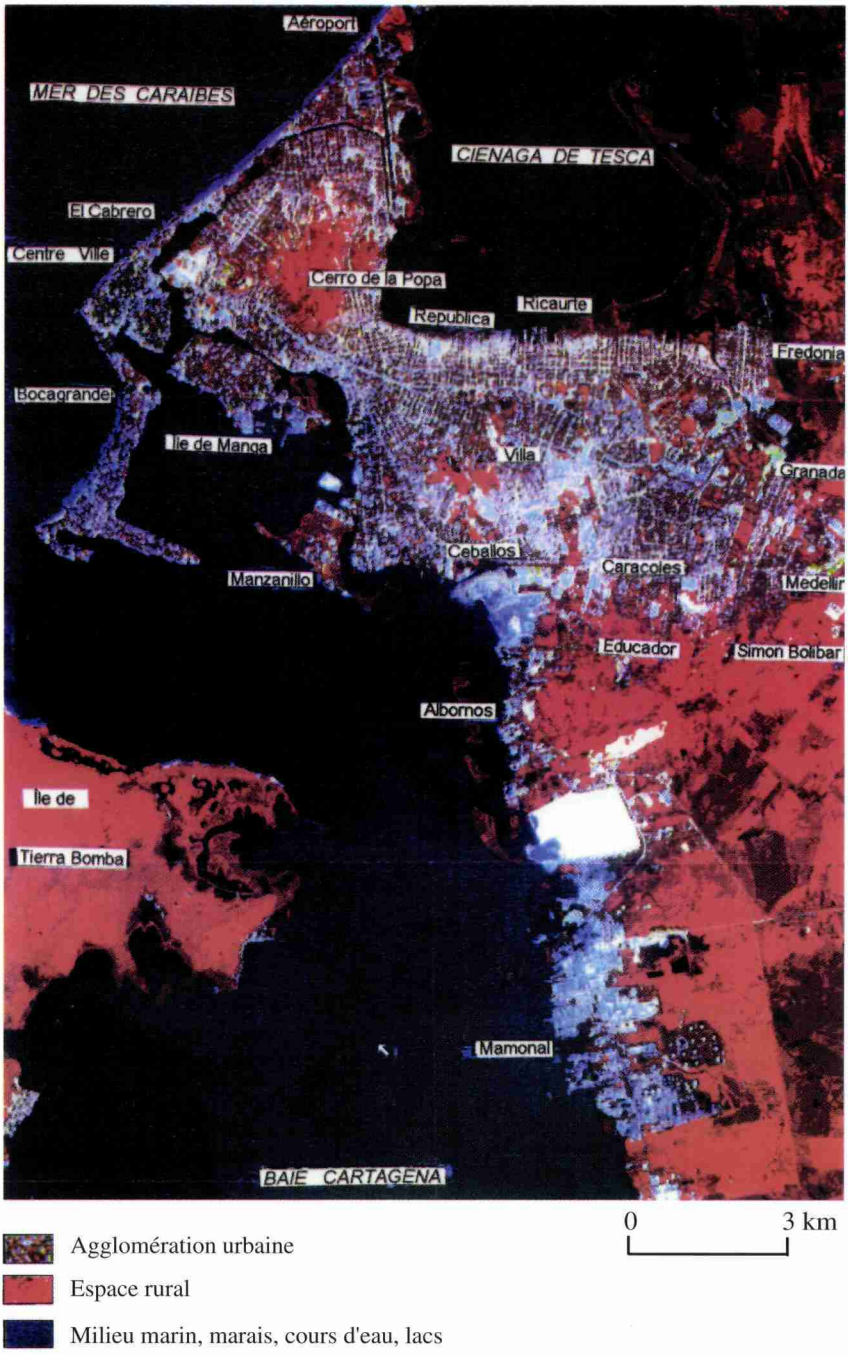


Fig. 17-1. Composition colorée des trois canaux bruts, image HRV de SPOT de Cartagena du 20 décembre 1990

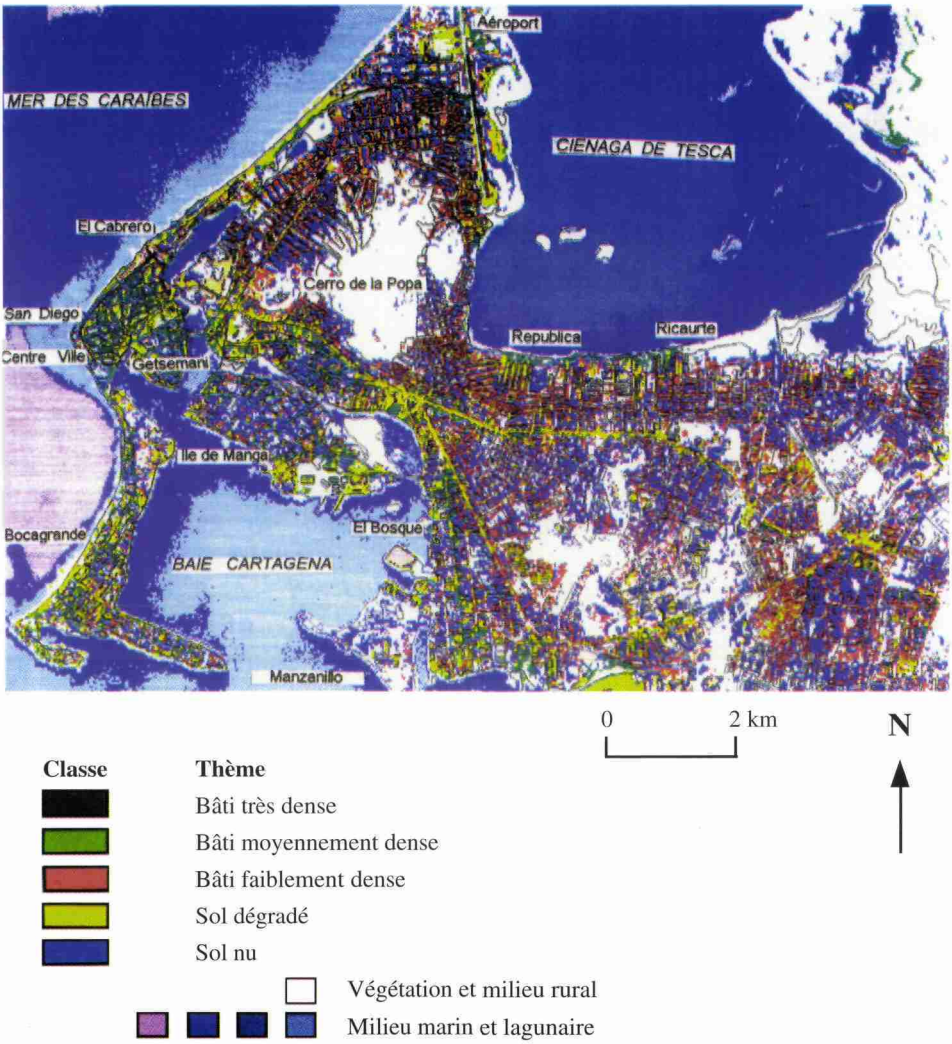


Fig. 17-2. Classification en 10 classes selon la méthode des nuées dynamiques

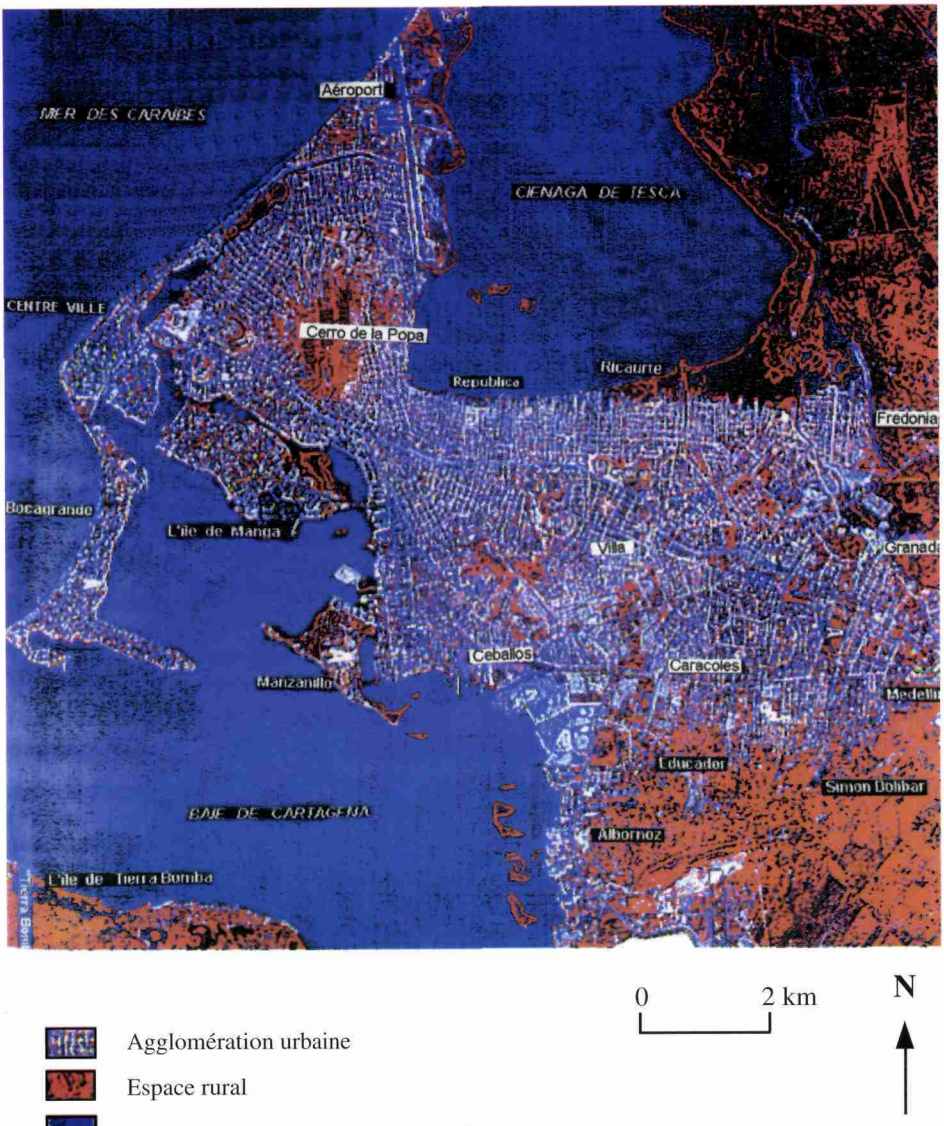


Fig. 17-3. Composition colorée intégrant XS2 (bleu), le laplacien de XS2 (vert) et XS3 (rouge); image HRV (XS) du 20-12-1990

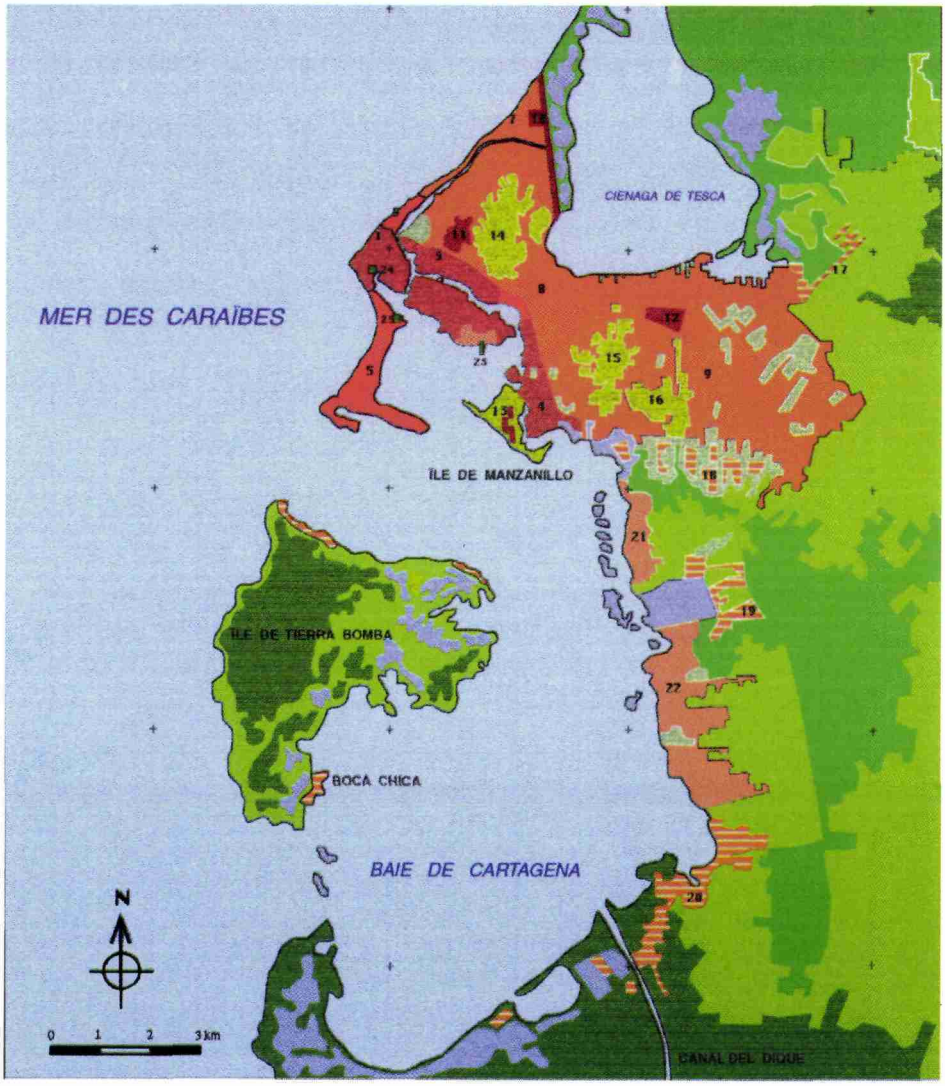


Fig. 17-4. Occupation du sol de la ville de Cartagena, croquis de synthèse à partir de l'image HRV (XS) du 20-12-1990

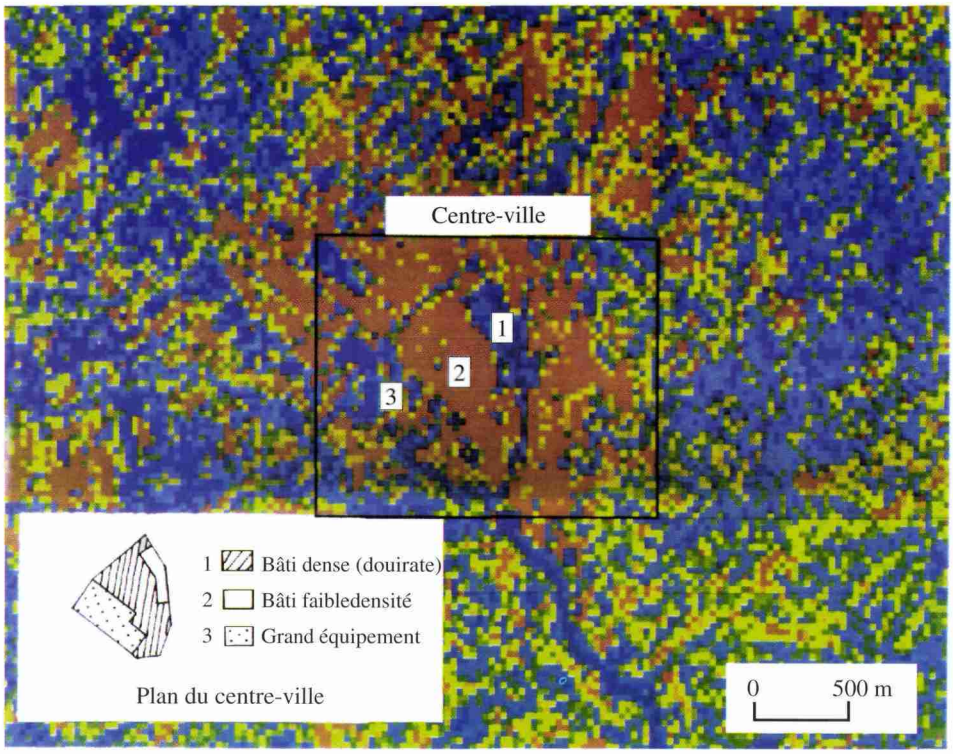


Figure 20-3. Troisième composante de l'ACP avec amélioration du contraste : le centre-ville de Blida et le lit de l'oued Sidi El Sabir sont nettement visibles

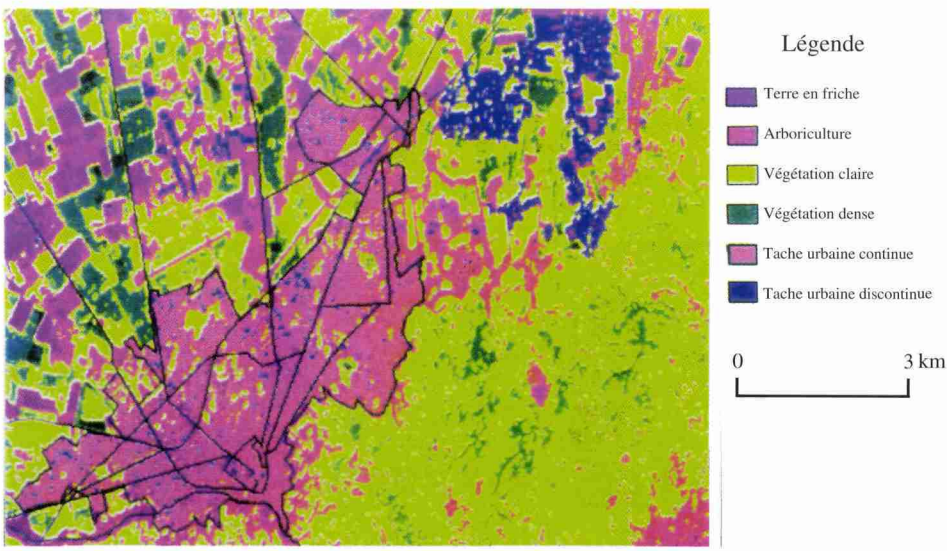


Figure 20-4. Indice de végétation avec présentation de grands thèmes

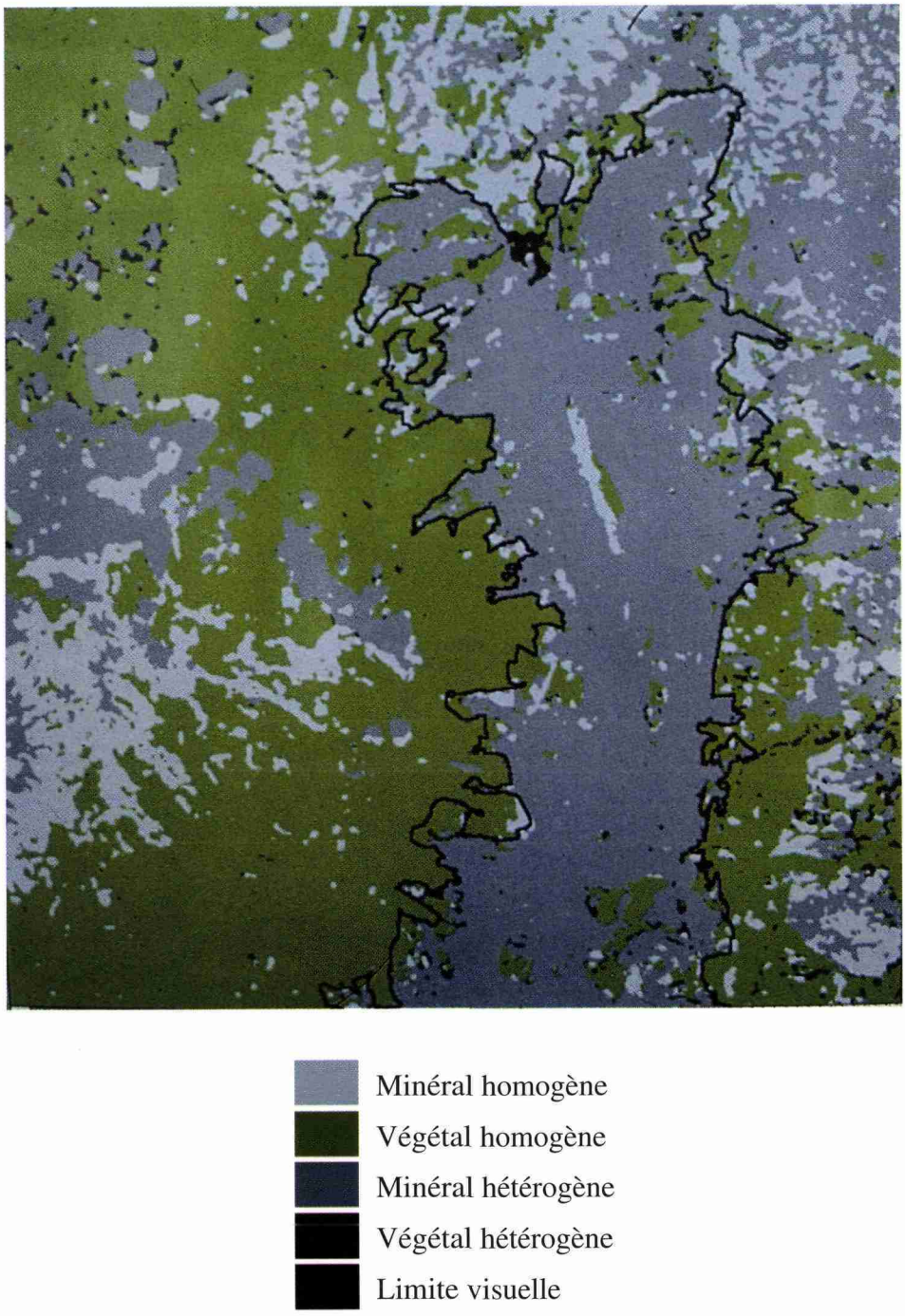


Figure 21-2. Délimitation de la zone urbanisée

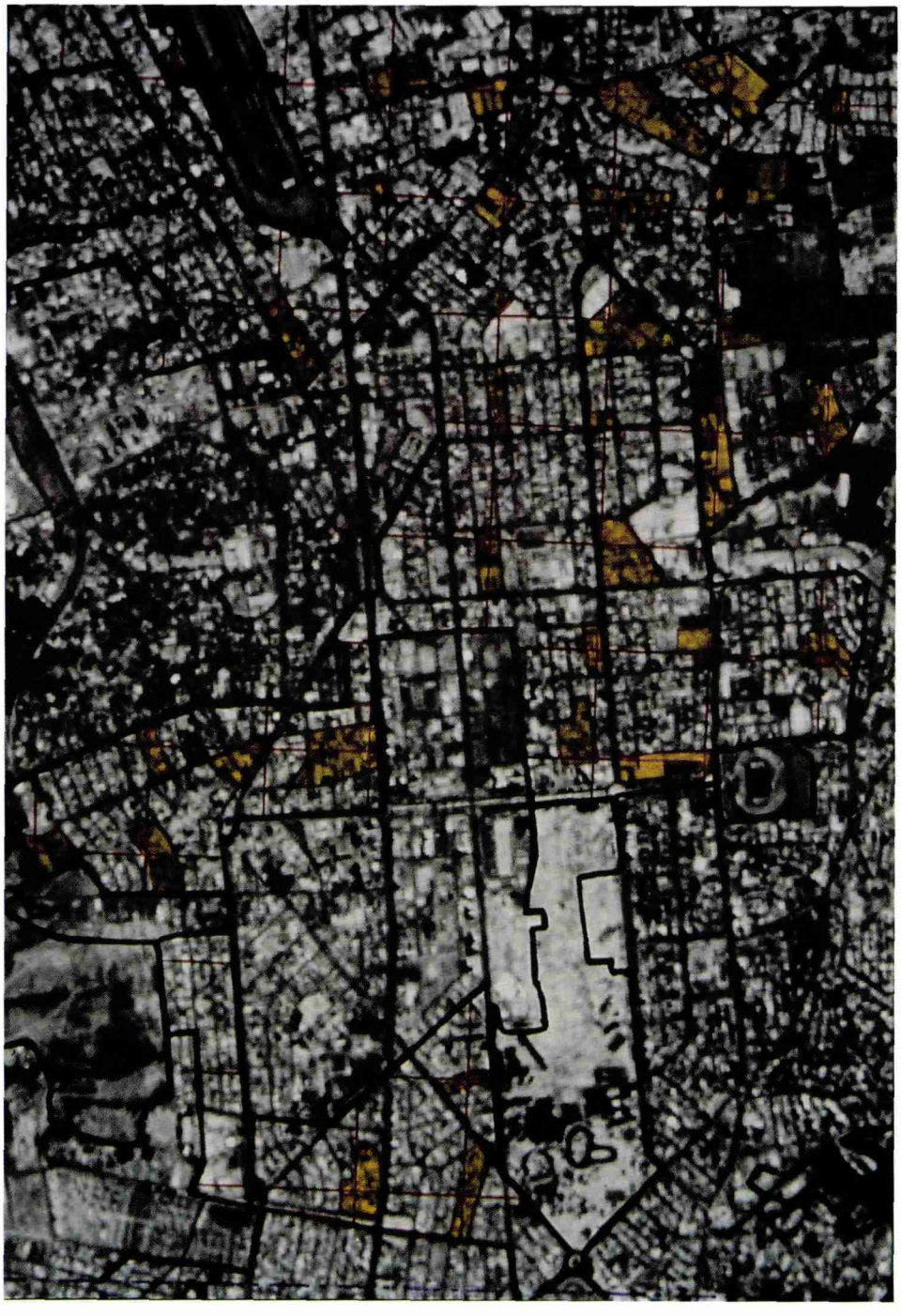


Figure 21-3. Délimitation des strates de densité du bâti

Figure 21-4. Sélection de l'échantillon d'îlots à l'aide d'une grille superposée au canal P

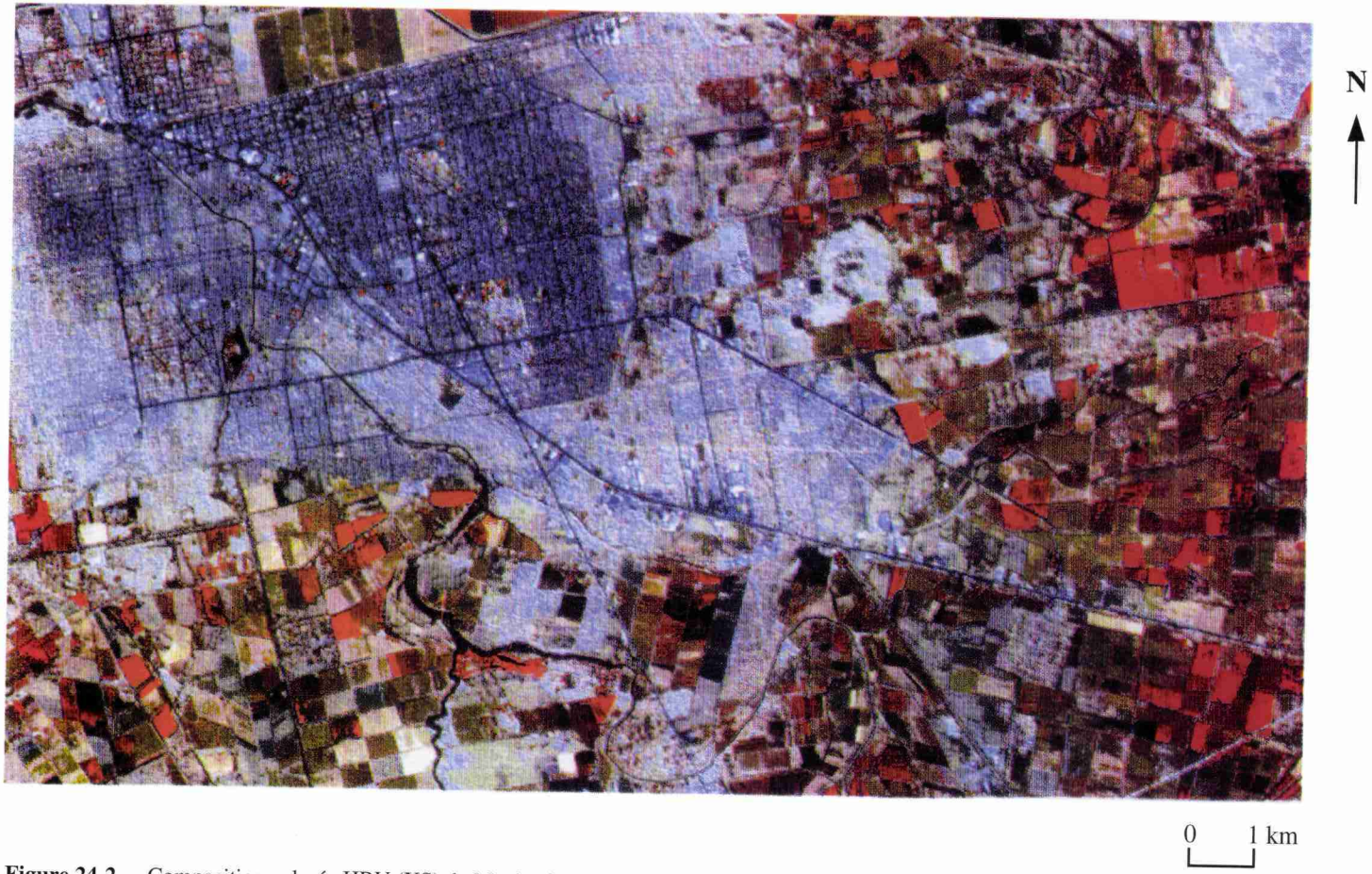
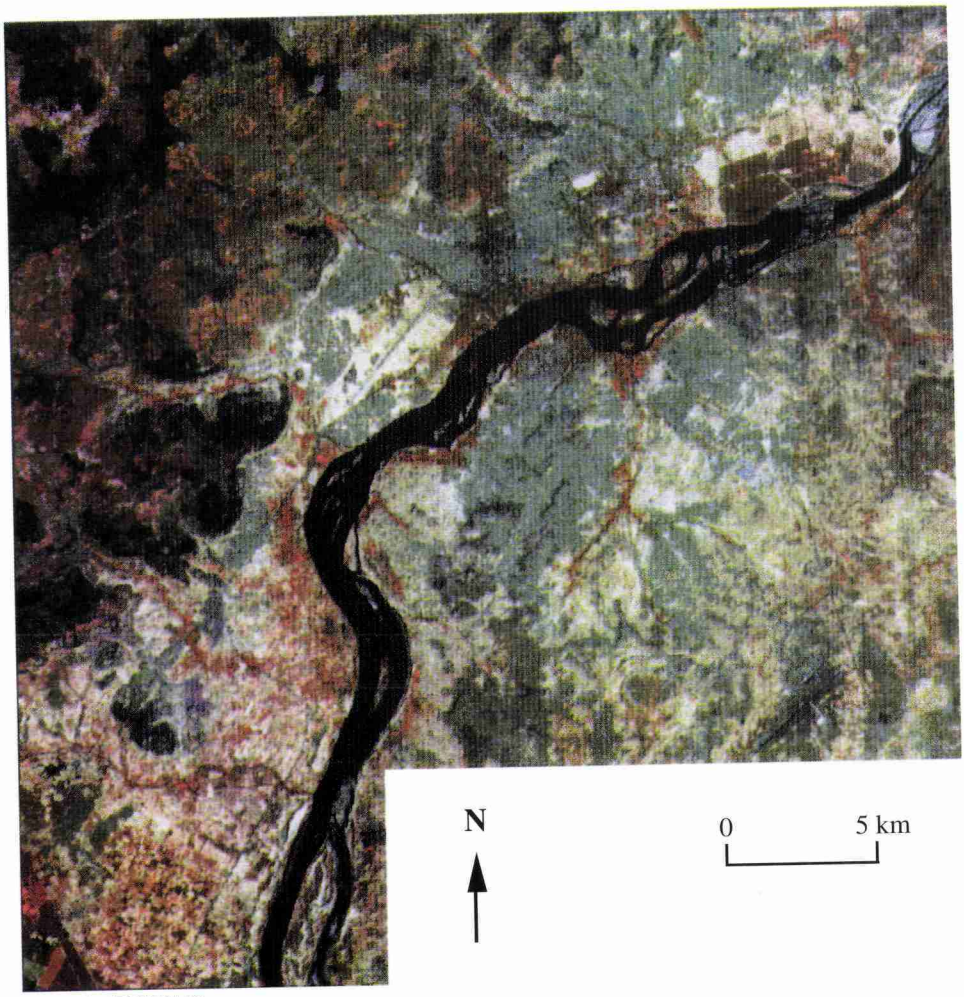
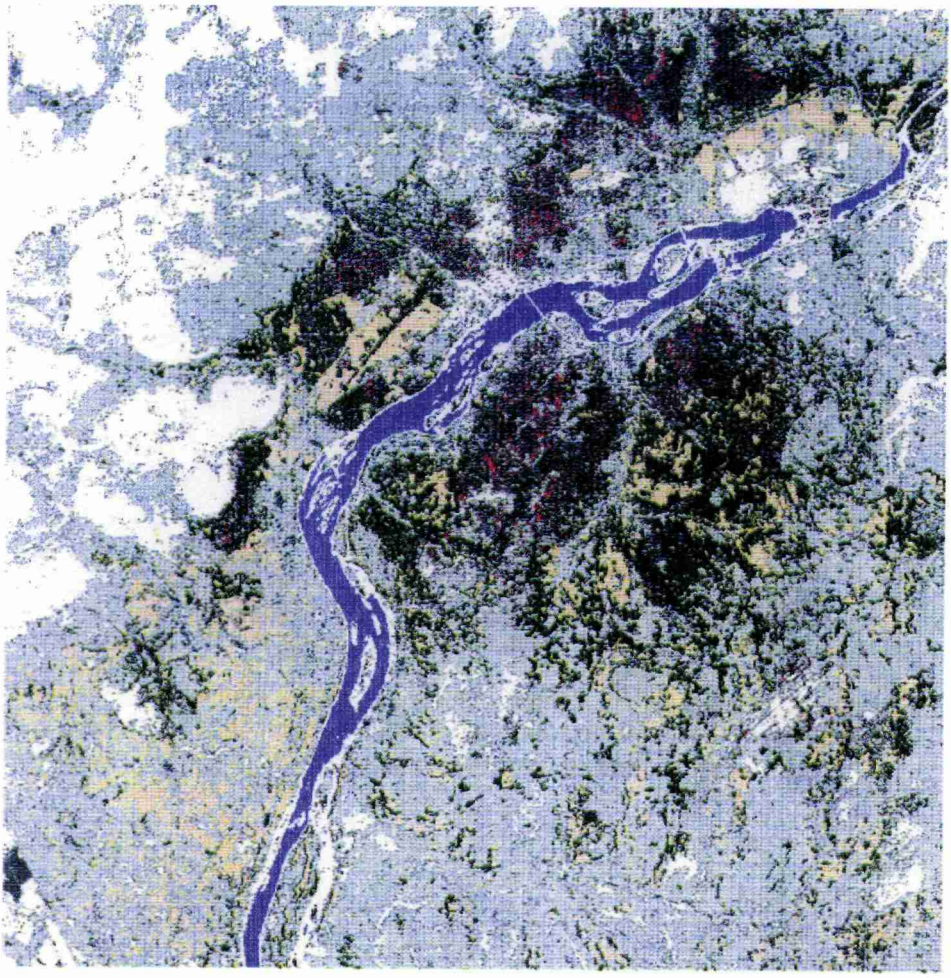


Figure 24-2. Composition colorée HRV (XS) de Mexicali 1994; voir l'interprétation sur la figure 3



© CNES – SPOT IMAGE

Figure 25-1. Bamako, composition colorée des images HRV (XS et P) de SPOT des 29/30-11-1986/KJ 40-325 (10 m)



© CNES – SPOT IMAGE

I Bâti

- Habitat moderne sur trame régulière
- Autre habitat moderne (style pavillonnaire)
- Habitat populaire hors trame

II Non-bâti

- Non bâti: emprise d'équipement public
- Non bâti à vocation agricole
- Végétation arbustive ou herbacée

III Éléments naturels

- Affleurement rocheux
- Fleuve

N

0 5 km

Figure 25-2. Bamako, emprise spatiale des principaux acteurs de la production urbaine. Images HRV (XS et P) de SPOT des 29/30-11-1986/KJ 40-325 (10 m)

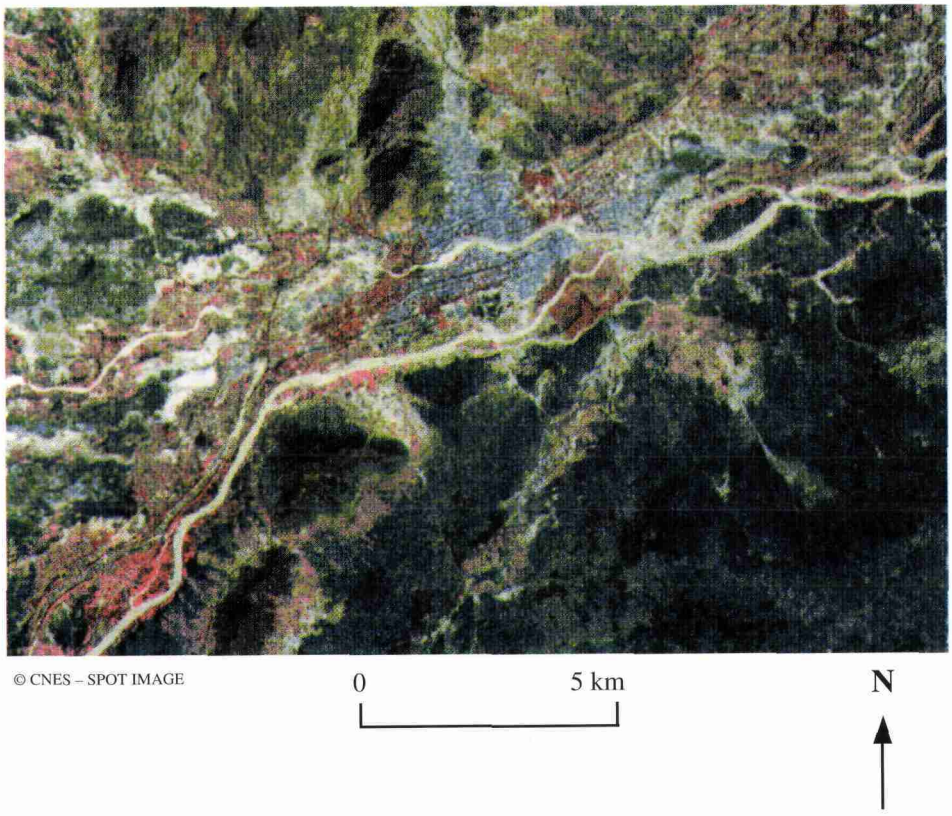


Figure 25-3. Maroua, composition colorée. Images HRV (XS) de SPOT du 11-11-1988/KJ 87-329 (20 m)

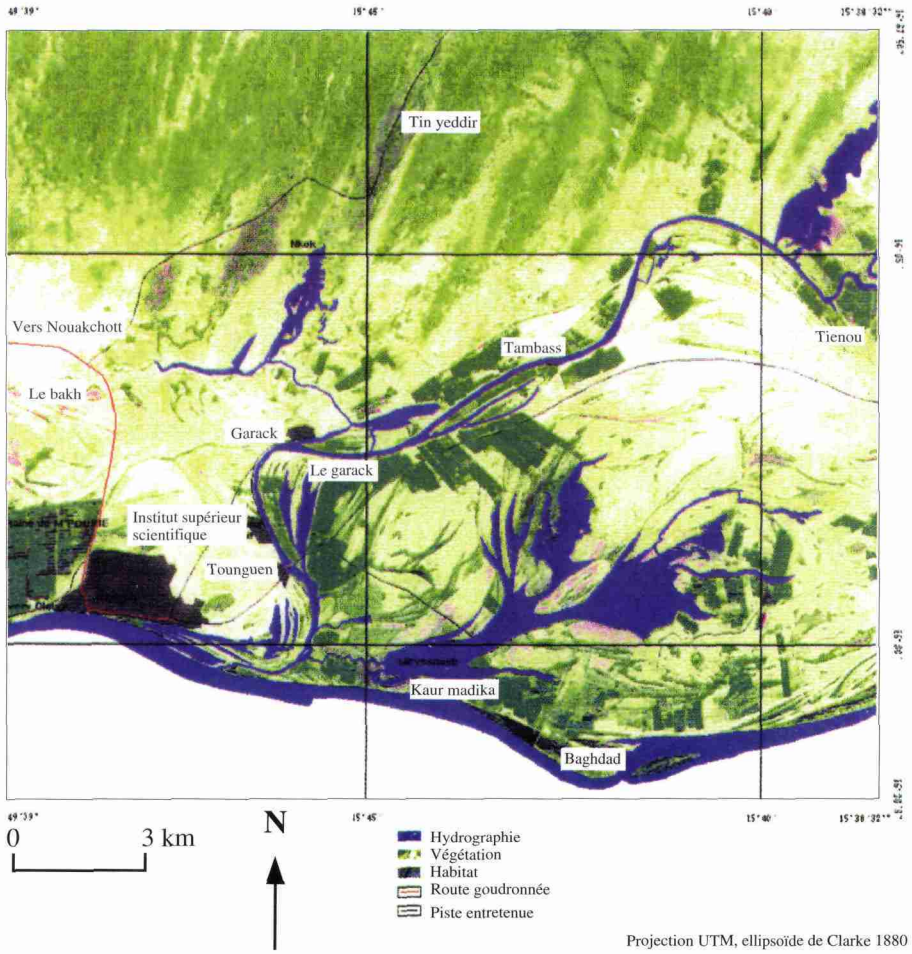


Figure 26-2. Spatiocarte de la région de Rosso à partir d'une image HRV de SPOT-2 (1991)

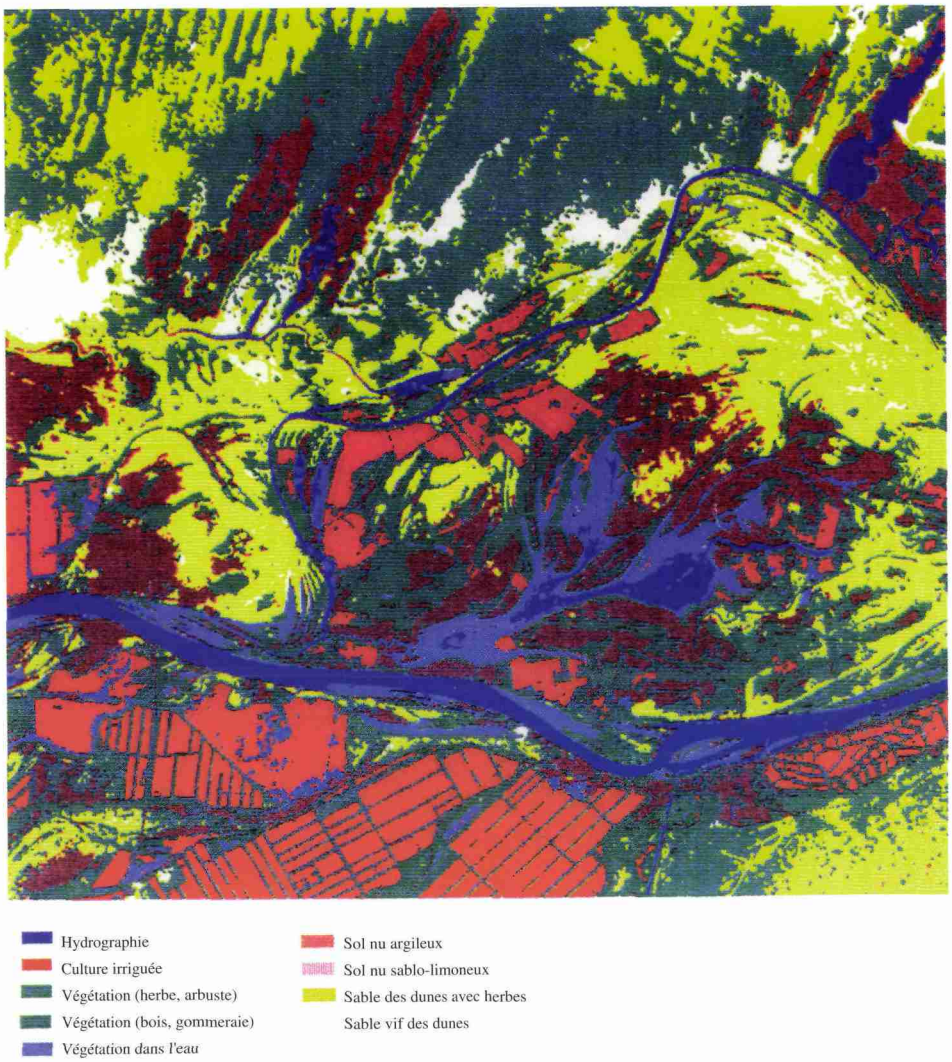


Figure 26-3. Carte d'occupation du sol de la région de Rosso à partir d'une image HRV de SPOT-2 (1991)

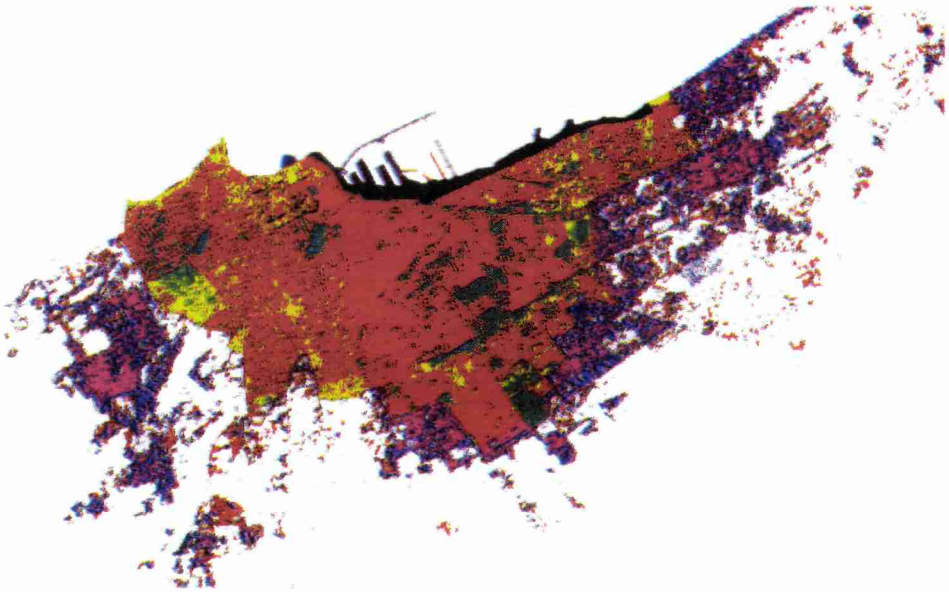


Figure 27-1. Combinaison des trois images HRV de différences (1986-1988, 1988-1991 et 1991-1993) illustrant l'occupation urbaine à l'intérieur de la ville de Casablanca et l'expansion du bâti à la périphérie entre 1986 et 1993

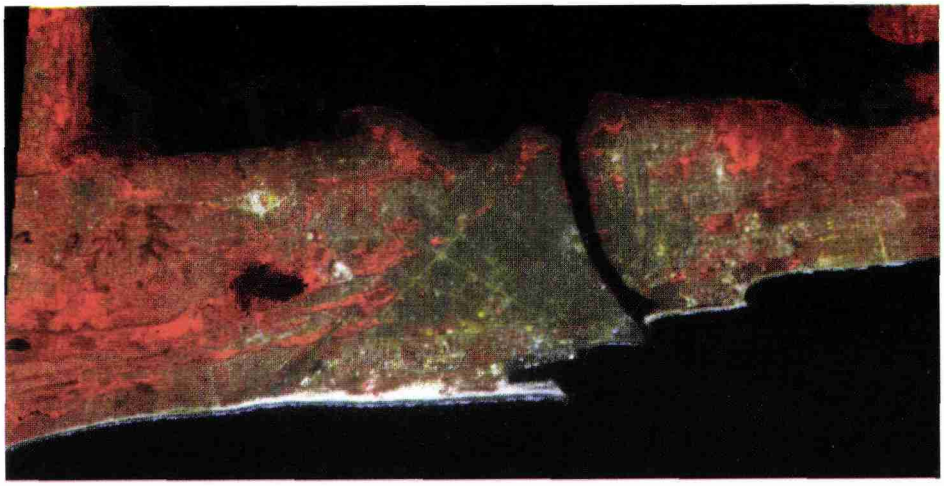


Figure 30-2. Image HRV (XS) de SPOT-1 de la région de Cotonou

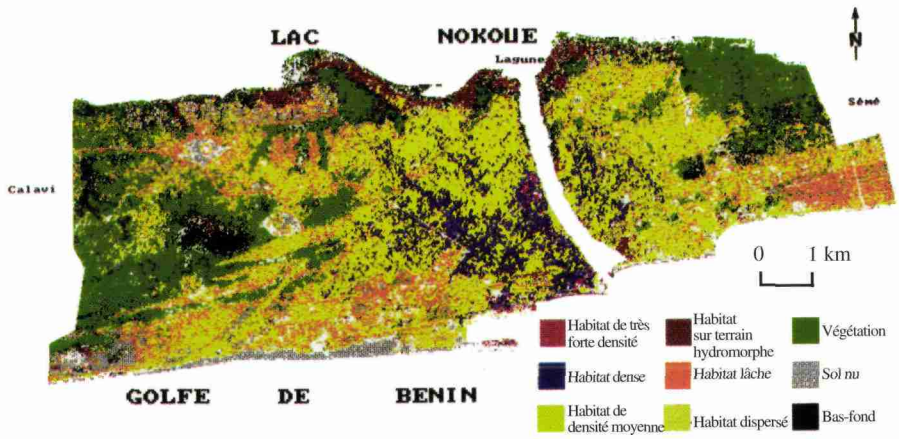
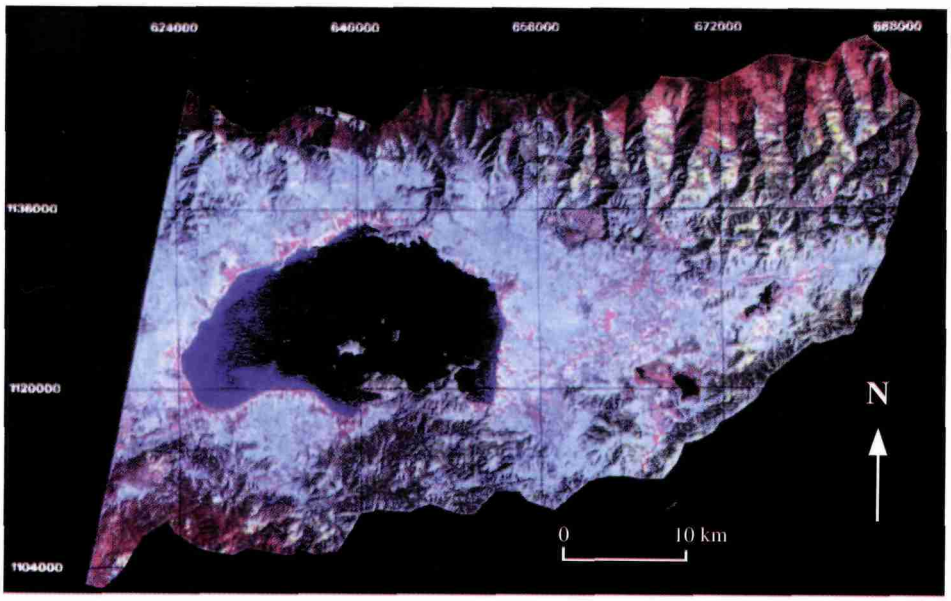
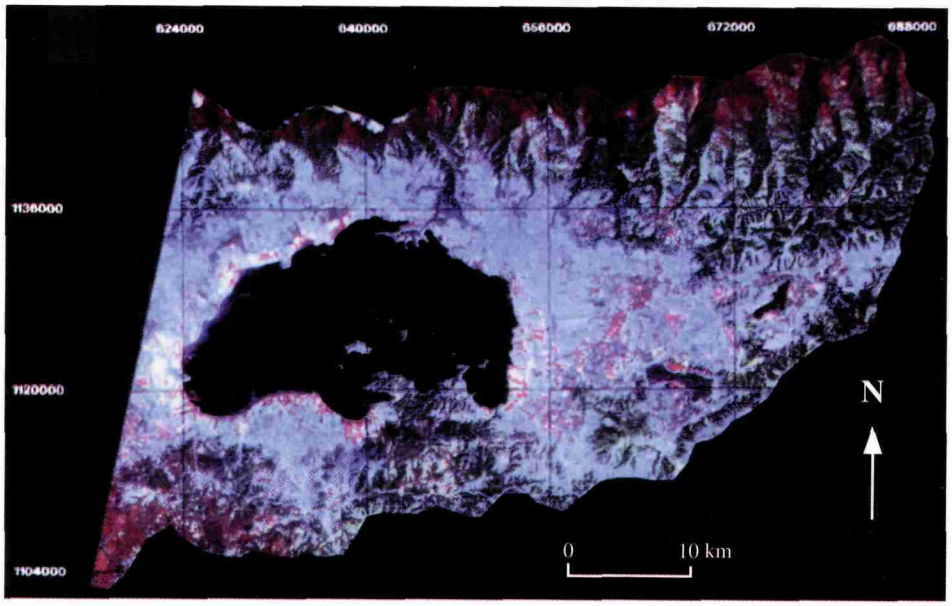


Figure 30-4. Image issue d'une classification dirigée présentant l'occupation du sol en 1987

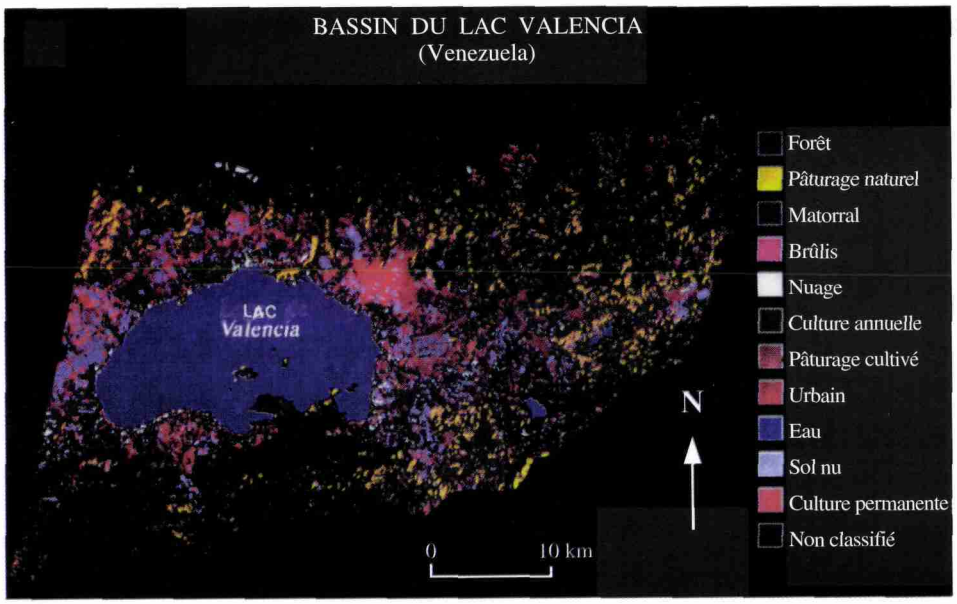


(a)

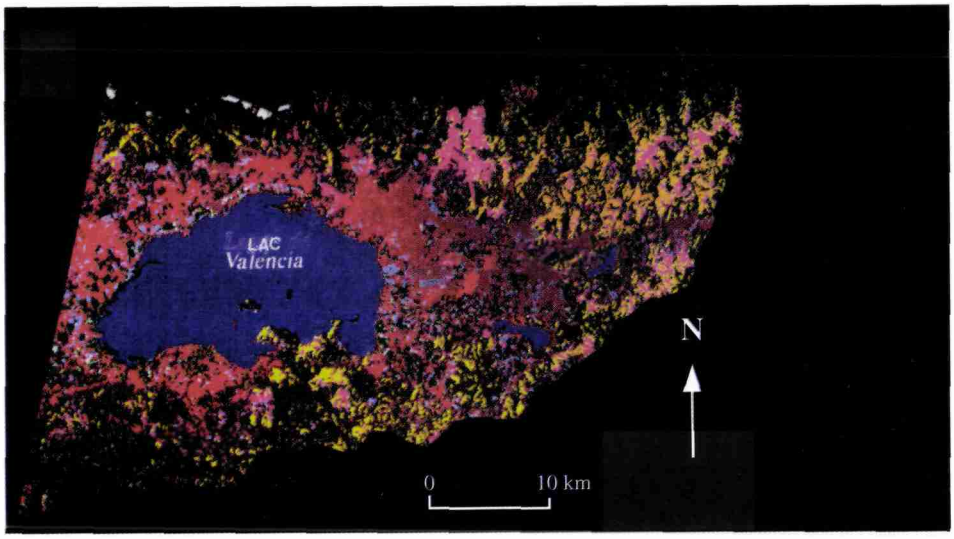


(b)

Figure 31-2. Compositions colorées du bassin du lac de Valencia à partir d'images MSS de 1975 (a) et TM de 1988 (b)



(a)



(b)

Figure 31-3. Classifications dirigées du bassin du lac de Valencia à partir d'images MSS de 1975 (a) et TM de 1988 (b)

Figure 32-3. Résultat de la classification par analyse discriminante par pixel

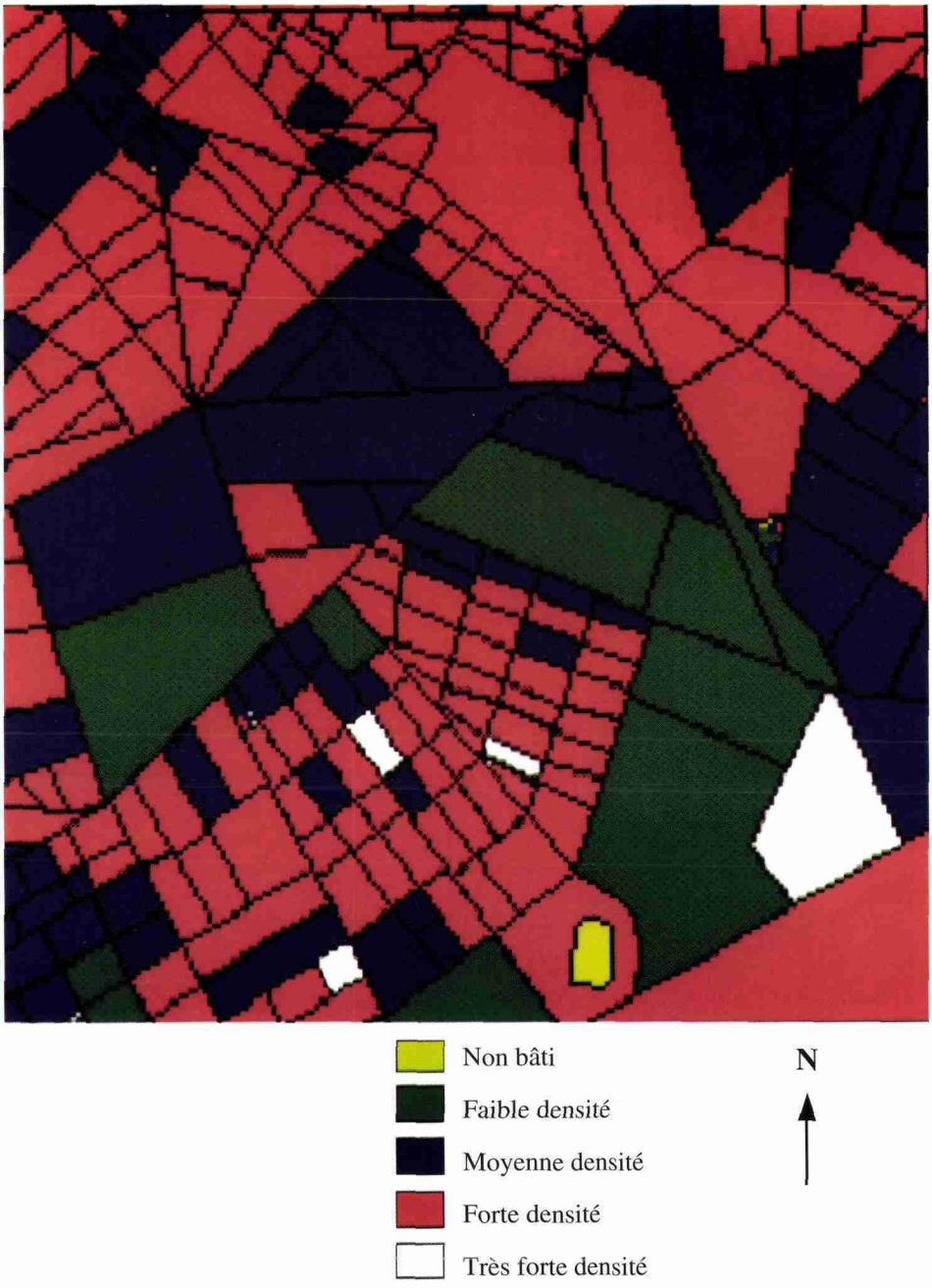


Figure 32-4. Fenêtre extraite de l'image classée par îlot; restitution à 1: 20 000

Figure 34-2. Composition colorée rectifiée : HRV (XS) de SPOT du 27-04-1993, zone centrale du delta du Danube entre Maliuc - Sulina et Chilia Veche - Sfantu Gheorghe

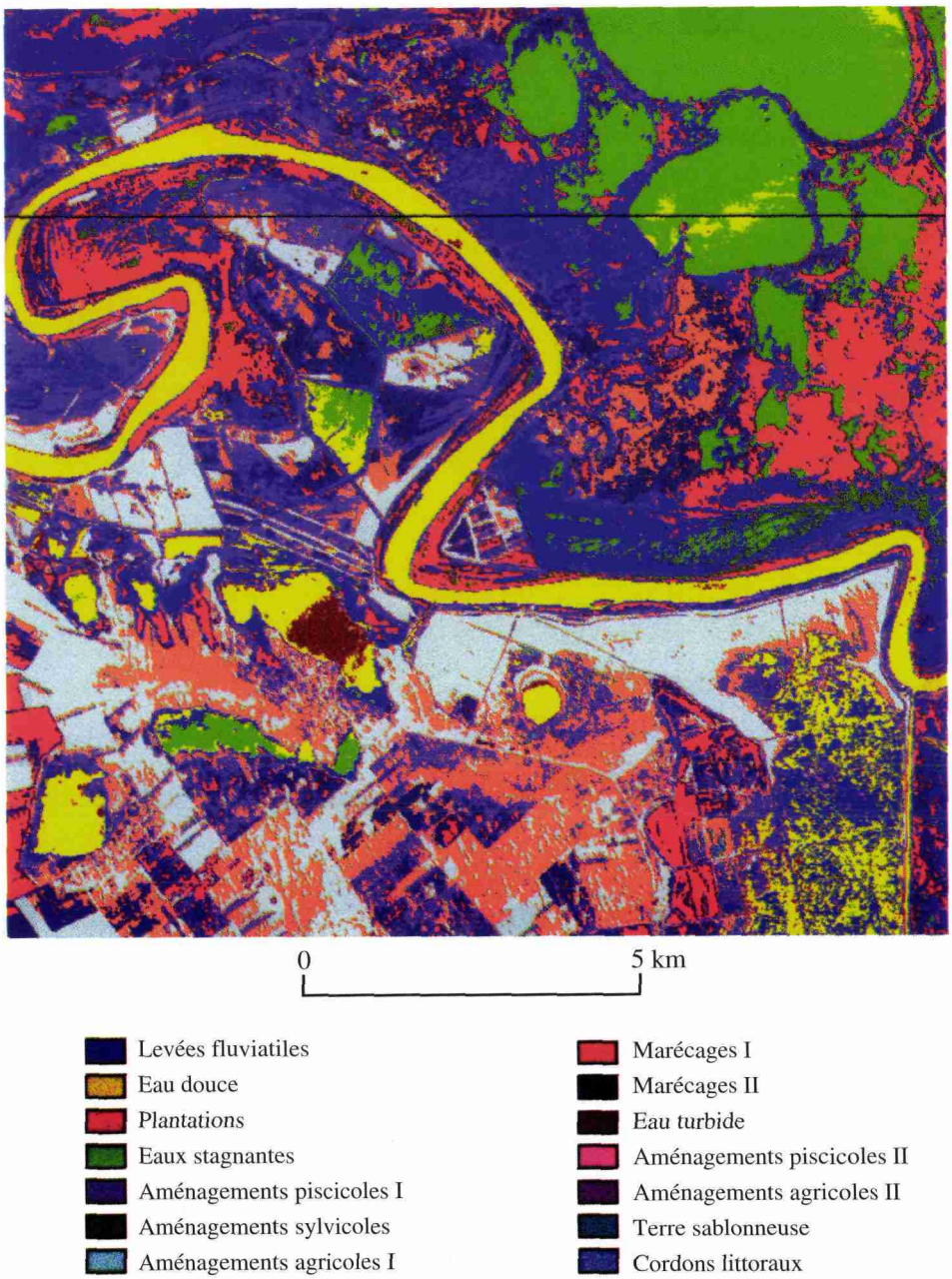


Figure 34-3. Classification non dirigée : HRV (XS) de SPOT du 27-04-1993, zone Murghiol-Dunavat

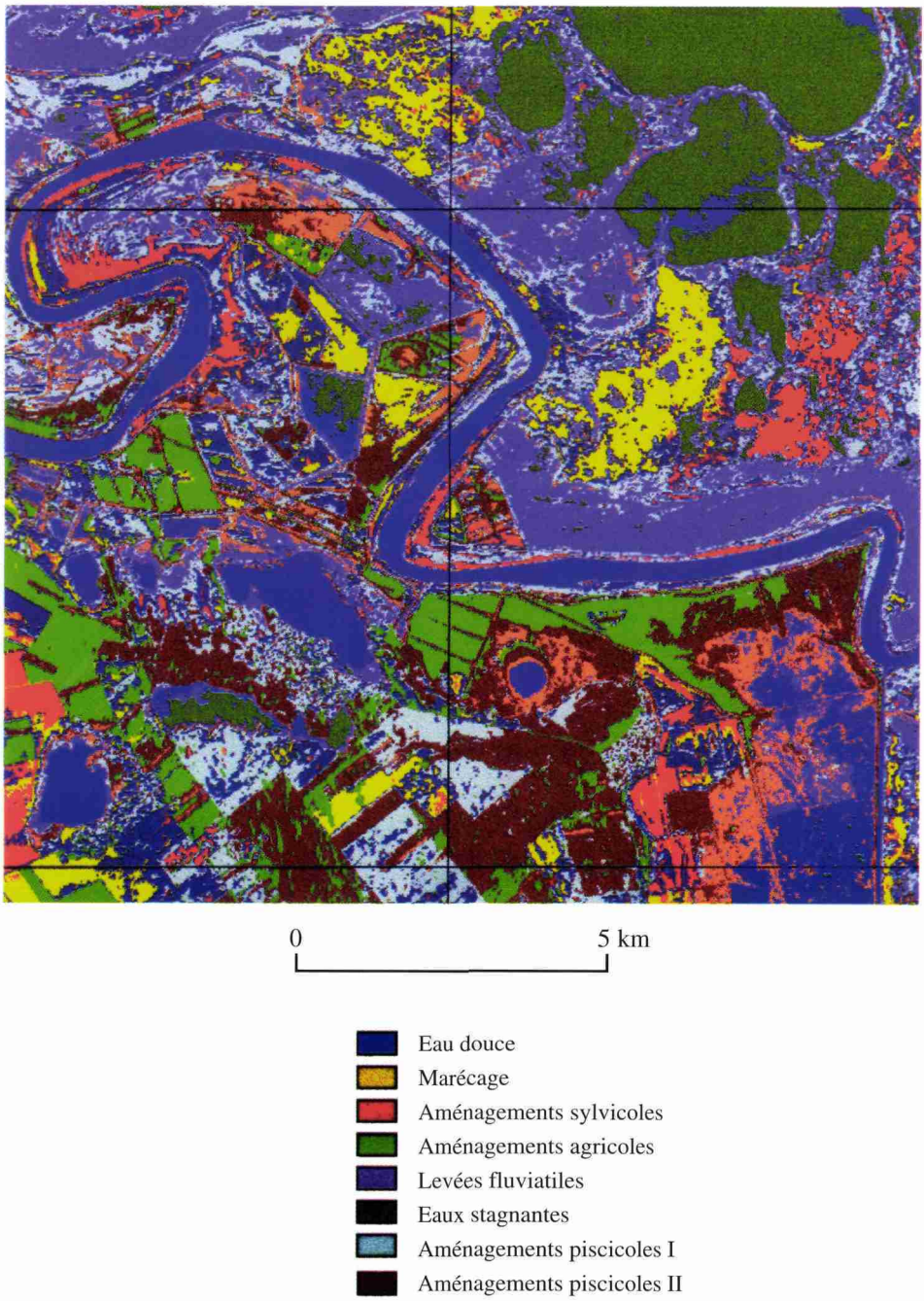


Figure 34-4. Classification dirigée : HRV (XS) de SPOT du 27-04-1993, zone Murghiol-Dunavat

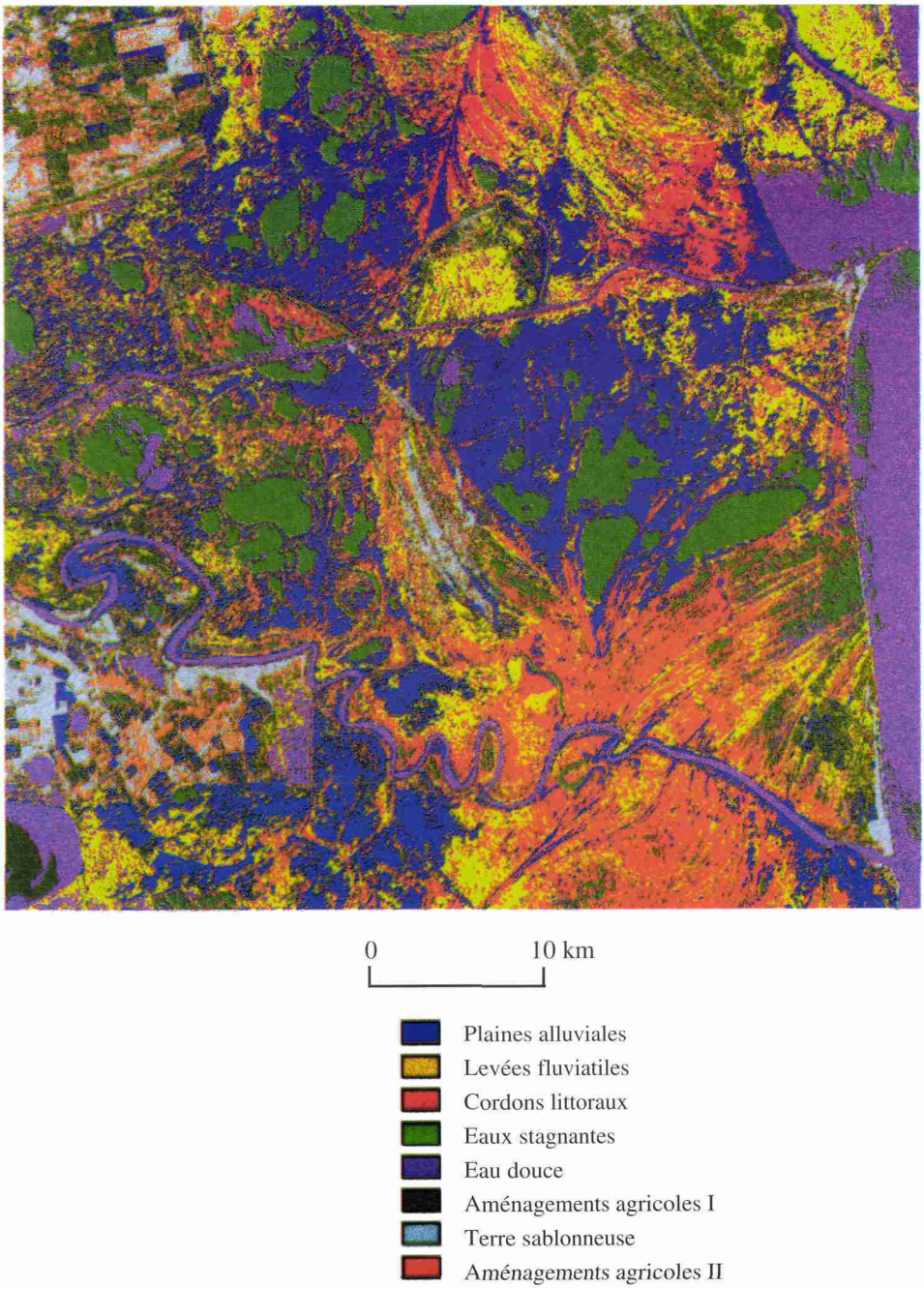


Figure 34-5. Classification non dirigé : HRV (XS) de SPOT du 27-05-1986, zone centrale du delta du Danube entre Maliuc - Sulina et Chilia Veche - Sfantu Gheorghe

PARTIE II

Télédétection et urbanisme

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 123-131

12

Différenciation des tissus résidentiels à l'aide de l'indice PVI, de la morphologie mathématique et du filtrage contextuel : exemple de Genève (Suisse)

PIERRE TERRETTAZ et CLAUDE COLLET

Institut de géographie, Université de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg, Suisse;
téléphone : +41 (37) 29-90-10; télécopieur : +41 (37) 29-97-46;
CÉ : pierre.terrettaz@unifr.ch

Résumé

En milieu urbain, les typologies utilisées par les aménagistes et les statisticiens proposent une différenciation des zones résidentielles selon la densité, le type et la continuité du bâti, soit des espaces résidentiels continus et denses, collectifs, pavillonnaires, discontinus. Dans notre étude, nous cherchons à mesurer l'intérêt de l'indice perpendiculaire de végétation PVI pour la différenciation des tissus résidentiels de la ville de Genève, ainsi que l'apport des outils de morphologie mathématique et de la prise en compte du contexte dans la classification. Le PVI moyen, calculé dans des fenêtres de taille variable selon la catégorie de bâti, permet de distinguer partiellement les types de bâti : plus la densité augmente, plus la valeur du PVI diminue. Cependant, il ne suffit pas pour les caractériser complètement car à une même valeur de PVI peuvent correspondre des types d'habitat d'aspect sensiblement différent. La morphologie mathématique offre des outils simples et efficaces qui permettent notamment de traiter en partie les effets de bordure induits par le calcul de valeurs moyennes dans des fenêtres mobiles. Des règles simples sont utilisées pour tenir compte du contexte en plus des valeurs spectrales lors de la classification de pixels situés en bordure de zones homogènes.

1. Introduction

Dans le domaine de la cartographie urbaine à but statistique et d'aménagement, les typologies établies reposent sur des critères de types morphologique et fonctionnel. À titre d'exemple, au niveau II, EUROSTAT (1993) distingue les catégories suivantes au sein des surfaces artificialisées : les zones résidentielles et services publics, les activités industrielles et commerciales, les infrastructures techniques, transports et communications, les industries extractives, chantiers, décharges et friches, les terrains aménagés à usage de loisirs. La reconnaissance des objets et leur attribution à l'une ou l'autre des catégories requièrent l'utilisation conjointe de l'analyse visuelle de compositions colorées et de sources d'information exogènes; les méthodes de classification automatique s'avèrent quant à elles insuffisantes.

Au sein des zones résidentielles, les subdivisions opérées reposent essentiellement sur des critères morphologiques et de densité : centre densément peuplé, habitat continu moyennement dense, habitat résidentiel pavillonnaire, habitat résidentiel discontinu, habitat collectif. Dans les villes européennes, la densité du bâti est fortement liée à la présence d'espaces verts. Un indicateur de biomasse comme l'indice perpendiculaire de végétation (PVI) peut s'avérer intéressant pour refléter ces différences de densité. Avec les capteurs de haute résolution comme TM de Landsat ou HRV de SPOT, la valeur PVI associée au pixel n'est pas représentative de la classe de bâti à laquelle il appartient; en effet, les distinctions opérées entre les catégories de bâti n'ont de sens qu'à l'échelle de l'îlot ou du quartier. Aussi, le pixel ne peut être considéré de façon isolée; son voisinage doit être pris en compte, comme le préconisent les approches zonales (MICHEL et LORTIC, 1992). La subdivision de l'espace urbain en zones peut être déterminée soit par un découpage préexistant, soit par l'emploi de méthodes de segmentation. Vu la complexité du milieu urbain, ces dernières s'avèrent souvent peu efficaces pour établir un découpage adéquat. En l'absence de découpages existants, l'utilisation de fenêtres mobiles constitue une solution habituelle pour la prise en compte du voisinage. Ainsi, par le calcul du PVI moyen au sein d'une fenêtre mobile, la valeur du pixel central est affectée par celles du voisinage constitué par les autres pixels de la fenêtre.

À ce stade, seules les caractéristiques spectrales du pixel et de son voisinage sont prises en compte. Dans l'analyse visuelle, la taille des objets et l'affectation du voisinage constituent deux autres éléments clés de l'interprétation. À notre échelle d'analyse, la taille joue aussi un rôle important dans la mesure où les objets trop petits, soit de l'ordre d'un pixel, ne sont pas pertinents. La prise en compte de l'affectation du voisinage s'avère surtout nécessaire pour les pixels situés en bordure de zones homogènes (mixels) et qui sont particulièrement touchés par les effets de bordure générés par l'emploi de fenêtres mobiles lors du calcul de valeurs moyennes. De façon générale, les outils à disposition au sein des logiciels de traitement d'images et de SIG sont insuffisants pour la prise en compte du contexte et de la taille des objets. La morphologie mathématique (SCHMITT et MATTIOLI, 1994) offre un ensemble d'outils intéressants, mais incomplets, pour gérer ces problèmes.

Dans cet article, nous présentons une étude qui cherche à : 1) mesurer l'intérêt de l'indice de biomasse PVI pour distinguer les catégories d'habitat résidentiel; 2) utiliser la morphologie mathématique comme outil de filtrage pour prendre en compte la taille des objets et gérer les effets de bordure; 3) considérer l'affectation des pixels voisins pour la classification des pixels situés en bordure de zones homogènes.

Elle s'inscrit dans le cadre de l'action de recherche partagée de l'AUPELF-UREF « Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud ».

2. Site d'étude et données utilisées

Une zone carrée de 10 240 m de côté extraite de l'agglomération genevoise sert de cadre d'étude. Elle comprend la majeure partie des types d'occupation du sol de la région et présente une diversité de bâti intéressante. La topographie des lieux ne présente pas d'accidents majeurs.

Une image HRV (XS) de SPOT datée du 21 juillet 1990 est utilisée. La date d'acquisition s'avère adéquate pour le calcul de l'indice de végétation en raison du bon contraste entre les zones de végétation et les zones bâties. L'image a subi une correction géométrique de type image à carte avec une méthode de rééchantillonnage de type bicubique. Des photographies aériennes à l'échelle 1: 30 000 environ servent de réalité de terrain.

3. Mode de calcul de l'indice perpendiculaire de végétation (PVI)

La méthodologie mise en oeuvre nécessite le calcul de l'indice perpendiculaire de végétation (PVI). Nous rappelons brièvement son mode de calcul (ABEDNEGO, 1989), qui est ausi illustré à la figure 1.

La valeur PVI d'un pixel correspond à la distance perpendiculaire entre le couple de valeurs du pixel et la droite des sols dans un diagramme bivarié représentant les bandes rouge et infrarouge. Son calcul requiert deux étapes : 1) la détermination de la droite des sols; 2) le calcul de la distance perpendiculaire.

L'obtention de l'équation de la droite des sols passe par la sélection d'échantillons. La méthode des moindres rectangles appliquée à ces échantillons permet de déterminer l'équation de la droite qui s'écrit :

$$Y - Y_m = \text{tg}\,\alpha \cdot (X - X_m) \qquad (1)$$

$$Y - \text{tg}\,\alpha \cdot X + \text{tg}\,\alpha \cdot X_m - Y_m = 0 \qquad (2)$$

où X_m, Y_m = valeurs moyennes des échantillons de sol dans le rouge et le proche infrarouge respectivement;

$\text{tg}\,\alpha$ = pente de la droite des sols; elle est égale à $\text{tg}\,\alpha = \sigma Y / \sigma X$; σY et σX corrrespondant aux écarts-types des échantillons de sols dans le proche infrarouge et le rouge.

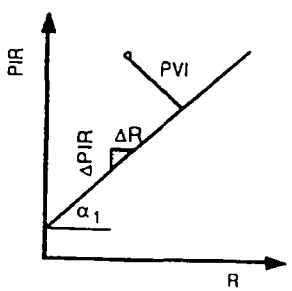


Figure 1. Technique de calcul de la droite des sols

La méthode des moindres rectangles minimise la somme des surfaces des triangles formés par la droite d'estimation et les points des échantillons. Elle est mieux adaptée que la méthode des moindres carrés car elle n'implique pas qu'une des variables soit dépendante de l'autre.

4. Analyse de la valeur discriminante du PVI à partir d'échantillons de bâti

L'image étudiée sur Genève présente trois catégories principales de bâti résidentiel : 1) l'habitat dense (centres anciens, tissus anciens en îlots); 2) l'habitat collectif (habitat en barres et grands ensembles avec des espaces verts assez importants); 3) l'habitat pavillonnaire (caractérisé par des maisons individuelles ou des bâtiments collectifs de taille restreinte). En règle générale, la densité de ces tissus est faible dans le cas de Genève. Nous cherchons à distinguer ces trois types d'habitat, auxquels nous avons ajouté la catégorie « espaces verts ».

Avant de classer l'ensemble de l'image, nous avons procédé à une analyse discriminante appliquée à des échantillons de bâti pour vérifier l'intérêt du PVI. Parmi les variables retenues figurent le PVI et les valeurs moyennes du PVI calculées dans des fenêtres 3 x 3, 5 x 5 et 7 x 7, ainsi qu'un indice de brillance et différents indices de variabilité (écart-type, différence moyenne entre les pixels de la fenêtre et le pixel central, moyenne des différences moyennes) calculés pour les images XS1, XS2, XS3 et PVI dans des fenêtres de taille variable (3 x 3 à 7 x 7). Les moyennes du PVI obtenues avec des fenêtres de taille 5 x 5 et 7 x 7 constituent très nettement les variables les plus discriminantes et assurent une bonne séparabilité entre les objets des différentes catégories; les indices de variabilité n'apportent qu'une information accessoire.

5. Méthodologie

Les étapes pour classer l'image des zones résidentielles sont les suivantes : 1) délimitation du contour de la zone bâtie par analyse visuelle d'une composition colorée P+XS; 2) calcul des valeurs du PVI et du PVI moyen; 3) classification par seuillage; 4) filtrage par morphologie mathématique et suppression des conflits entre les classes; 5) classification contextuelle pour les pixels encore non classés.

5.1. Délimitation du contour de la zone bâtie

Pour établir rapidement le masque approximatif des zones résidentielles, nous avons procédé par analyse visuelle d'une composition colorée P+XS; elle permet de délimiter grossièrement le contour de la zone bâtie et d'éliminer les grandes infrastructures de transport (aéroport, gares).

5.2. Calcul des valeurs du PVI et du PVI moyen

Pour chaque pixel de l'image, la valeur PVI est obtenue par la procédure indiquée à la section 3.

Afin de prendre en compte le voisinage, nous calculons ensuite le PVI moyen au sein d'une fenêtre mobile. La taille de la fenêtre constitue un point délicat. D'après l'analyse discriminante appliquée à partir des échantillons de bâti, plus la taille de la fenêtre est grande, meilleure est la séparabilité des classes. Ceci s'explique dans la mesure où l'utilisation d'une grande fenêtre a pour effet de diminuer la variabilité au sein des échantillons, ce qui contribue à maximiser leur séparabilité. Cependant, l'emploi d'une fenêtre de grande taille génère de nombreux effets de bordure. Aussi avons-nous opté pour une taille adaptée aux objets constitutifs des différentes catégories. Pour le bâti dense, une fenêtre 3 x 3 suffit car la variabilité est faible. Pour l'habitat collectif, la fenêtre doit avoir une taille plus importante en raison de la dimension des espaces verts situés entre les bâtiments. Dans certains quartiers, la distance entre les bâtiments est très importante; une taille de 7 x 7 pixels s'avère nécessaire. Pour l'habitat pavillonnaire et la végétation, nous avons retenu une taille de 5 x 5 et de 3 x 3 pixels respectivement.

5.3. Classification par seuillage

La classification est effectuée par seuillage des valeurs du PVI moyen. Les seuils sont déterminés de façon empirique. La limite entre l'habitat dense et l'habitat collectif correspond au creux de l'histogramme bimodal des valeurs du PVI moyen mesurées dans les zones résidentielles. Les limites entre l'habitat collectif, l'habitat pavillonnaire et les espaces verts sont établies à partir des valeurs mesurées sur des zones d'entraînement; pour l'habitat collectif et l'habitat pavillonnaire, la variabilité au sein des zones d'entraînement est sensiblement la même. Les seuils choisis correspondent approximativement aux moyennes de chaque classe plus ou moins trois écarts-types. Les limites retenues sont les suivantes :

- dense : 0 - 30;
- collectif : 30 - 70;
- pavillonnaire : 70 - 110;
- végétation : > 110.

L'espace des valeurs du PVI moyen est ainsi entièrement subdivisé.

Pour les zones homogènes de l'image du point de vue de l'occupation du sol, les valeurs moyennes mesurées sur chacune d'elles ne présentent pas de différences significatives selon la taille de la fenêtre choisie pour le calcul du PVI moyen. Aussi avons-nous retenu les mêmes seuils pour chaque image du PVI moyen.

Les seuils définis permettent d'extraire chaque catégorie de bâti de l'image du PVI moyen adéquate (3 x 3, 5 x 5 ou 7 x 7).

5.4. Filtrage par morphologie mathématique et suppression des conflits entre les classes

Les masques de chaque catégorie de bâti obtenus par seuillage présentent un certain nombre d'erreurs générées par des effets de bordure. À titre d'exemple, la valeur du PVI moyen obtenue pour des pixels situés à la frontière entre une zone d'habitat dense et une zone de végétation correspond à celle d'un pixel d'habitat collectif ou pavillonnaire. Suite

à la classification par seuillage, ces pixels sont faussement attribués à l'une de ces catégories. D'autre part, les zones d'extension trop petite ne sont pas pertinentes à notre échelle d'analyse; de surcroît, elles correspondent souvent à des zones mal classées. Ainsi, une petite zone située au milieu d'un quartier d'habitat collectif et classée comme dense doit être attribuée à la catégorie « habitat collectif ». L'application d'une ouverture morphologique par un élément structurant de taille 3 x 3 à chacun des masques permet de supprimer une bonne partie des erreurs puisqu'elle élimine toutes les zones de taille inférieure à celle de l'élément structurant. À l'inverse, la fermeture morphologique comble les trous de petite taille. Ainsi, la morphologie mathématique offre des outils simples et rapides pour filtrer certains objets d'après leur taille et leur voisinage.

Comme la taille de la fenêtre choisie pour le calcul du PVI moyen varie d'une catégorie de bâti à l'autre, certains pixels peuvent être attribués à deux catégories simultanément, malgré l'ouverture morphologique appliquée. Les solutions adoptées après analyse visuelle de la distribution des zones de conflit sont les suivantes : 1) les pixels affectés à la fois aux catégories « dense » et « collectif » sont classés comme pixels d'habitat dense; 2) ceux affectés à la fois aux catégories « collectif » et « pavillonnaire » sont considérés comme non classés; 3) ceux affectés à la fois aux catégories « pavillonnaire » et « espaces verts » sont considérés comme espaces verts.

5.5. Classification par voisinage

Les pixels qui subsistent comme non classés sont situés pour l'essentiel au contact de zones occupées par des types de bâti différents. La classification de ces pixels est améliorée par la prise en compte simultanée des caractéristiques spectrales et du résultat de la classification préalable dans le voisinage. Comme caractéristique spectrale, nous avons pris en compte la valeur PVI moyenne mesurée sur une fenêtre 3 x 3 et reclassée d'après les seuils choisis précédemment. L'emploi d'une fenêtre 3 x 3 permet de tenir compte du voisinage immédiat. Ainsi, deux images sont prises en compte pour la classification par voisinage : l'image des pixels déjà classés (par seuillage et morphologie mathématique) et l'image reclassée du PVI moyen mesuré dans une fenêtre 3 x 3. Comme voisinage, nous considérons les huit pixels qui entourent le pixel central au sein d'une fenêtre 3 x 3. Ce voisinage intervient de la manière suivante :

- si, dans l'image classée, au moins deux pixels voisins possèdent la même valeur que le pixel à classer, alors ce dernier prend cette valeur;
- si ce n'est pas le cas, alors on calcule la valeur modale parmi les voisins; si celle-ci est unique et qu'elle correspond à la valeur d'une classe immédiatement supérieure ou inférieure à la valeur du pixel à classer, alors la valeur modale est attribuée à ce dernier; dans tous les autres cas, le pixel est considéré comme non classé; par exemple, si de par la moyenne du PVI mesurée dans la fenêtre 3 x 3, le pixel appartient à la classe « habitat collectif » mais que la classe modale est l'habitat pavillonnaire, alors le pixel est attribué à la classe « pavillonnaire ».

Remarquons que cette procédure peut être appliquée de façon itérative.

6. Analyse du résultat

La figure 12-2 (voir cahier couleur) représente la carte d'occupation du sol obtenue dans le périmètre de la zone d'habitat et la figure 3 représente le contour des différents objets de la figure précédente superposés à une composition colorée P+XS. Nous procéderons à une analyse par catégorie distinguée.

Figure 3. Contours des objets de la figure 12-2 (voir cahier couleur) superposés à une composition P+XS obtenue par transformation intensité, teinte, saturation avec substitution de l'intensité par le canal panchromatique (représentée en N/B); les contours apparaissent en noir

6.1. PVI faible (habitat dense)

Les pixels classés dans la catégorie « PVI faible » constituent des zones avec très peu ou pas du tout de végétation qui englobent effectivement les quartiers d'habitat ancien dense. Cependant, elles comprennent aussi des zones industrielles ainsi que certains noyaux au sein de l'habitat collectif, noyaux composés souvent d'un bâtiment et de surfaces minéralisées (stationnement). Si l'on considère l'emprise au sol des surfaces minéralisées dans ces zones, l'habitat peut être considéré comme dense; par leur texture et leur morphologie, elles appartiennent plutôt à l'habitat collectif.

6.2. PVI moyen (habitat collectif)

Les zones d'habitat en barres et les grands ensembles apparaissent dans la catégorie « PVI moyen ». Le calcul de valeurs moyennes dans des fenêtres 7 x 7 permet d'obtenir des zones homogènes assez grandes, là où une classification par pixel génère une mosaïque alternant des pixels d'habitat différent.

Là où les espaces verts entre les bâtiments sont très grands, la classification pèche par omission en attribuant ces pixels aux catégories « pavillonnaire » ou « végétation ».

À l'inverse, cette catégorie englobe certains pixels où le mariage minéral-végétal génère une valeur PVI s'apparentant à celle du collectif, mais où la texture est tout autre : habitat pavillonnaire situé le long de routes principales, cœurs de village assez denses, sorties d'autoroute, etc. Certains effets de bordure n'ont pas été supprimés totalement, du fait que la moyenne a été calculée dans une fenêtre 7 x 7 alors que l'ouverture morphologique a été effectuée avec un élément structurant de taille 3 x 3.

6.3. PVI élevé (habitat pavillonnaire)

Si les grandes zones d'habitat pavillonnaire apparaissent bien, la catégorie « PVI élevé » pèche, et de façon assez importante, en englobant notamment certains grands espaces verts situés entre les barres dans l'habitat collectif et une partie des parcs publics.

6.4. PVI très élevé (espaces verts)

Les pixels attribués à la classe « PVI très élevé » l'ont été de façon restrictive si bien qu'ils correspondent effectivement à des zones où l'emprise végétale est forte. La catégorie « habitat pavillonnaire » englobe une partie des pixels qui devraient appartenir à cette classe, comme certains parcs publics ou des zones d'habitat pavillonnaire très lâche.

7. Conclusion

Dans le cas de Genève, l'adéquation entre la nomenclature retenue des types de bâti et la typologie obtenue par classification des valeurs du PVI moyen est vérifiée partiellement. En effet, l'augmentation des valeurs de l'indice de végétation d'un type de bâti à l'autre se concrétise dans la mesure où : 1) les zones d'habitat dense présentent peu d'espaces verts; 2) les grands ensembles et l'habitat en barres offrent un mélange minéral-végétal qui génère une valeur PVI intermédiaire; 3) la faible densité des zones d'habitat pavillonnaire dans la région genevoise génère des valeurs PVI relativement élevées.

Cependant, la densité d'espaces verts n'est qu'un des facteurs qui définissent la morphologie du bâti. D'autres éléments, comme la forme, la taille, la hauteur et la disposition des bâtiments, l'importance des stationnements, la maille viaire, entre autres, jouent un rôle important. Ainsi, si la densité des surfaces bâties est importante, une zone d'habitat pavillonnaire peut présenter un indice de végétation avec une valeur proche de celle de l'habitat collectif. À Genève, la densité est généralement faible, ce qui explique que la valeur de l'indice de végétation soit élevée pour cette catégorie. Dans l'habitat collectif, les différences peuvent être encore plus marquées, selon que les espaces entre les bâtiments sont occupés par des surfaces minéralisées ou pas. Nos premières expérimentations faites

sur la ville de Strasbourg l'attestent; selon la densité du bâti ou le type d'occupation de l'espace situé entre les bâtiments, le seuil entre les valeurs PVI de l'habitat collectif et de l'habitat pavillonnaire est difficile à établir. À lui seul, le PVI ne peut caractériser complètement un type d'habitat.

Le PVI s'avère également insuffisant pour distinguer le bâti résidentiel d'autres catégories d'occupation du sol. Par exemple, les zones industrielles ou les chantiers présentent des valeurs d'indice de végétation faibles, comme l'habitat dense; de même, les parcs publics présentent des valeurs proches de celles de l'habitat pavillonnaire lâche. Il est donc nécessaire d'établir au préalable un masque de l'habitat résidentiel complet. Pour cette étape préalable, le PVI présente un intérêt pour déterminer les zones potentielles; il peut ainsi orienter l'analyse visuelle ou toute autre méthode de délimitation.

Que ce soit pour l'analyse des types de bâti résidentiel ou la distinction entre le bâti et les autres catégories d'occupation du sol, la texture joue un rôle important lors de l'analyse visuelle. À l'heure actuelle, peu d'indices numériques satisfaisants sont proposés dans la littérature pour l'analyse du milieu urbain. Les quelques indices de variabilité mesurés sur les bandes XS1, XS2, XS3 ou PVI et introduits dans l'analyse discriminante des échantillons de bâti s'avèrent nettement moins pertinents que l'information spectrale (le PVI en l'occurrence). Cependant, la combinaison de l'information spectrale et texturale peut apporter des solutions satisfaisantes, particulièrement pour distinguer le bâti d'autres catégories d'occupation du sol.

En plus de l'information spectrale et texturale, la forme, la taille et le contexte interviennent dans l'interprétation d'images. Les outils offerts par la morphologie mathématique sont intéressants pour le filtrage puisqu'ils tiennent compte de la taille des objets; de surcroît, leur implémentation est aisée et l'exécution des opérations rapide. La prise en compte du contexte est plus délicate à réaliser. Les règles simples utilisées dans notre étude s'appliquent bien pour la classification des mixels, par la prise en compte simultanée de l'information spectrale et des résultats de la classification préalable dans le voisinage, mais elles n'utilisent qu'une infime partie de la richesse de l'information contextuelle. Le calcul de valeurs moyennes au sein d'une fenêtre mobile constitue aussi un moyen de prendre en compte le voisinage. Cependant les effets de bordure induits génèrent des erreurs que les filtrages ultérieurs ne gomment que partiellement. Un découpage zonal préalable s'avérerait plus pertinent.

8. Références

ABEDNEGO, B. 1989. Apport de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. Lausanne, École polytechnique fédérale de Lausanne, Institut de génie rural, Lausanne, thèse de doctorat nº 806, 220 p.

EUROSTAT, 1993. Délimitation des agglomérations urbaines par télédétection. Cahier des charges général, non publié.

MICHEL, A. et LORTIC, B. 1992. Typologies urbaines et télédétection satellitaire. La notion de zones en milieu urbain. L'espace géographique, vol. 21, nº 2, p. 167-178.

SCHMITT, M. et MATTIOLI, J. 1994. Morphologie mathématique. Masson, Paris, 211 p.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 133-144

13

Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud

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

[1] *Laboratoire Image et Ville, 12 rue Goethe, 67000 Strasbourg, France; téléphone : +33 (3) 88-45-65-21; télécopieur : +33 (3) 88-45-33-88 CÉ : chris@lorraine.u-strasbg.fr*

[2] *Laboratoire SURFACES, Place du XX Août, 7, B-4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (4) 366-54-24; télécopieur : +32 (4) 366-56-93*

[3] *Institut de géographie de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg, Suisse; téléphone : +41 (26) 300-90-23; télécopieur : +41 (26) 300-97-46*

Résumé

Se doter de moyens performants et stables pour faciliter la connaissance du milieu urbain, nécessite l'utilisation conjointe de plusieurs types d'information : biophysique, socio-économique, démographique, etc. Cependant il convient de consolider les approches méthodologiques dans un souci de transférabilité spatiale et temporelle. L'adaptation d'un corpus méthodologique transférable requiert une évaluation des résultats obtenus sur divers sites afin de pouvoir fournir des références d'utilisation. L'intérêt de sites-témoins différents se comprend par les spécificités urbaines propres aux pays développés à faible taux d'évolution et aux pays en développement dont le dynamisme n'est plus à démontrer. Dans le cadre de cette étude, la définition du milieu urbain et sa dynamique spatiale sont abordées au travers des formes urbaines induites, c'est-à-dire des éléments individualisables de la surface qui participent à l'organisation de la structure du milieu. Un ensemble de méthodes plus ou moins élaborées est testé par les trois équipes (Strasbourg, Liège et Fribourg). Le déroulement du programme est prévu en plusieurs étapes : tout d'abord une application sur trois sites initiaux (Strasbourg, Liège et Genève), pour évaluer les méthodes proposées et les adaptations nécessaires, puis sur une ou plusieurs applications en pays méditerranéens.

1. Introduction

Le phénomène urbain est à l'heure actuelle un enjeu important à l'échelle planétaire. C'est pourquoi, il est absolument nécessaire de se doter de moyens conceptuels et méthodologiques qui peuvent en améliorer la compréhension et le suivi. Cet effort est important bien que les règles de production, les modes d'implantation et d'évolution, les caractéristiques de peuplement (solde naturel, migration, etc.) ainsi que les formes d'urbanisation ne soient pas précisément comparables.

La modélisation urbaine a facilité ces investigations en favorisant une conceptualisation du système urbain selon deux approches complémentaires : l'une analytique, utilisée pour la description et la mise en relation des composantes urbaines; l'autre synthétique répondant au besoin d'articulation de ces composantes au sein d'une même unité territoriale plus ou moins élastique.

La disponibilité des informations utiles a conduit bon nombre de chercheurs à s'intéresser aux sources nouvelles d'information sur l'objet urbain, celles qualifiant « le contenant » (localisation et disposition des lieux), complétant celles de « contenu » fournies par des organismes nationaux, ou éventuellement privés (les enquêtes de marché, d'opinion, etc.). Les dénombrements obtenus ne fournissent qu'une vision restreinte sur le système et les interactions sociales, économiques, politiques ou culturelles. L'intérêt d'une telle complémentarité s'est alors porté sur des informations sur le milieu lui-même au travers de ses caractéristiques biophysiques, des types d'occupation du sol et de la quantification de ces derniers. Ceci amène à considérer l'espace urbain en fonction de deux attendus spécifiques : l'explicitement et l'implicitement spatial. Les informations explicitement géographiques sont très souvent représentées spatialement selon des implantations ponctuelles (mesures de terrain), linéaires (flux) ou aréales (dénombrements) et correspondent à des informations de contenu la plupart du temps. Les informations implicitement spatiales qualifient les caractéristiques de contenant. Les premières sont souvent imposées, restrictives, discrètes et induisent des reports de valeurs sur un espace référencé; les secondes, continues, liées à la répartition des phénomènes naturels ou anthropiques, sont repérables plus aisément.

Les relations entre ces deux composantes de l'espace urbain imposent une perpétuelle interaction des approches et des méthodes, impliquant sans cesse une amélioration de la prise en compte de la réalité et donc de sa compréhension par un enrichissement mutuel. Modéliser l'espace urbain passe par la maîtrise de ce binôme conceptuel et ceci quels que soient le niveau d'analyse, le site étudié et le moment de l'histoire.

2. Objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques de notre recherche se fondent sur les besoins de plus en plus nets d'asseoir un ensemble de méthodes utilisant l'imagerie satellitaire, qui puisse dans la majorité des cas de figures fournir des résultats proches. Bien entendu, une telle stabilité ne se conçoit que si des adaptations au milieu environnemental et socioculturel sont prises en compte.

En fonction des données disponibles, il nous faut donc tester quelques méthodes qui apporteront une information sémantiquement stable bien que syntaxiquement tributaire du milieu urbain étudié. Ces méthodes doivent faire l'objet d'une analyse critique des trois

équipes participantes, Liège, Fribourg et Strasbourg, afin de ne retenir que les plus performantes selon des critères d'applicabilité et de résultat, déterminés progressivement par les conditions propres à ces sites. Cet aspect nous semble primordial pour assurer un minimum de crédibilité à toute transférabilité méthodologique. Une gradation de la prise en considération des espaces urbains permettra de mieux cerner les limites, les lacunes ou les impossibilités d'application des différentes méthodes retenues. Après une première étape de travail sur des images disponibles, un premier bilan a pu être présenté (WEBER, 1995a).

D'autres sites d'une zone climatique différente sont pressentis : Lisbonne, une banlieue d'Athènes (Grèce) et Alcala (Espagne). Centres méditerranéens, ces villes présentent des caractéristiques urbanistiques et environnementales spécifiques qui permettront d'établir un second constat.

La dimension Nord-Sud du projet réside dans la volonté de pouvoir appliquer les méthodes jugées pertinentes après les deux premières étapes, sur des sites maghrébins voire d'Afrique noire.

L'étude de la transférabilité des méthodes applicables en milieu urbain ne peut se concevoir sans une approche de ce type qui puisse associer au résultat potentiel, les conditions d'obtention de celui-ci.

2.1. L'imagerie satellitaire et ses conditions d'application

Les capteurs à haute résolution spatiale permettent actuellement d'accéder à une information implicitement géographique et de localiser les formes urbaines susceptibles d'être révélatrices de structures facilitant les réflexions sur les processus constitutifs du tissu. Cependant, la non-univocité existant entre le signal reçu par le capteur et la réalité visée, entraîne des variabilités de résultats, liées aux éléments de prise de vue (capteur, atmosphère, conditions climatiques, etc.) et à l'hétérogénéité du milieu. Dans un tel contexte, il faudrait pouvoir définir un ensemble de méthodes susceptibles de fournir des informations utilisables dans des approches de modélisation et ceci, quels que soient les sites, les caractéristiques urbaines ou les processus à l'œuvre.

2.2. Un corpus méthodologique transférable

Il n'est pas réaliste de croire que les méthodes puissent s'appliquer de la même manière sur différents sites urbains, entre ceux caractérisés par un dynamisme faible et des règles d'urbanisme établies et d'autres, dont la progression ne peut plus être totalement contrôlée et dont les formes de croissance sont totalement spécifiques. Une adaptation plus ou moins importante est donc à envisager dans le cadre de transferts méthodologiques. Ceci doit être finalisé avec le plus grand soin car l'intégration des données de télédétection au sein de bases d'informations spatiales homogènes correspond à un courant porteur des recherches en cours actuellement.

L'établissement d'un corpus méthodologique pour l'analyse du système urbain dans ses composantes spatio-temporelles (dynamique et processus de croissance) a nécessité une sélection parmi toutes les approches méthodologiques possibles : 1) la définition du milieu urbain, approchée de deux manières, selon une association « minéral/végétal » du milieu et les particularités internes sous-jacentes; 2) la délimitation des zones urbaines, définie en relation avec des critères retenus par les institutions responsables des statistiques de population.

Deux approches complémentaires ont été confrontées : la forme et la texture, d'une part, le potentiel d'utilisation du sol d'autre part. Ceci a conduit notamment à analyser aussi les limites urbaines et les zones de coalescence qui confèrent à l'enveloppe urbaine une plus ou moins grande perméabilité.

Si l'aspect sémantique de l'information a été pris en compte, l'aspect syntaxique, c'est-à-dire la nature et le mode de distribution spatial requis par les modèles d'analyse de croissance urbaine, n'a pas encore été abordé. Ceci reste une nécessité dans l'optique d'une mise au point des procédures de transformation des distributions de données nécessaires en cas de transfert (du discret au continu par exemple).

3. Présentation des travaux

3.1. L'espace urbain

La reconnaissance et la compréhension de l'espace urbain peuvent être appréhendées au travers des formes urbaines et de leurs caractéristiques. Les éléments structurants permettent de repérer des trames d'organisation spatiale successives. Leur caractérisation facilite l'évaluation de leur rôle en tant que facteurs contraignants, perméables et incontournables dans le développement du système urbain. Selon les schémas apparents, les arrangements et les successions, il est possible d'identifier des types de tissus urbains, associés éventuellement à des caractéristiques urbanistiques et architecturales, à des choix politiques de développement ou à des réglementations foncières plus ou moins contraignantes. La connaissance de tels éléments peut fournir des indications intéressantes sur les éléments, les rythmes et, les spécificités du tissu urbain et de son dynamisme.

L'espace urbain concentre sur son territoire d'autant plus d'intérêt qu'il apparaît tel un emboîtement spatio-temporel d'éléments qu'il convient d'identifier, tout en conservant les effets liés au double processus d'intégration de l'information, à la fois horizontal (exhaustivité spatiale) et vertical (synthèse et nécessaire abstraction). Les approches multiples permettant d'accroître la connaissance sur le milieu urbain se situent le long d'un continuum allant de l'image-interprétation à l'automatisation des procédures. Les travaux qui suivent, s'organisent sur la base de ce passage graduel. Partant du principe que l'un des révélateurs de l'espace artificialisé par l'homme réside dans la confrontation de la végétation et du bâti au sein d'un espace urbain, un premier ensemble de méthodes a été testé.

3.1.1. Écosystèmes

Cette expérimentation, a fait l'objet d'un contrat avec la Ville de Mulhouse (France) ainsi que les ministères de l'Environnement et de l'Équipement. Cette étude a été menée en partenariat avec le SERTIT (Service régional de traitement d'image et de télédétection).

Une étude des écosystèmes urbains (COLLECTIF, 1994; LENCO, 1995) sur l'apport d'informations essentiellement biophysiques présente l'intérêt de permettre une segmentation spatiale particulière du milieu urbain. En effet, par le biais d'une image-interprétation assistée par ordinateur, la caractérisation du milieu a été possible en fonction du rapport minéral/végétal, de l'alignement au réseau viaire, de l'emprise au sol des éléments et de l'ombre portée. Le déroulement d'identification s'est appuyé sur une réflexion systémique avec rétroaction, afin d'établir une nomenclature adaptée qui puisse être rattachée à celle du programme *Corine Land-Cover*. Cette détermination du milieu a

été d'autant plus intéressante qu'elle apporte une complémentarité essentielle aux informations déjà intégrées dans le système d'information géographique de Mulhouse. Sur le tableau 1, on montre les avantages et les limites de la méthode utilisée pour l'identification des écosystèmes.

Cette méthode fondée sur l'image-interprétation présente par bien des aspects un intérêt essentiel, celui de la simplicité d'exécution, dès lors qu'un matériel adapté est à disposition. En effet, elle réside sur les capacités oculaires d'un interprète qui mieux que la machine peut discriminer les multiples variations de l'espace. Grâce aux capacités technologiques améliorant l'interactivité, le repérage et l'identification spatiale des zones sont facilités. Enfin, elle répond à des questionnements de thématiciens de l'espace urbain d'une manière compréhensible et intégrable dans leurs pratiques habituelles. Cependant, elle est très liée à la dextérité de l'interprète et à ses compétences, ainsi qu'à sa connaissance du terrain. L'obligation de rattacher les catégories d'occupation du sol détectées à une nomenclature existante bien que délicate, a permis une fois de plus de relever les contradictions existant entre occupation du sol et finalités urbaines.

3.1.2. Indices de végétation et segmentation de l'espace urbain

La deuxième expérimentation a trait à la discrimination des zones résidentielles à partir de la végétation. Deux autres images HRV de SPOT (P, 21-07-90, KJ : 50-256, 1B; XS, 21-07-90, KJ : 50-256, 1B) de l'agglomération genevoise (zone carrée de 10 km de côté) ont été utilisées. Toutes deux ont été corrigées géométriquement afin de pouvoir être exploitées conjointement.

L'utilisation des indices de végétation afin de différencier l'espace urbain et les zones d'espaces verts intra-urbaines, constitue un moyen reconnu de caractérisation. Plusieurs types d'indices sont utilisables en fonction des particularités locales (couleurs et brillance des sols, etc.), du rapport « minéral/végétal » et des altérations liées à la plus ou moins grande présence de sols nus ou faiblement couverts. Les travaux réalisés à Fribourg portent principalement sur l'établissement d'une carte d'occupation du sol en milieu urbain et périurbain, par exploitation d'images HRV. La subdivision des zones résidentielles en types de bâti constitue l'objet principal d'étude. Pour cela, deux directions ont été approfondies : 1) les méthodes de combinaison d'images panchromatique et multibande; de telles combinaisons d'informations spatiales et spectrales (XS et P) devraient permettre d'améliorer l'analyse visuelle et les possibilités de classification automatique (CARPER *et al.*, 1990; PELLEMANS *et al.*, 1993; TERRETTAZ, 1992); 2) divers indices de végétation, tels que le PVI (indice de végétation perpendiculaire), notamment pour améliorer la discrimination des types d'habitat résidentiel (TERRETTAZ et COLLET, 1995).

Tableau 1. Avantages et limites de la méthode utilisée pour l'identification des écosystèmes

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Bonne discrimination des espaces	Facilité d'apprentissage	Urbanisme Aménagement
Limites	Connaissance terrain Nomenclature délicate	Nécessité de matériel sinon pratique laborieuse	Non reproductibilité car liée à un interprète

Dans le cadre de cette deuxième approche a été retenue, parmi les diverses nomenclatures qui existent pour les cartes d'occupation du sol à but statistique ou d'aménagement, celle proposée par EUROSTAT dans le cadre du projet « Télédétection et statistiques urbaines » (EUROSTAT, 1993). La catégorie « zones résidentielles et services publics » y est représentée par les types suivants : 1) centre densément peuplé; 2) continu moyennement dense; 3) résidentiel pavillonnaire; 4) résidentiel discontinu; 5) résidentiel collectif; 6) services publics et collectivités.

Les méthodes de classification automatique s'avèrent peu efficaces et la reconnaissance des objets appartenant à ces catégories requiert l'utilisation conjointe de l'analyse visuelle des compositions colorées et de sources d'informations multiples. En effet, le PVI semble inopérant pour distinguer automatiquement le bâti résidentiel d'autres catégories d'occupation du sol, ainsi les zones industrielles ou les chantiers génèrent une valeur d'indice de végétation faible tout comme l'habitat dense, et les parcs publics peuvent se confondre avec des zones d'habitat pavillonnaire lâche. Il est donc nécessaire d'améliorer les résultats potentiels notamment par l'établissement préalable d'un masque des zones d'habitat résidentiel. Le PVI, dans ce cas, présente l'intérêt de faciliter la détermination des zones résidentielles potentielles (ABEDNEGO, 1989; ABDENEGO and COLLET, 1992) et ainsi d'orienter l'analyse visuelle ou toute autre méthode de segmentation.

Que ce soit pour l'analyse des types de bâti résidentiel ou la distinction entre le bâti et les autres catégories d'occupation du sol, la texture joue un rôle important lors de l'analyse visuelle. Or, à l'heure actuelle, peu d'indices numériques satisfaisants sont proposés dans la littérature pour l'analyse du milieu urbain. Les quelques indices de variabilité mesurés selon des combinaisons linéaires multibandes (HRV de SPOT : XS1, XS2, XS3 ou PVI) et introduits dans une classification telle l'analyse discriminante, s'avèrent nettement moins pertinents que l'usage de l'information spectrale seule (le PVI en l'occurrence). Cependant, la combinaison d'informations spectrales et texturales peut apporter des solutions satisfaisantes, particulièrement pour distinguer le bâti d'autres catégories d'occupation du sol. Dans le domaine textural, il s'agit de tirer parti de l'image panchromatique dont le potentiel est important mais des recherches complémentaires sont nécessaires. Sur le tableau 2, on montre les avantages et les limites du PVI.

Si la constitution de cet indice est aisée et ses capacités de discrimination élevées, il ne peut cependant convenir à tous les cas de figures, par exemple lorsque la zone résidentielle est fortement arborée ou que les zones d'habitat comprennent des espaces minéralisés importants (parkings, entrées de résidence, etc.). La transférabilité n'est donc pas assurée. Il s'avère néanmoins opérationnel dans une démarche d'image-interprétation. Pour améliorer les possibilités de traitements appliqués à la discrimination de l'espace urbain, d'autres méthodes, de segmentation en particulier, ont été testées.

Tableau 2. Avantages et limites du PVI

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Relation avec la densité de types d'habitat Aide visuelle	Aisé à constituer	Image-interprétation
Limites	Cette relation ne couvre pas tous les cas de figures	Problèmes de transférabilité	

3.2. Segmentation de l'espace urbain : « les érodés ultimes »

L'étape suivante dans le déroulement de l'étude consiste à délimiter des partitions intra-urbaines de manière automatique ou semi-automatique, notamment afin de pallier les problèmes induits par l'interprétation d'image. L'application de la segmentation en télédétection urbaine répond donc aux deux préoccupations suivantes : 1) recherche d'une méthodologie permettant la reproductivité de la démarche; 2) remplacement des classifications « pointillistes » par des classifications zonales correspondant mieux aux habitudes et aux besoins des urbanistes, ou plus largement aux personnes impliquées dans la mobilisation d'informations urbaines (DONNAY, 1992).

Cette expérimentation a été appliquée sur les sites de Strasbourg, Genève et Liège à partir d'images HRV (XS) de SPOT et TM de Landsat.

Le problème lors de la segmentation d'une image monocanal, réside dans le choix du canal synthétique le plus pertinent possible. Suivant les villes, les capteurs et les dates de prises de vue, une grande variabilité est observée (première composante d'une ACP, NDVI, PVI, indice de brillance, etc.). Pour éviter ce problème et utiliser l'information multibande, l'image de contraste soumise à la segmentation par la méthode de l'« érodé ultime » est remplacée par une image contenant les limites d'une classification (obtenue dans le cas de Genève ou de Strasbourg par une méthode dirigée).

La procédure de segmentation jusqu'à l'érodé ultime permet de diviser les zones initiales en zones plus petites en tenant compte de critères géométriques. La dernière étape consiste à extraire les statistiques multibandes de chacune des zones pour les soumettre à un algorithme de classification.

Dans le cas de Strasbourg, l'algorithme des « érodés ultimes » a été utilisé sur un résultat de classification dirigée, après l'application sans succès sur une image d'indice de végétation. La classification utilisée a permis d'isoler des zones homogènes par un filtrage sur principe majoritaire sur une fenêtre 7 x 7. Un filtre passe-haut (Roberts) a ensuite permis de fermer les contours et d'optimiser les érodés. Après insertion manuelle des réseaux viaires et ferrés les résultats se sont révélés assez satisfaisants. Sur le tableau 3, on montre les avantages et les limites des « érodés ultimes ».

Tableau 3. Avantages et limites des « érodés ultimes »

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Image plus généralisée que celle obtenue par une classification par pixel	Peu de décisions arbitraires de l'opérateur	Urbanisme Aménagement Statistiques urbaines
Limites	Certains éléments linéaires tels que les petites rivières doivent être numérisés	Problèmes sur des canaux bruts ou néo-canaux (en niveaux de gris) car risques de non fermeture des contours. Problèmes liés à des éléments homogènes de taille importante (comme des lacs). Temps de calcul important	

La méthode de segmentation par les « érodés ultimes », permet d'obtenir des résultats de classification plus pertinents en milieu urbain, car ils introduisent, d'une certaine manière, la structure urbaine reconnue par les thématiciens. La méthode s'applique sans intervention dans la plupart des cas, même s'il est nécessaire de guider un peu l'algorithme au cours du traitement (numérisation d'éléments). La faiblesse du traitement réside dans le choix des canaux à utiliser et dans la configuration spatiale du site, de plus une optimisation des procédures est nécessaire pour diminuer le temps de calcul.

3.3. Les limites urbaines

La délimitation urbaine tient à l'heure actuelle une importance évidente dans un contexte de mise à jour des informations de contenu de l'espace urbain. En effet, même pour les pays développés, le coût et les délais inhérents aux recensements exhaustifs de population deviennent si importants qu'une réflexion sur les possibilités de sondages, notamment spatiaux, a été engagée. Cependant, pour satisfaire une telle demande, il convient peut-être aussi de renouveler les diverses définitions qui caractérisent un espace urbain délimité. Cette nécessité est d'autant plus importante que les différences de définitions, entre plusieurs pays européens par exemple, introduisent des biais qui entravent toutes possibilités de comparaison. Ainsi, la télédétection intervient à double titre dans cette préoccupation : d'une part en fonction des capacités d'élaboration de bases de sondage (DUREAU, 1995); d'autre part, en fonction des possibilités de délimitation d'un espace urbain continu bâti qui, en fonction de critères multiples, présente une enveloppe plus ou moins élastique aux contours plus ou moins flous (TREITZ *et al.*, 1992; WEBER, 1995a, b)

Parmi les approches susceptibles de fournir l'enveloppe urbaine et la détermination de l'importance des catégories résidentielles, quelques-unes totalement automatiques, offrent une flexibilité d'usage intéressante.

La délimitation de l'enveloppe urbaine peut être obtenue selon deux approches : d'une part, à partir d'une image panchromatique révélant la tache urbaine par opposition avec ses alentours et, d'autre part, à partir d'une image classée dont les catégories sont pondérées en fonction du modèle gravitaire du potentiel.

3.3.1. Délimitation urbaine à partir d'une image brute

Cette expérimentation a été appliquée sur Strasbourg à partir de trois images HRV (P, 15-09-1986, KJ : 50-252, 2B; XS, 28-06-1986, KJ : 50-252, 2B ;XS, 08-05-1989, KJ : 51-252, 2B). Plusieurs possibilités sont envisageables dans le cadre de la délimitation et l'une des principales différences réside dans l'image initiale traitée. Il est possible de démarrer l'application sur un résultat de classification dont les catégories se calquent autant que possible sur des nomenclatures utilisées dans le cadre de dénombrements statistiques ou sur une image panchromatique (fig. 1).

Dans les deux cas les objectifs sont doubles et correspondent à des étapes différentes de l'expérimentation : 1) définition de l'enveloppe urbaine; 2) comparaison spatiale et statistique, entre le résultat obtenu et l'espace retenu par les organismes de recensement tel l'Institut national de statistique et des études économiques (INSEE).

L'utilisation du canal panchromatique du capteur HRV fournit la possibilité d'identifier l'espace urbain selon les ruptures entre le bâti continu et son hinterland, ainsi qu'à partir des éléments qui structurent cet espace bâti (zones homogènes, ruptures anthropiques ou naturelles, etc.). L'opérateur « *context* » utilisé correspond à un algorithme de détermination de texture sur niveaux de gris, selon une fenêtre 7 x 7. Sur cette image binarisée, des

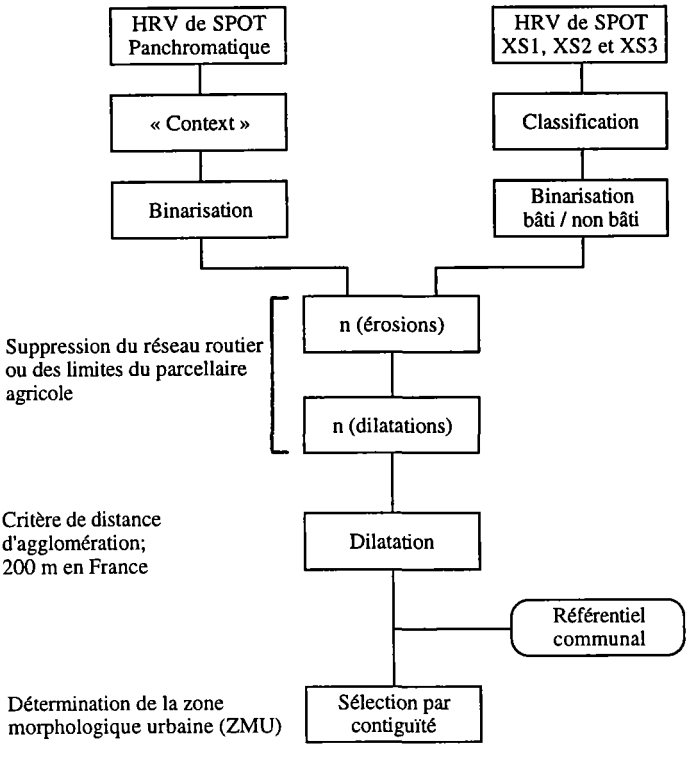


Figure 1. Schéma des procédures méthodologiques. Ce schéma reproduit la totalité des traitements appliqués pour la définition de la zone morphologique urbaine : d'une part à partir d'une image HRV (P) de SPOT et d'autre part à partir d'une image classée

opérateurs de morphologie mathématique de type érosion-dilatation, sont appliqués selon une fenêtre circulaire (afin d'optimiser la cohérence des contiguïtés).

Deux étapes sont ensuite différenciées : 1) une série d'érosions est appliquée afin d'éliminer ou de diminuer l'impact introduit par les réseaux de communication (routes, autoroutes) ou le parcellaire rural, suivi d'un nombre égal de dilatations afin d'obtenir un retour à la structure initiale; 2) suit une dilatation faite pour déterminer l'enveloppe urbaine. Cette extension correspond à la distance légale (en France de 200 m) qui doit séparer les éléments bâtis entre eux. Elle détermine leur appartenance à une agglomération urbaine de population caractérisée par la zone morphologique urbaine (ZMU) (WEBER *et al.*, 1995). Sur le tableau 4, on montre les avantages et les limites de la délimitation urbaine à partir du canal panchromatique du HRV.

La méthode fournit de bons résultats qui peuvent être intégrés comme des plans d'information dans un système d'information géographique (SIG). Les résultats sont pertinents dans une approche de statistique urbaine où la tache urbaine est nécessaire. Cependant, comme tous traitements fondés sur une binarisation, il est nécessaire d'appliquer les opérateurs de morphologie mathématique sur une image initiale cohérente, ces opérateurs étant sensibles à une forte hétérogénéité. La trop grande taille des fichiers peut être un handicap.

Tableau 4. Avantages et limites de la délimitation urbaine à partir du canal panchromatique (HRV de SPOT)

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Délimitation souvent pertinente, le résultat peut être inclus dans un SIG	Assez simple au niveau morphologie mathématique	Statistiques urbaines
Limites	Nécessité de « nettoyer » l'image des résidus pouvant être liés au paysage agricole ou aux réseaux	Sensible à une très forte hétérogénéité Taille des fichiers	Critères multiples à tester

3.3.2. Délimitation urbaine à partir d'une image classée : la méthode du potentiel

Deux approches sont proposées, la première ne nécessite pas l'utilisation de données exogènes tandis que la deuxième utilise en plus de l'image, des données statistiques extérieures ainsi que les limites administratives s'y rapportant.

Le modèle gravitaire du potentiel est appliqué uniquement à l'emprise des différentes classes d'habitat. Il est calculé pour chaque pixel de l'image au moyen d'une fenêtre de convolution circulaire de grande dimension. Idéalement, la fenêtre ne doit jamais être totalement incluse au sein du masque de l'habitat. Les poids intervenant au numérateur du potentiel et affectant les différentes catégories d'habitat sont traduits par les valeurs moyennes des cœfficients d'occupation du sol de ces classes.

Au terme du calcul, le potentiel de chaque pixel peut être transformé en pourcentage de potentiel et le champ de potentiel résultant de cette opération se présente sous forme d'une image de même taille et de même résolution que l'image classée initiale. La surface de potentiel est une surface thématique dont les sommets traduisent, dans ce cas, les concentrations d'habitat dense. Le potentiel maximum est atteint au centre de l'agglomération et le seuillage de cette surface permet de définir des courbes équipotentielles qui rendent l'allure digitée ou compacte de l'agglomération. D'autres traitements en aval du potentiel permettraient de délimiter les hinterlands de plusieurs agglomérations. Cette expérimentation est en cours sur l'image de Strasbourg (LAMBINON et DONNAY, 1995). Sur le tableau 5, on montre les avantages et les limites de la méthode du potentiel.

L'intérêt de la méthode réside dans les potentialités associées à la modélisation de la surface obtenue. Continue, celle-ci fournit un support de réflexion de traitements ultérieurs utilisable en aménagement de l'espace. De plus, elle offre une grande stabilité des résultats au prix cependant d'un temps de calcul qui reste à optimiser. Fondée sur une classification, elle reste tributaire de la variabilité éventuelle de cette dernière.

Tableau 5. Avantages et limites de la méthode du potentiel

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Passage d'une image discrète en une surface continue	Grande stabilité du modèle en fonction des poids utilisés	Urbanisme Aménagement
Limites	Disponibilité d'une classification	Temps de calcul important	

4. Conclusion

Cette première année de collaboration peut être considérée comme très positive pour chacun des laboratoires participants. Échanger, confronter, affiner ses hypothèses et défendre ses arguments, tout ceci résume assez bien une démarche scientifique normale qu'il est toujours avantageux de partager. La possibilité de pouvoir tester sur des sites multiples les procédures de traitement d'images habituellement en usage dans l'un ou l'autre laboratoire, facilite les remises en question, les nécessités de retour aux hypothèses qui ont induit ces choix. C'est dans une telle approche, que nous avons voulu essentiellement comparative, que les choix de procédures ont été faits. C'est dans cette optique que les possibilités de transfert sont envisagées. Il n'y a pas lieu de croire qu'un corpus méthodologique ne puisse être établi, cependant les règles d'applicabilité de certaines procédures de traitement nécessitent d'être clairement exposées.

Ces règles d'utilisation sont d'autant plus nécessaires que les sites présentent des différences importantes en terme d'environnement naturel (climatique, orographique, etc.) et en termes socio-économique et culturel. La transférabilité des procédures de traitement se veut donc graduelle en tenant compte des particularités générales induites par le milieu naturel, mais aussi social et culturel. En effet, si les finalités de gestion, de planification et d'analyse urbaine sont approximativement les mêmes sous toutes les latitudes, les conditions dans lesquelles se déroulent les recherches ou les applications ne sont pas du tout comparables. Il convient donc de bien s'assurer des modalités de transfert avant de pouvoir préconiser tel ou tel traitement. Des applications diversifiées sont nécessaires à l'obtention d'un corpus méthodologique opérationnel, applications offrant si possible une gamme suffisante de sites nécessitant ou non l'adaptation ou la transformation des traitements.

5. Références

ABEDNEGO, B. 1989. Apport de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. École polytechnique fédérale de Lausanne, Institut de génie rural, Lausanne, thèse de doctorat n° 806, 220 p.

ABEDNEGO, B. and COLLET, C. 1992. A theoretical approach for vegetation change index based on non-corrected radiometric data. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, n° 4, p. 699-714.

CARPER, J., LILLESAND, T. et KIEFER, R. 1990. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56, n° 4, p. 459-467.

COLLECTIF (SERTIT et URA 902). 1994. Intégration de la cartographie des écosystèmes urbains dérivée de l'imagerie SPOT dans le SIG de la ville de Mulhouse. Rapport d'étude MIRE de Mulhouse, Ministères de l'Environnement et de l'Équipement, 90 p.

DONNAY, J.-P. 1992. Remotely sensed data contributes to GIS socioeconomic analysis. GIS Europe, vol. 1, n° 10, p. 38-41.

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 Actualité Scientifique, Éditions AUPELF-UREF, p. 239-246.

DUREAU, F. 1995, Images satellite. présentation d'une nouvelle méthode de production d'informations sur les populations citadines.*in* F. Dureau et C. Weber (éd.) Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Paris, p. 271-285.

EUROSTAT. 1993. Délimitation des agglomérations urbaines par télédétection. Cahier général des charges, Luxembourg (non publié).

LENCO, M. 1995. Étude des écosystèmes urbains des grandes agglomérations. *in* F. Dureau et C. Weber (éd.) Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Paris, p. 241-253.

PELLEMANS, A., JORDANS, R. and ALLEWIJN, R. 1993. Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 59, n° 1, p. 81-87.

TERRETTAZ, P. 1992. Étude de l'occupation du sol et de son évolution à l'aide d'images numériques Landsat TM. Application à la région de Sion en Valais. Institut de géographie, Université de Fribourg, Fribourg, 118 p.

TERRETTAZ, P. et COLLET, C. 1997. Différenciation des tissus résidentiels à l'aide de l'indice PVI, de la morphologie mathématique et du filtrage contextuel : exemple de Genève (Suisse). *in* J.M. Dubois, J.P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd.), Télédétection des milieux urbains et périurbains, Collection Actualité Scientifique, Éditions AUPELF-UREF, p. 123-131.

TREITZ, P. M., HOWARTH, P. J. and GONG, P. 1992. Application of satellite and GIS technologies for land-cover and land-use mapping at the rural fringes : a case study. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 58, n° 4, p. 439-448.

WEBER, C. 1995a. Télédétection des milieux urbains et périurbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. Rapport d'activité de l'action de recherche partagée X/1.20.04/01/94.18.0, 55 p. + 16 figures.

WEBER, C. 1995b. Limites urbaines et processus d'urbanisation. Rapport PNTS 94N50/0358, 30 p.

WEBER, C., HIRSCH, J. et SERRADJ, A. 1997. Pour une autre approche de la délimitation urbaine : application à Strasbourg (France). *in* J.M. Dubois, J.P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd.), Télédétection des milieux urbains et périurbains, Collection Actualité Scientifique, Éditions AUPELF-UREF, p. 225-237.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 145-153

14

Essai de différenciation des quartiers de Yaoundé à l'aide d'une image HRV de SPOT

RENÉ-JOLY ASSAKO ASSAKO

Laboratoire de recherche sur les images géographiques (IMAGÉO-CNRS), 191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France; téléphone : +33 (1) 44-32-14-85; télécopieur : +33 (1) 43-29-63-83; CÉ : assako.a@minitel.refer.org

Résumé

L'analyse de la typologie des quartiers implique non seulement les caractéristiques urbanistiques (matériaux de construction, composition architecturale, structuration du bâti), mais aussi l'identité socio-fonctionnelle (caractéristiques démographiques des quartiers, niveau de vie des habitants, appartenance professionnelle). Le support d'analyse est une image HRV (XS) de SPOT de la ville de Yaoundé. Après la mise en forme des données (identification, extraction et concaténation des quartiers-témoins) garantissant l'uniformité des traitements pour tous les quartiers, l'analyse a été faite en deux phases. La première a consisté à rechercher la différenciation des quartiers à travers quelques paramètres structuraux de l'organisation de l'espace urbain (extraction du réseau routier, calcul de l'indice de brillance en vue d'apprécier la densité du bâti par quartier, classification non dirigée améliorée par un filtrage dans une fenêtre 3 x 3 pour apprécier la composition interne des quartiers). La deuxième a porté sur la réalisation d'une composition colorée de canaux brutes dont les résultats ont été directement comparés avec des photographies aériennes obliques prises à basse altitude. Cette étude aboutit à deux conclusions intéressantes : 1) l'intérêt de l'imagerie HRV (XS) dans l'analyse des villes africaines, malgré une résolution géométrique de 20 m et une résolution spectrale limitée à deux bandes fortement corrélées dans le visible (vert-jaune et rouge) et une bande dans le proche infrarouge; 2) les limites techniques et thématiques de la télédétection urbaine.

1. Introduction

Deux ordres d'aspects complémentaires définissent la typologie des quartiers. D'abord, les aspects physiques définissent la composition urbanistique : texture et structure du bâti, densité du couvert végétal, formes et cœfficient d'occupation de l'espace. Ensuite, la composition socio-fonctionnelle détermine la composition sociale, l'identité fonctionnelle, le niveau de vie des habitants et le degré de confort de l'habitat. Pour saisir cette dualité, la télédétection urbaine se doit de prendre en compte à la fois des caractéristiques spatiales et spectrales des données satellitaires (COLLET, 1989). À ce titre, l'utilisation d'une seule image HRV (XS) risquait de poser des problèmes, du fait de sa résolution spatiale de 20 m et de l'insuffisance de l'information spectrale. Mais, ces lacunes ont été compensées par une bonne connaissance du site d'étude.

2. Site d'étude

L'étude porte sur la ville de Yaoundé, capitale du Cameroun, située dans la province dite du Centre, à environ 200 km de la côte atlantique (au sud-ouest) et des frontières avec le Gabon et la Guinée Équatoriale (au sud). Avec un taux de croissance annuelle d'environ 7,5 %, sa population est aujourd'hui estimée à plus d'un million d'habitants (ASSAKO ASSAKO, 1996).

Le statut municipal a beaucoup évolué depuis la période coloniale. La ville a successivement été « commune mixte urbaine », « commune urbaine de plein exercice » et « commune urbaine ». Le statut municipal actuel est celui d'une « communauté urbaine » divisée en six communes d'arrondissements et ayant à sa tête un délégué du Gouvernement nommé par décret présidentiel.

De la période coloniale au début des années 70, Yaoundé a connu un dualisme urbanistique opposant le centre administratif aux quartiers populaires environnants, anciens villages périurbains aujourd'hui absorbés par la rapide croissance spatiale de la capitale.

Depuis les années 1970 se développent deux autres types de quartiers : les quartiers résidentiels haut de gamme ou riches et les quartiers lotis. Les premiers, d'un habitat généralement pavillonnaire, résultent de la volonté de l'État ou de grands groupes industriels de loger leurs cadres dans des conditions décentes. C'est le cas du quartier dit du lac, lieu de résidence des hauts cadres de l'État, ou de Bastos, logeant les cadres de la manufacture des tabacs qui a donné son nom au quartier. Les deuxièmes, où se mélangent immeubles et maisons individuelles, résultent de la volonté des pouvoirs publics de lutter contre l'urbanisation anarchique. Dans cette optique, des lotissements ont été construits ou sont en cours de réalisation sur des terrains vacants (Biyemassi et son prolongement vers Nsimeyong et Mendong) ou en restructuration d'anciens quartiers populaires (Essos).

3. Matériel et méthode

3.1. Image et outils de traitement

Le support d'analyse est une image numérique HRV (XS) du 7 février 1992 dont les caractéristiques sont décrites sur le tableau 1.

Tableau 1. Les caractéristiques de l'image HRV (XS) de SPOT de Yaoundé du 07-02-1992

Satellite	SPOT
Capteur	HRV1
Date d'enregistrement	07-02-1992
Heure d'enregistrement	9 h 33 mn 23 s
Coordonnées de l'image sur la grille SPOT	K=85; J=342
Coordonnées géographiques de l'image	Latitude : 03°04' N - 04°19' N Longitude : 11°29' E - 12°08' E
Surface totale couverte	60 km x 60 km
Niveau de correction	1B
Mode d'enregistrement	Multibande (XS)
Nombre de canaux	3
Identification des canaux	XS1, XS2, XS3

Les traitements dont les résultats sont présentés plus loin ont été effectués sur station SUN, grâce à une série d'algorithmes proposés par le logiciel *Planètes* développé à l'ORSTOM.

3.2. La méthode : une navette entre l'image et le terrain

Lors de l'élaboration de la méthode, deux problèmes se posaient : la résolution de 20 m n'était pas assez précise pour le suivi de formes d'affectation du sol de petite taille, dominantes à Yaoundé; d'autre part, avec une seule image, il n'était pas possible d'engager une approche dynamique des paysages urbains. Il fallait donc concevoir une méthode qui, en maximisant l'exploitation de l'information satellaire, s'appuie sur une solide connaissance de la ville. C'est l'enjeu de la méthode navette où les traitements informatiques de l'image, le travail sur le terrain et l'image-interprétation visuelle se complètent de manière synergique (fig. 1).

Les traitements *a priori* ont permis d'obtenir un certain nombre de documents analogiques (composition colorée, classifications non dirigées, analyses factorielles) dont le zonage a été amélioré, validé ou invalidé par des observations sur le terrain. Les traitements *a posteriori* ont permis d'intégrer la réalité de terrain, ce qui a permis de mener des traitements dirigés, de rendre les nomenclatures plus expressives et d'améliorer la différenciation des tissus urbains.

4. Traitements, résultats et discussion des résultats

La figure 14-2 (voir cahier couleur) représente les quartiers-témoins affectés chacun d'un numéro de reconnaissance, tels qu'ils ont été identifiés sur l'image et systématiquement reconnus sur le terrain. Ces quartiers ont été choisis parce que manifestement différents les uns des autres.

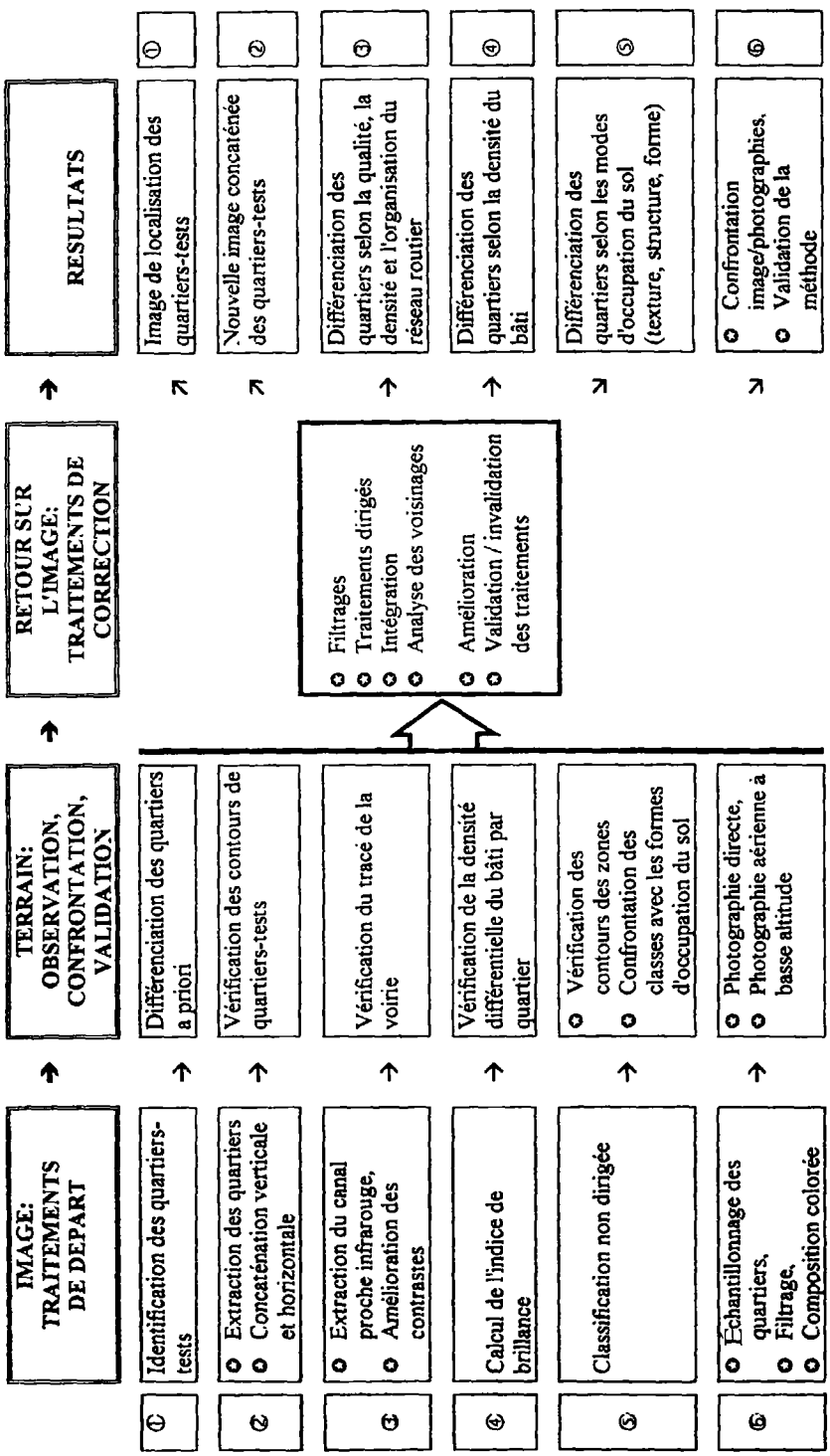


Figure 1. Méthode « Navette image-terrain » pour la différenciation des quartiers de Yaoundé

La plupart des analyses de la composition urbaine utilisant l'imagerie satellitaire se font en deux phases successives. La première consiste à isoler les espaces véritablement bâtis ou l'enveloppe urbaine, alors que la deuxième essaie de partitionner cette enveloppe pour en distinguer les différentes composantes (ZHAO, 1986).

Ici, travaillant sur des quartiers-témoins, l'importance est plutôt donnée à certains paramètres structuraux dont l'étude permet d'esquisser certains regroupements. Il s'agit notamment de la desserte routière, de la densité du bâti et de l'organisation de l'occupation de l'espace à l'intérieur des quartiers. Une confrontation directe entre l'image composition colorée et des photographiques aériennes obliques prises à basse altitude a apporté plus de précision dans cette différenciation. Cette étape a également permis de mener une analyse individuelle des quartiers.

4.1. Recherche de la différenciation des quartiers à travers quelques paramètres de la composition urbaine

4.1.1. L'extraction du réseau routier

Certaines longueurs d'onde sont plus aptes que d'autres pour mettre en évidence certains phénomènes. Il en est ainsi du canal proche infrarouge XS3 (0,71 - 0,79 µm) qui, à la suite d'une amélioration des contrastes, a permis de ressortir le réseau minéral routier : organisation du réseau et qualité des voies.

Le résultat de ce traitement permet de définir trois types de quartiers : le centre-ville (1), les quartiers moyennement desservis (2, 3 et 4) et les quartiers « enclavés » (5 et 6) (fig.3).

Le centre-ville (1) est aussi le centre du réseau digité des voies routières de Yaoundé. Il connaît la densité du réseau la plus élevée de tout le tissu urbain. Sur le plan qualitatif, il est desservi par les voies les plus larges et comporte le nombre le plus élevé de voies asphaltées.

Les quartiers moyennement desservis : Bastos (2), Essos (3) et Briqueterie (4), sont traversés par quelques voies principales.

Les quartiers « enclavés » se trouvent également à être les quartiers périphériques, que ce soit Ekounou (5) ou Biyemassi (6). En réalité, cet enclavement est relatif, surtout en ce qui concerne Biyemassi, quartier bien desservi, y compris par des voies asphaltées. Mais comme la plupart des voies ont une largeur inférieure à la résolution géométrique du capteur HRV (XS), elles n'ont pu être identifiées. Lors des observations de terrain, nous avons vérifié que des routes goudronnées ayant une largeur de 7,5 m étaient absentes de l'image.

4.1.2. La densité du bâti et la différenciation des quartiers

La densité du bâti détermine le degré d'artificialisation de l'espace et donc la densité de l'occupation du sol. Elle renseigne sur l'âge des quartiers. Elle permet donc, avec d'autres critères, de retracer l'histoire urbaine, en opérant une distinction entre les quartiers anciens (souvent plus denses), les nouveaux quartiers en voie de densification et les fronts d'urbanisation. Cette densité est donnée par l'indice de brillance (IB) suivant la formule :

$$IB = \sqrt{(XS3)^2 + (XS2)^2}$$

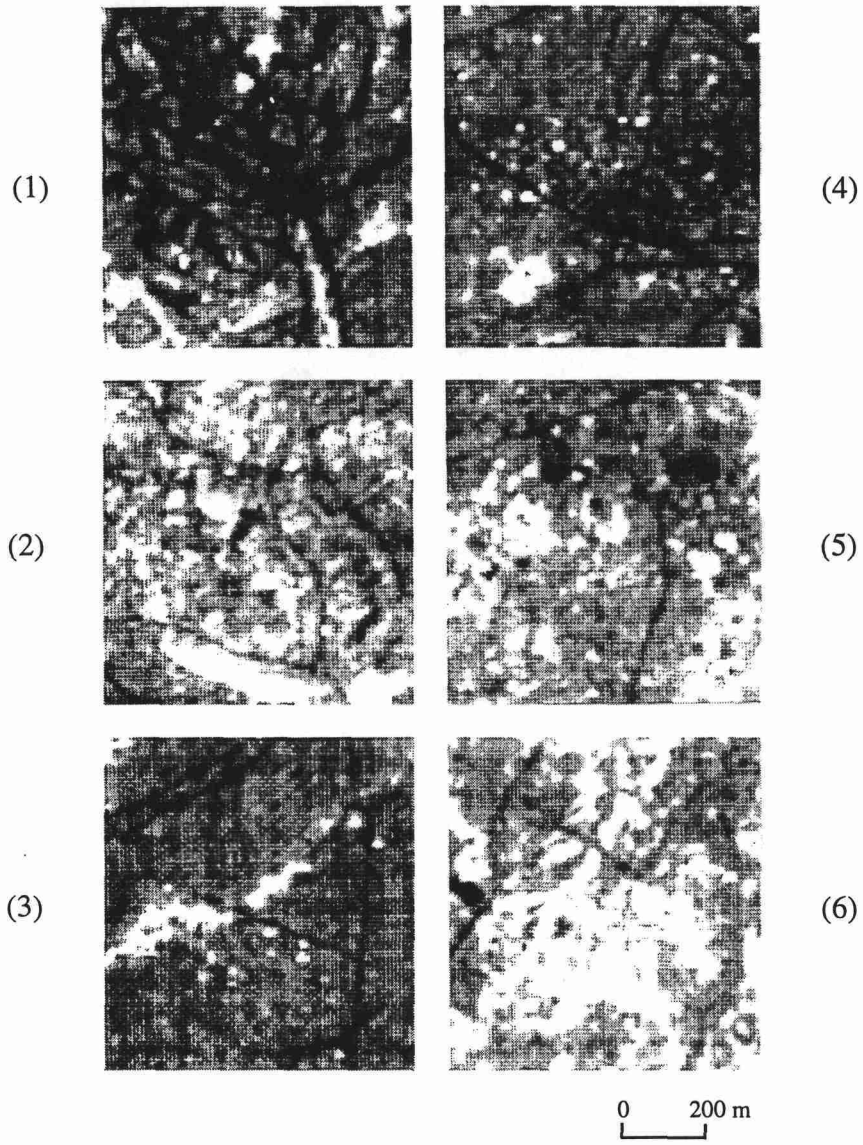


Figure 3. Le canal proche infrarouge et la différenciation des quartiers : 1) le centre-ville; 2) Bastos; 3) Essos; 4) Briqueterie; 5) Ekounou; 6) Biyemassi

Le résultat de ce traitement (fig. 14-4, voir cahier couleur) permet de hiérarchiser les quartiers en fonction de la densité du bâti. En effet, grâce à la méthode de segmentation de l'histogramme présentée en légende de la figure 14-4 (voir cahier couleur), il a été possible de distinguer entre les quartiers de forte, moyenne ou faible densité de bâti.

Ainsi, Briqueterie (4) et Biyemassi (6) apparaissent comme les quartiers les plus densément bâtis. Pour le premier, la densité est réelle. C'est l'un des plus grands foyers d'urbanisation populaire anarchique. Les maisons poussent partout où le terrain est

disponible et ne sont séparées que par d'étroites venelles, ce qui donne un pâté de maisons très compact. Pour le deuxième, la densité révélée par l'image est plus relative. Les observations sur le terrain et les photographies aériennes ont montré que la forte réflectance qu'on observe dans cette zone tient plus de l'âge des bâtiments que de la densité de leur implantation. En effet, Biyemassi (6) et son prolongement vers Nsimeyong et Mendong constituent un vaste chantier immobilier où la plupart des bâtiments ont des tôles neuves sur leur toit. Or, la tôle, lorsqu'elle n'est pas recouverte de poussière (comme c'est le cas des constructions anciennes en fin de saison sèche), est un matériau particulièrement réflectant. Dans ces conditions, l'indice de brillance risque donc d'exagérer la réalité.

Le centre-ville (1) et le quartier loti d'Essos (3) comptent parmi les quartiers de densité moyenne. Cette situation est liée à la présence de larges coupures vertes, à la faveur des vallées agricoles et des jardins de case, même au centre-ville. On y remarque alors une présence significative de la teinte jaune, traduction des espaces mixtes, à la jonction du végétal et du minéral, pour ce traitement.

Bastos (2) et Ekounou (5) comptent parmi les quartiers de plus faible densité du bâti. Pour le premier, il s'agit d'un habitat de type pavillonnaire, avec des maisons entourées de vastes jardins. Le deuxième est plutôt un front d'urbanisation encore timide dans son avancée. L'artificialisation de l'espace est certes amorcée mais elle demeure contrebalancée par un couvert végétal encore largement verdoyant.

4.1.3. L'organisation de l'occupation de l'espace et la différenciation des quartiers : classification non dirigée

Pour apprécier l'organisation de l'occupation du sol, nous avons procédé à une classification non dirigée en 4 classes. Elle permet d'apprécier la composition interne des quartiers de manière globale, grâce à une approche zonale et à un nombre de classes expressément réduit. Le résultat de cette classification a ensuite été amélioré par un traitement de voisinage en utilisant une fenêtre de taille 3 x 3.

Le résultat de cette classification (fig. 14-5, voir cahier couleur) donne deux informations principales : la présence des espaces verts dans les quartiers et l'état de l'urbanisation.

Dans le premier cas, on note un net recul de la végétation dans les quartiers populaires d'habitat précaire [cas de la Briqueterie (4)] ou même des quartiers lotis, ceux-ci servant souvent de support à une urbanisation anarchique, notamment au voisinage immédiat des lotissements ou dans les interstices séparant les espaces légalement construits [cas d'Essos (3)]. Par contre, les espaces verts se conservent mieux dans le centre-ville (1) et dans les quartiers pavillonnaires [Bastos (2)]. Dans les quartiers périphériques, lotis ou populaires, la présence d'une importante couverture végétale est surtout liée à la timidité de l'avance du front d'urbanisation.

La classe « bâti nouveau ou très réflectant » désigne des zones nouvellement construites ou réhabilitées. À cet effet, elle montre bien le dynamisme urbanistique des fronts d'urbanisation [Biyemassi (6) et Ekounou (5)] et des quartiers populaires d'habitat précaires [Briqueterie (4)]. Cet aspect touche aussi les quartiers pavillonnaires haut de gamme [Bastos (2)], mais à une moindre mesure. Les quartiers anciens et lotis ne sont que faiblement concernés par ces mouvements. Ainsi, cette classe est insignifiante dans le centre-ville (1) ou à Essos (3), soit parce que la législation foncière est plus stricte, soit parce que les terrains constructibles sont moins disponibles.

4.2. Comparaison directe : composition colorée - photographies aériennes obliques

La composition colorée obéit à une logique élémentaire. Plutôt que de travailler par zones, l'image est analysée pixel par pixel. Ceci implique donc une intervention décisive de l'image-interprétation.

La composition colorée a permis de valider la plupart de nos résultats, grâce à une confrontation directe de l'image aux photographies aériennes obliques prises à basse altitude (fig. 14-6 à 14-9, voir cahier couleur). Une appréciation individuelle des quartiers était ainsi rendue possible.

4.2.1 Centre-ville

Le centre-ville (fig. 14-6, voir cahier couleur) est en même temps la façade symbolique du Cameroun tout entier. C'est le pôle administratif, le lieu de concentration de la plus grande activité commerciale de toute l'agglomération. C'est aussi le lieu de fréquentation touristique le plus prisé. Tout cela se traduit, par de vastes ensembles immobiliers cossus : immeubles ministériels, grands services de l'État, grands bâtiments hôteliers entrecoupés par des larges espaces verts tantôt naturels (parcs) tantôt anthropiques (cas des vallées agricoles).

4.2.2. Quartier Bastos

Bastos (fig. 14-7, voir cahier couleur), quartier résidentiel très chic, se développe autour de l'usine de manufacture des tabacs. L'habitat est de type pavillonnaire de haut de gamme et réservé aux couches urbaines aisées. D'abord lieu de résidence des hauts cadres de l'entreprise, Bastos voit de plus en plus arriver des couches urbaines riches de tous les secteurs professionnels, capables de payer des loyers élevés.

4.2.3. Quartier Essos

Essos (fig. 14-8, voir cahier couleur) est un quartier de lotissements anciens qui connaît une densité d'occupation du sol élevée. En effet, à l'intérieur et surtout au voisinage des lotissements se développe une urbanisation populaire et précaire. C'est ainsi que les quartiers de ce type, sur le plan social, sont le lieu de résidence des couches urbaines moyennes et pauvres. La végétation se confine dans quelques vallées dont l'irrégularité témoigne d'une avancée des constructions dans des zones inondables.

4.2.4. Quartier Briqueterie

La Briqueterie (fig. 14-9, voir cahier couleur) est un quartier populaire d'habitat précaire. Les constructions sont disposées dans le plus grand désordre. Le taux d'occupation de l'espace est le plus élevé de toute la ville. Les rares espaces verts qu'on trouve ici ne témoignent en rien du confort de l'habitat. Il s'agit simplement des jardins de case sur des lopins de terre en attente d'une conjoncture financière favorable pour recevoir une maison. Ici s'entassent, en priorité, des citadins pauvres. Mais, de plus en plus s'y installent des citadins assez fortunés non seulement pour réaliser des économies en payant des loyers plus bas mais aussi pour bénéficier de l'ambiance et de l'animation qu'on ne trouve pas dans les quartiers riches.

5. Conclusion

On constate l'intérêt de l'imagerie HRV pour mettre en évidence la différenciation spatiale et sociale des quartiers. Dans les villes africaines notamment, elle peut servir à combler l'absence de documents sur l'occupation du sol. Ce serait d'un apport inestimable pour la conduite des politiques de gestion urbaine et d'aménagement. Cette différenciation urbaine serait plus précise et plus fiable en utilisant une image panchromatique, dont la résolution spatiale est de 10 m.

Il aurait aussi été intéressant de mener une analyse dynamique du paysage urbain. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer de plusieurs images de la ville à des dates différentes. Ici, on est confronté à deux problèmes majeurs. Il s'agit d'une part de la rareté des images de bonne qualité sous les latitudes équatoriales, compte tenu de fortes et quasi permanentes perturbations atmosphériques. D'autre part, quand bien même ces images seraient disponibles, il se posera ensuite le problème du coût de leur acquisition.

Malgré cet intérêt, l'imagerie HRV (XS) présente des limites certaines en matière d'analyse urbaine. Les images n'ont pas encore la précision des photographies aériennes auxquelles les professionnels de l'urbanisme sont habitués. Le travail de terrain et l'intégration des informations de sources exogènes demeurent donc indispensables.

6. Références

ASSAKO ASSAKO, R.-J. 1996. Contribution à la création d'un observatoire urbain utilisant la télédétection et les données géo-référencées à Yaoundé (Cameroun). Thèse de doctorat, Université de Paris X – Nanterre, 327 p.

COLLET, C. 1989. L'utilisation des images satellitaires dans l'analyse urbaine (Lausanne, Suisse). Photo-Interprétation, n° 89-5 et 6, p. 73-77.

ZHAO, R. 1986. Types de quartiers urbains à Nanjing (Chine) d'après Landsat. Photo-Interprétation, n° 86-5, p. 29-35.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 155-161

15

Apport de la télédétection et des SIG à la gestion urbaine : cas de Ouagadougou (Burkina Faso)

NOUROU MOUCHARAF PADONOU [1], MAMADOU SINÉ CAMARA [1] et MAMADOU SÉKOU KEITA [2]

[1] *Centre régional de télédétection de Ouagadougou (CRTO), B.P. 1762, Ouagadougou, 01 Burkina Faso;*
téléphone : +226 36-75-01; télécopieur : +226 30-09-71

[2] *Direction de la cartographie et de la topographie (DCT), B.P. 240, Bamako, Mali*

Résumé

Les possibilités offertes par la télédétection et les SIG permettent de nos jours de mieux appréhender les problèmes urbains complexes. La présente étude vise à montrer la performance de ces outils et leur complémentarité pour l'analyse de l'espace urbain. L'interprétation visuelle de l'image HRV (P + XS) de SPOT de Ouagadougou a donné les résultats suivants : 1) la carte des structures linéaires sur laquelle apparaissent les cours d'eau, les voiries, les réseaux routiers et ferroviaires; 2) la carte de l'occupation des sols sur laquelle apparaissent les retenues d'eau et barrages, la végétation, les habitats, les zones industrielles et les équipements. Le croisement de ces résultats avec des données exogènes (démographiques, culturelles, etc.) au moyen du logiciel ARC-INFO nous a permis de réaliser la carte d'occupation du sol urbain à partir de laquelle on pouvait mieux saisir les mécanismes de développement des habitats spontanés dans la zone périurbaine. L'apport de cette cartographie a été surtout de pouvoir mesurer la croissance spatiale de Ouagadougou et de fournir une base rigoureuse et actualisée de sondage pour les enquêtes statistiques diverses. De nombreuses utilisations peuvent être faites de ces documents notamment le diagnostic des zones d'habitats spontanés et la mise à jour des cartes de base souvent anciennes. Par cette étude, nous mettons en évidence une nécessaire association d'outils pour mener à bien un travail thématique basé sur la connaissance des phénomènes urbains.

1. Introduction

Le Centre régional de télédétection de Ouagadougou (CRTO), dont la principale mission est de promouvoir la télédétection et les SIG à travers la formation et l'assistance aux utilisateurs, est également engagé dans la recherche de méthodologies appropriées dans la mise en œuvre des projets axés sur ces techniques. Ce travail est mené en étroite collaboration avec la Direction de l'urbanisme et de l'habitat et l'Institut géographique du Burkina Faso. C'est dans ce cadre que nous avons conduit la présente étude.

Dans les pays en développement, les données fiables en matière d'urbanisme et indispensables pour des réflexions relatives à l'amélioration des conditions de vie, sont rarement disponibles et souvent obsolètes, car les moyens traditionnels de collecte de l'information sont hors de portée des principaux responsables de la planification. Par rapport aux qualités prouvées des photographies aériennes, l'avènement des données HRV du satellite SPOT, dont la résolution au sol atteint 10 m en mode panchromatique (P), permet d'élaborer rapidement des documents utiles à la planification et aux études urbaines. D'autre part, le développement récent des SIG avec l'essor de l'informatique a fortement contribué à améliorer la connaissance des scénarios de développement urbain.

L'étude consiste à tester les possibilités opérationnelles de l'imagerie HRV et des SIG pour la gestion et le suivi des dynamiques urbaines. Elle a pour objectifs d'évaluer la capacité des données HRV à se substituer aux photographies aériennes pour une cartographie de l'espace urbain et de rechercher une méthodologie souple d'appréhension de la gestion urbaine par la télédétection et les SIG.

2. Cadre de l'étude

Pour cette recherche méthodologique nous avons retenu la ville de Ouagadougou (12° 25' N; 1° 30' O), capitale du Burkina Faso. La ville de Ouagadougou qui s'est édifiée au cœur du plateau central « mossi » est caractérisée par sa monotonie et son faible relief (250 à 300 m d'altitude moyenne). Elle s'est développée autour du palais du roi des « mossi » à partir du regroupement de quelques villages. Ce noyau, qui fut agrandi de bâtiments administratifs pendant la colonisation, a connu une évolution prodigieuse passant de 2 000 ha en 1957 à 20 000 ha en 1992. Quant à la population, elle passa de 60 000 habitants en 1960 à 890 000 habitants en 1990. Cette croissance galopante de la ville se conjugue avec un développement anarchique des habitats spontanés. Elle s'est surtout accompagnée d'une dégradation du couvert végétal et de la progression des zones rurales périphériques en direction de la ville. La zone urbanisée de Ouagadougou, limitée dans les années 1980 au nord par les trois barrages, et à l'est par l'aéroport international, a largement dépassé ces limites.

3. Approche méthodologique

La méthodologie d'analyse retenue pour cette étude comprend six étapes : 1) l'image-interprétation de l'image HRV (P+XS) à l'échelle du 1: 40 000 du 17 septembre 1992; 2) la photo-interprétation des photographies aériennes de la mission 89095 IGB de novembre 1988 à l'échelle moyenne du 1: 10 000 pour l'obtention des détails et les enquêtes de terrain; 3) la classification de l'image HRV (P + XS) pour obtenir la carte zonale de

l'occupation du sol urbain; 4) le transfert des données de télédétection et des données auxiliaires dans un SIG au moyen du logiciel Arc-Info par digitalisation des cartes zonales et des structures linéaires; 5) le codage des différents fichiers sous forme de référentiel cartographique permettant le repérage des uns par rapport aux autres; 6) le croisement des données vectorielles permettant l'analyse et la réalisation de la carte de synthèse nommée carte d'occupation du sol urbain.

Un plan guide de la ville de Ouagadougou édité en 1987 par la Direction de l'habitat de 1994 (fig. 1) et des cartes topographiques de la ville à l'échelle du 1: 25 000 ont été également exploités pour cette étude.

Les photographies aériennes ont permis d'identifier les détails qui ne sont pas perceptibles sur l'image satellitaire et de limiter les sorties de terrain.

4. Résultats de l'image-interprétation

L'image-interprétation est fondée sur l'exploitation visuelle de l'image HRV (P + XS) en composition colorée et a été réalisée suivant l'approche analogique. L'échelle de l'image restituée par croisement des données multibandes (XS) et panchromatiques (P) est de 1: 40 000 avec une résolution géométrique de 10 m. Les éléments qui ont été cartographiés sont regroupés à l'intérieur des sections suivantes : les structures linéaires et les éléments d'occupation du sol.

4.1. Les structures linéaires

En s'appuyant sur les critères d'identification fondés sur les notions de texture (forme, couleur, taille) et de structure, on a pu distinguer quatre types de structure linéaire : 1) le réseau hydrographique; il apparaît dans le prolongement des retenues d'eau et est difficilement cernable avec un aspect discontinu; 2) les voiries primaires (routes principales et canaux d'assainissement); elles apparaissent plus clairement avec une tonalité plus foncée; 3) les voiries secondaires (routes en terre et pistes); elles apparaissent moins nettement que les précédentes avec une tonalité moins foncée; 4) les voies ferrées; elles s'identifient sur l'image par un tracé fin et continu. Les critères d'identification des structures linéaires sont présentés sur le tableau 1.

4.2. Les éléments d'occupation du sol

Les critères d'identification des types d'occupation du sol sont présentés sur le tableau 2.

4.2.1. Les plans d'eau

Les plans d'eau constituent un élément caractéristique du paysage urbain de la ville de Ouagadougou et s'identifient par un bleu sombre sur l'image pour les deux premiers barrages et un bleu clair pour le troisième barrage. Cet aspect du troisième barrage permet d'affirmer que l'eau était turbide au moment de la prise de vue. Cette turbidité pourrait provenir de la présence des particules en suspension.

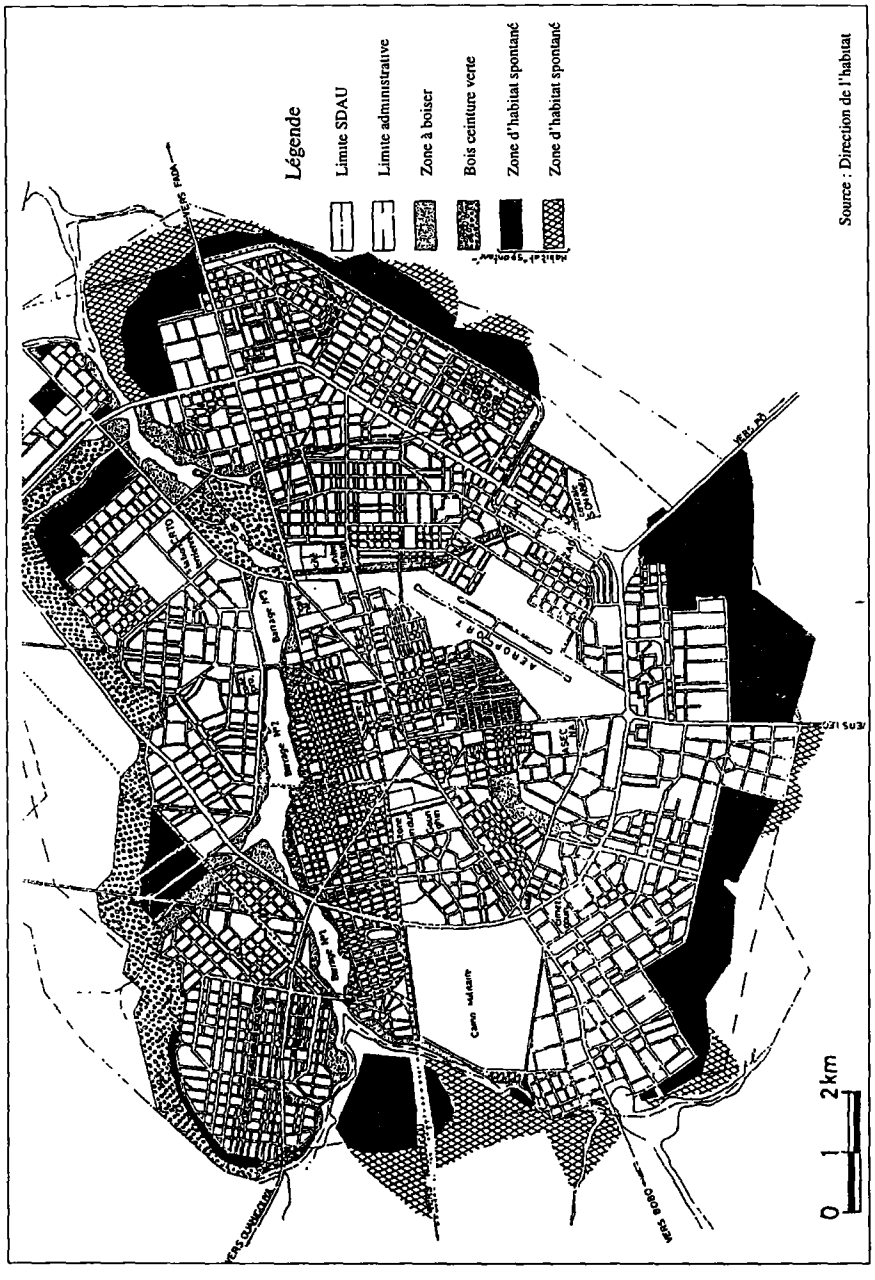


Figure 1. Plan de la ville de Ouagadougou

Tableau 1. Critères d'identification des structures linéaires

Classe	Description	Couleur
Voirie primaire (route principale revêtue)	Tracé continu avec une visibilité claire	Bleu-vert sombre
Voirie secondaire (route en terre, piste)	Tracé discontinu à emprise peu cernable	Bleu-vert clair
Chemin de fer	Tracé fin avec une bonne visibilité	Vert-bleu et rouge clair
Cours d'eau	Tracé à forme irrégulière difficilement cernable	Bleu-vert clair et peu sombre

4.2.2. La végétation

La végétation apparaît sur l'image en une texture très variable suivant sa densité et sa position; sur cette base nous avons procédé à une classification hiérarchisée à savoir : 1) les zones à végétation très dense qui apparaissent en rouge sombre et vif; 2) les zones à végétation basse qui sont en rouge clair avec des points blancs; 3) la végétation périurbaine, qui entoure la ville et qui constitue la réserve foncière, apparaît avec une couleur hétérogène (rouge, bleu-vert et taches blanches) sur l'image.

4.2.3. Les zones résidentielles et habitats

Les zones résidentielles et habitats sont caractérisés par trois types de tissus à savoir : 1) le centre urbain où les structures de bâtiments apparaissent en grandes dimensions sous une couleur dominante bleu-vert avec des taches blanches par endroits; 2) les anciens quartiers apparaissent en couleur bleu-vert sombre, ce qui caractérise la densité des habitats; 3) les habitats spontanés qui se situent à la limite de la zone urbaine, s'identifient par leurs aspects non structurés avec une couleur bleu-vert clair et magenta.

4.2.4. Les zones industrielles et les équipements

Les zones industrielles s'identifient aisément par les grands bâtiments (usines) qui apparaissent en bleu sur un fond rouge symbolisant la présence de végétation dans les parcelles.

Les équipements (terrains de sport, hippodrome, etc.) apparaissent sous forme de rectangle à fond rouge vif (terrains de sport), circulaire à fond blanc (hippodrome) et sombre (aéroport).

5. Résultats de l'intégration des données dans un SIG

L'exploitation analogique de l'image HRV ne suffit pas pour tirer des conclusions qualitatives souhaitées concernant la couverture et l'utilisation des sols urbains. Aussi les résultats obtenus à partir de cette interprétation, à savoir la carte des structures linéaires et celle de l'occupation du sol ainsi que les données relatives à la population, à l'historique de la ville et à la statistique, ont été intégrés dans un SIG au moyen du logiciel Arc-Info.

Tableau 2. Critères d'identification et évaluation de la superficie des différents types d'occupation du sol

Classe	Forme	Couleur	Surface (ha)	Pourcentage (%)
Habitat dense	Texture très dense	Bleu-vert et bleu sombre	1 752,17	9,83
Habitat de moyenne et basse densités	Petit carré peu dense et pointillé	Bleu-vert et rouge claire	5 741,57	32,22
Habitat boisé	Texture hétérogène et petit carré peu dense	Dominante rouge, teinte bleu-vert	728,21	4,09
Centre urbain	Large rectangle texture moyennement dense	Dominante bleu-vert, sombre et blanc	151,34	0,85
Habitat spontané	Pointillé très dispersé	Bleu-vert et rouge claire	884,62	4,96
Zone industrielle	Grand rectangle et structure hétérogène	Bleu sombre et rouge	231,68	1,30
Équipement	Rectangle et large structure	Bleu sombre et rouge	367,94	2,06
Zone à végétation très dense	Texture dense et homogène	Rouge sombre et rouge vif	1 536,67	8,62
Zone à végétation dense	Texture moyennement dense et peu homogène	Rouge vif dégradé	2 413,91	13,55
Zone à végétation basse	Texture très clairsemée	Pointillés rouges très dégradés	498,08	2,80
Végétation périurbaine	Texture hétérogène et dégradée	Bleu-vert clair et rouge peu sombre	3 025,57	16,99
Plan d'eau	Texture homogène et dense	Bleu sombre, bleu clair et rouge	426,21	2,39
Sol nu	Structure homogène	Tache blanche	60,60	0,34
			17 818,57	100,00

Ce logiciel fonctionne en modes « raster et vecteur » et manipule les unités fondamentales de la représentation cartographique en mode « vecteur » en assurant la numérisation, le dessin, et le traitement cartographique. Il permet aussi par un module « Info » d'emmagasiner, de croiser et d'analyser les informations. À partir donc de la manipulation des différents modules (saisie, traitement et restitution) de ce logiciel, nous avons établi une carte d'occupation du sol (fig. 15-2, voir cahier couleur). L'évaluation de la superficie des différents types d'occupation du sol est présentée au tableau 2.

6. Discussion et analyse

L'utilisation de la chaîne opérationnelle télédétection–SIG a eu pour intérêt de fournir une base de sondage rigoureuse et à jour pour des enquêtes statistiques diverses (démographiques, socio-économiques, etc.) et de mesurer la croissance spatiale de la ville en vue de la définition d'une politique de gestion rationnelle. Correctement mise en œuvre, elle donne un outil efficace de gestion et d'aide à la décision. Cependant, l'image HRV en composition colorée (P+XS) à l'échelle du 1: 40 000 utilisée n'a pas permis d'identifier avec précision les principaux équipements et les réseaux routiers secondaires. Cela détermine une des limites de l'image HRV à l'étude de l'urbanisme. L'utilisation des photographies aériennes et les sorties de terrain sont donc indispensables pour les détails. Les coûts élevés d'acquisition des images HRV et du matériel SIG constituent de sérieuses difficultés pour l'utilisation systématique de ces outils. Cette méthodologie d'interprétation, bien qu'elle permette une vision globale et répétitive de l'ensemble de l'aire d'intervention, reste un prolongement des techniques classiques telles que l'utilisation des photographies aériennes et les enquêtes. On pourrait envisager que des réflexions soient ouvertes pour réduire la nécessité d'utiliser les photographies aériennes en améliorant la résolution géométrique au sol des futurs satellites pour des études appropriées d'urbanisme.

7. Conclusion

Cette étude illustre de façon concrète les atouts opérationnels qu'offre la télédétection dans la recherche des informations pour une gestion efficiente de l'espace urbain. L'interprétation visuelle de l'image HRV (P+XS) en composition colorée a surtout permis de mettre en évidence un contexte géographique lié au caractère informel des implantations urbaines, à sa croissance et à son environnement. Les résultats obtenus permettent non seulement d'examiner les différents modes d'affectation du sol en milieu urbain, mais aussi de réaliser une mise à jour des cartes souvent obsolètes. Le coût relativement élevé de l'image HRV est compensé par les économies de personnel requis lors de la collecte des informations de terrain, et du produit dérivé obtenu qui peut être mis à la disposition des opérateurs impliqués dans les programmes d'aménagement des villes africaines. Une étude diachronique est prévue pour le suivi de la dynamique de la gestion de la ville de Ouagadougou dans le cadre du projet de développement urbain, afin de mettre en place un système d'information urbain. Notre souhait est que le CRTO soit associé à sa mise en œuvre.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 163-172

16

Processus d'urbanisation et imagerie satellitaire : deux exemples indiens

ODETTE VAGUET, ALAIN VAGUET et ALBAN BOURCIER

Laboratoire Modélisation et traitements graphiques (MTG), UR 1351 du CNRS, Département de géographie, Université de Rouen, 76821 Mont Saint-Aignan cedex, France; téléphone : +33 (2) 35-89-82-48; télécopieur : +33 (2) 35-14-62-00

Résumé

L'apport de la télédétection se révèle particulièrement précieux en Inde puisque les photographies aériennes sont inaccessibles. Nous avons retenu ici deux exemples de villes dont la spectaculaire croissance a attiré l'attention : Hyderabad (Inde centrale), et Coimbatore (Inde du Sud), respectivement 4,2 millions et 1 million d'habitants en 1991. Ces deux métropoles, bien qu'appartenant au même modèle urbain indien, présentent des configurations spatiales originales. L'imagerie satellitaire a permis d'affiner nos études de morphologie urbaine pour chacune des deux villes mais aussi d'élaborer des comparaisons. Ainsi, la pertinence de certains traitements a permis de dégager des spécificités morphologiques. De même, si la périurbanisation constitue un processus commun aux deux agglomérations, la télédétection spatiale, en offrant une perception globale de l'espace urbain, a mis en évidence des modèles de diffusion urbaine différents. En effet, l'expansion de type auréolaire de Hyderabad s'oppose à la configuration linéaire ou axiale de la périurbanisation à Coimbatore. Au total, la complémentarité de deux méthodes et échelles d'analyse urbaine (terrain/télédétection spatiale) apporte une nouvelle image de la ville qui permet de décrypter les facteurs d'organisation spatiale et les processus d'évolution.

1. Introduction

Avec 218 millions de citadins, l'Union Indienne occupe le second rang des populations urbaines dans le monde en dépit d'un taux d'urbanisation modéré (25,7 % en 1991). Néanmoins, ce sont les villes millionnaires qui se développent le plus rapidement même si les taux d'accroissement varient considérablement d'une agglomération à l'autre. De plus comme la plupart des villes du Tiers monde, celles de l'Inde s'étalent, grignotant peu à peu villages et terres agricoles environnants. Les zones périurbaines s'accroissent sous des formes diverses, l'imagerie satellitaire offrant une échelle d'analyse fort intéressante de ces phénomènes (WEBER, 1995). En effet, la ville apparaît dans sa globalité et l'on songe au nombre de clichés aériens nécessaires à la prise en compte de l'espace urbanisé de Hyderabad. Mais l'apport de la télédétection satellitaire est d'autant plus précieux que les photographies aériennes sont inaccessibles en Inde, « *secret defense* » oblige.

Nous retiendrons ici deux exemples de villes dont la croissance a attiré l'attention : Hyderabad, cinquième ville du pays, capitale de l'état d'Andhra Pradesh et Coimbatore, seconde ville du Tamil Nadu après Madras. Hyderabad, 4,2 millions d'habitants en 1991, a connu le rythme d'accroissement le plus important parmi les six premières villes indiennes entre 1981 et 1991 (+ 67 %). Coimbatore a officiellement atteint le million d'habitants en 1991 mais l'aire d'influence directe est depuis longtemps déjà millionnaire. Son taux de croissance très fort dans les années 60 (+ 65 % entre 1961 et 1971) est retombé depuis aux environs de 24 % mais la périurbanisation est largement occultée du fait des limites administratives étroites de l'agglomération.

Bien qu'appartenant au même modèle urbain indien, nous verrons que ces deux métropoles, connaissent des configurations spatiales originales tant dans le domaine intra-urbain que périurbain du fait d'un passé et d'une vocation économique différents.

Notre démarche a donc été prospective quant à la nature de l'information que pouvait livrer l'imagerie HRV de SPOT en contexte urbanisé, puis explicative, par souci de commenter un phénomène et une organisation à caractère spatial très marqué. Chaque situation présentant une transcription physique dans l'espace géographique est ainsi repérée, identifiée et caractérisée.

2. Méthodologie

L'architecture de travail se compose d'un poste PC 486/66 de 16 Mo de RAM et comporte un disque dur de 2 Go couplé avec un moniteur de visualisation de haute résolution de 22 pouces. Sur ce site, est implantée une version complète du logiciel Multiscope (système de traitement d'image développé par la société Matra Cap System), offrant des ouvertures certaines avec l'environnement des systèmes d'information géographique.

Pour mener à bien la phase d'étude portant sur la ville de Hyderabad, nous avons exploité deux images : une scène HRV (XS) de SPOT KJ 215-315 du 14 mai 1989 et une scène HRV (P) de SPOT KJ 215-315 du 7 novembre 1991.

La superposition des images multibande et panchromatique a permis de détecter, outre des habitations récentes, des équipements routiers qui témoignent de la véritable progression de l'espace urbanisé dans cette direction.

De manière générale, la création de pseudo-canaux à 10 m a permis de dresser des bilans interprétatifs détaillés en matière d'analyse intra-urbaine. Nous avons ainsi pu identifier un grand nombre d'éléments constitutifs des sites bâtis.

D'autres traitements prennent en compte des néo-canaux générés à partir d'opérations de filtrage accentuant les discontinuités spatiales (passe-haut) (LEJEUNE *et al.*, 1987). Ils permettent de mieux identifier les zones d'habitat diffus sous la forme d'amalgames aérés composés de pixels très réflectants, s'individualisant avec clarté par le biais de compositions colorées intégrant des canaux sources.

Une dernière série d'opérations a été exécutée sur les bandes spectrales de Hyderabad par l'intermédiaire de la transformée de Hotelling (adaptation de la transformée de Karmumen-Loëve pour des valeurs discrètes). Une analyse en composantes principales a donc été commandée afin de rassembler la quasi-totalité des bandes spectrales originales dans un seul canal présentant la particularité de ne plus poser de problème d'identification des objets dans les limites de 15 à 20 postes de légende. De plus, combinée à d'autres canaux, la composante principale n° 1 issue de cette transformée donne lieu à des compositions colorées d'une excellente qualité visuelle.

Le travail présenté ici sur le site de Coimbatore a été réalisé à partir de l'image HRV (XS) de SPOT KJ 215-328 du 4 février 1994.

Outre l'utilisation de compositions colorées classiques résultant de la combinaison des bandes spectrales sources, nous avons donné la préférence à d'autres variantes de la transformée de Hotelling basées sur la création d'indices. Il s'agit de transformations multivariées favorisant la mise à disposition d'une information synthétique à l'aide de fonctions mathématiques. Ici, l'emploi d'un indice de cuirasse [(3 · XS1) - XS2 - 100] se justifie par notre volonté de mettre en valeur les espaces bâtis et d'isoler des zones homogènes du point de vue physique et indirectement fonctionnel (BOURCIER, 1994).

3. L'extension de type auréolaire de Hyderabad

3.1. La dissymétrie nord-sud

Hyderabad est très étendue puisqu'elle occupe une superficie deux fois supérieure à celle des vingt arrondissements parisiens. Son site urbain est considéré comme l'un des plus beaux de l'Inde : installée sur le plateau sec du Télangana à environ 500 m d'altitude, dans un décor minéral, parfois austère et contraignant, Hyderabad est embellie par la présence du lac artificiel de Husain Sagar, au nord duquel s'est développée Secunderabad, ancien cantonnement britannique. La proximité des deux villes a inspiré leur désignation sous le terme de villes-jumelles.

Succédant à la cité fortifiée de Golconde sise à une dizaine de kilomètres à l'ouest, Hyderabad s'est d'abord développée sur la rive droite de la Musi à partir de la fin du XVI^{e} siècle puis elle a « traversé » la rivière.

L'organisation spatiale de cette capitale ancienne porte encore l'empreinte du passé : sa morphologie polycentrique traduit les transferts de centralité (VAGUET et VAGUET, 1993). Une densité particulièrement forte du bâti souligne les trois centres de l'agglomération (n^{os} 1-3, fig. 16-1, voir cahier couleur).

Au sud, le cœur historique (n° 1, fig. 16-1), édifié par les régnants musulmans dès le XVI^{e} siècle, se compose d'édifices religieux islamiques et du bazar musulman. Les habitations et les commerces y sont si tassés et les ruelles si étroites que celles-ci ne sont guère visibles sur l'image. En particulier, la trame orthogonale N-S/E-O désignant le Charminar (monument symbole de la ville) comme le centre originel de la cité en 1591 n'apparaît pas sur l'image.

Cette zone centrale s'est trouvée en perte de vitesse dès le début du XX^{e} siècle au profit de la rive gauche.

L'actuel centre des affaires (n° 2, fig. 16-1) se situe à l'emplacement choisi par le Résident britannique en 1798, sur la rive gauche. Ce quartier « européen » aéré et sûr attira bientôt la population autochtone et même le pouvoir politique local puisque le Nizam s'installa au nord de la rivière dès 1905. Aujourd'hui, on y trouve l'artère moderne de la ville, Abids, qui comprend les commerces modernes et les banques et qui connaît une verticalisation croissante (composantes géométriques très réflectantes sur l'image) surtout depuis la fin des années 80. À proximité, le long d'axes plus modestes, s'organise le bazar hindou traditionnel (amalgame de pixels hétérogènes).

Le troisième centre bien visible sur l'image est celui de Secunderabad (n° 3, fig. 16-1), au nord-est du lac Husain Sagar (n° 4, fig. 16-1). Stimulé par l'implantation de la gare ferroviaire en 1874, ce centre s'est développé entre Hyderabad et le cantonnement britannique créé en 1806 pour la protection de la Résidence coloniale. Artère moderne et bazar traditionnel hindou composent un cœur très vivant.

L'agglomération tire son originalité de la traduction spatiale de la pluralité religieuse des populations. Dans la capitale d'un pouvoir originellement musulman, installée au cœur d'une région essentiellement hindouiste, s'est mise en place une véritable frontière culturelle nord-sud entre Islam et hindouisme : la rivière Musi. Le secteur situé au sud de cette rivière abrite une grande partie de la minorité musulmane tandis que dans la partie nord, les hindous sont largement prédominants. À ce clivage religieux s'est superposé, et ce n'est pas par hasard, un second d'ordre économique, voire politique : la figure 16-1 illustre bien le déclin du sud et le dynamisme du nord. En effet, la dissymétrie du réseau des voies de communication souligne, par des tracés larges et bien visibles, la croissance démographique et économique du nord. À l'inverse au sud, le réseau moins dense, moins hiérarchisé et l'absence d'équipements métropolitains dans ce domaine traduisent la stagnation voire la perte de vitesse de la « vieille ville », celle-ci demeurant tout de même congestionnée.

Les dynamiques spatiales récentes confirment ce diagnostic : les espaces interstitiels se sont peu à peu comblés entre Hyderabad et Secunderabad, et l'axe d'urbanisation majeur depuis les années 60 se situe au nord de la Musi. La composition colorée traitée à cet effet fait bien apparaître ces extensions (n° 5, fig. 16-1).

3.2. Périurbanisation et industrialisation : sur la route de Bombay au nord

L'implantation de la zone industrielle de Sanathnagar (n° 6, fig. 16-1) sur la route de Bombay constitue l'une des meilleures illustrations du dynamisme évoqué précédemment. Hyderabad, qui avait une vocation essentiellement tertiaire, a bénéficié de la politique nationale de localisation industrielle visant à corriger les tendances d'une époque coloniale dont l'économie extravertie avait favorisé les villes littorales. À partir des années 60, diverses mesures incitent les industriels à préférer les agglomérations de l'intérieur. Le document satellitaire exploité montre bien que zonage et grande taille des unités de production sont caractéristiques de ces implantations récentes : les usines modernes se trouvent plutôt en périphérie du fait de la présence de terrains vacants (BOURCIER *et al.*, 1996a). Parallèlement, l'emprise des équipements liés aux transports tels l'aéroport (n° 6, fig. 16-1) et les réseaux viaire et ferroviaire, est forte. Lié à cette géographie industrielle volontaire, le dynamisme démographique est important en direction du nord. Les quartiers modestes se sont multipliés et les *slums* (habitat sous-intégré) y ont proliféré. Cependant, si les bâtiments industriels, nettement regroupés à Sanathnagar, se distinguent de l'habitat

par leur taille voire une réflectance souvent élevée, les quartiers résidentiels se différencient en fonction de leur densité mais pas en fonction du type de matériau utilisé : ainsi dans l'état actuel de nos travaux, les bidonvilles repérés sur le terrain ne sont pas identifiables en tant que tels sur l'image.

3.3. Concilier contraintes topographiques et cadre de vie : l'extension résidentielle à l'ouest

À l'ouest (fig. 16-2, voir cahier couleur), c'est la fonction résidentielle qui a dirigé la progression de la ville. Si l'on exclut le fort de Golconde (n° 1, fig. 16-2), abandonné au XVI^{e}, le développement urbain s'est produit surtout depuis les années 70. Les contraintes topographiques (colline granitique de type inselberg) (n° 2, fig. 16-2) sont importantes et l'approvisionnement en eau malaisé : deux obstacles d'ailleurs à la survie de Golconde dont le site défensif interdisait une importante extension et dont la surdensification avait abouti à des désastres sanitaires en partie à cause d'un approvisionnement difficile puis insuffisant en eau.

Néanmoins, c'est vers l'ouest que le quartier chic de « Banjara Hills » (n° 3, fig. 16-2) s'est développé. Il doit son nom aux tribus éponymes qui vivaient dans cette zone rocheuse peu propice à l'agriculture. Les nantis ont été séduits par ces terrains disponibles à bas prix; ils réclamaient cependant des moyens pour leur aménagement et une autonomie pour les déplacements vers les zones centrales. Ainsi le quartier s'est développé sur les hauteurs (environ 600 m) dans un paysage minéral d'une grande beauté auparavant peu peuplé. Le semis de points larges de l'image (n° 4, fig. 16-2) correspond à un habitat individuel sur de grandes parcelles. C'est l'adresse de prédilection des classes supérieures (hauts fonctionnaires, industriels, gros commerçants, vedettes de cinéma, etc.).

En contrebas (vers 500 m), apparaît un semis de points plus dense (n° 5, fig. 16-2) qui traduit un bâti juxtaposé. Espace vacant et éloignement du centre-ville ont attiré les promoteurs, les agences gouvernementales et les grandes entreprises pour y construire des lotissements plus modestes. La présence de bidonvilles s'explique par une pression foncière longtemps faible qui a conduit, par exemple, les populations à occuper des terres proches de chantiers de construction qui les employaient. L'État a même voué certaines parcelles considérées au départ comme excentrées et peu valorisées à des programmes de relogement des bidonvillois auparavant installés dans les zones centrales ou péricentrales.

Mais l'étalement urbain continue et apparaissent ainsi des terrains prêts à être lotis comme en témoigne l'implantation du réseau de desserte (n° 6, fig. 16-2). La progression s'opère néanmoins en nappes discontinues en raison des contraintes de la topographie (collines, chaos rocheux, etc.) ou du jeu des réserves foncières privées (n° 7, fig. 16-2) dans cet ancien état princier.

3.4. Limites de ville : la progression vers l'est

Succédant au comblement des espaces interstitiels séparant encore Hyderabad et Secunderabad à l'aube des années 60, une progression auréolaire s'opère vers l'est, en direction et au-delà de l'université (BOURCIER *et al.*, 1996a).

On distingue une limite de première génération : la voie ferroviaire (n° 7, fig. 16-1) qui souligne la fin du tissu urbain dense continu (n° 8, fig. 16-1) des années 60. Aujourd'hui un périphérique en cours d'aménagement, plus à l'est, dessine un nouveau front d'urbanisation (n° 9, fig. 16-1).

Cette extension orientale se caractérise par la présence de l'Université d'Osmania (n° 10, fig. 16-1) créée au début du XX^{e} siècle et qui apparaît comme un îlot de verdure réservé aux marges duquel l'urbanisation reprend (n° 11, fig. 16-1). En direction de la zone industrielle de Uppal dont l'implantation a répondu à l'existence de terrains disponibles et à une politique de localisation excentrée des usines, l'habitat se développe, plus particulièrement le long de la route.

La localisation des zones industrielles reflète les étapes de la progression métropolitaine. Azamabad (n° 12, fig. 16-1), située en périphérie dans les années 60 alors que Hyderabad et Secunderabad étaient séparées par des espaces non urbanisés, se retrouve aujourd'hui au cœur du continuum existant entre les deux villes. De même, Uppal et Moula Ali (respectivement au sud-est et au nord-est du campus) sont peu à peu rattrapés par la progression du bâti, matérialisant ainsi le nouveau front d'urbanisation.

4. Diffusion urbaine linéaire à Coimbatore

4.1. Coimbatore, une métropole en émergence

Coimbatore est une ville de piémont, au revers des Ghats occidentaux (n° 1, fig. 16-3, voir cahier couleur), élément orographique majeur du Deccan. Du fait de la présence de ces moyennes montagnes qui confèrent une position d'abri au plateau sur lequel se situe la ville, l'environnement ne diffère guère de celui de Hyderabad : une zone sèche que la population néanmoins, s'est efforcée de rendre cultivable grâce à une tradition hydraulique ancienne. La valorisation des terres irriguées apparaît d'ailleurs bien sur l'image : au sud la bande de cultures irriguées (n° 2, fig. 16-3) résiste mieux à la pression foncière urbaine que les terroirs secs situés au nord et à l'est. Ce contraste entre surfaces irriguées et zones sèches est beaucoup plus net pour Coimbatore que pour Hyderabad dont l'arrière-pays a toujours manqué de dynamisme agricole. Dans un contexte agroclimatique équivalent, ces deux régions du Deccan ont connu un développement inégal.

La vocation économique des deux agglomérations est elle-même très différente. Si Hyderabad possède une longue histoire de pôle politique, Coimbatore, après avoir joué un rôle de carrefour entre Kerala et pays Tamoul, est devenu sous l'impulsion des Britanniques, un centre industriel textile important de l'Inde du Sud dans les années 1890. L'intérêt des castes de gros propriétaires pour ce secteur lié au départ à la production cotonnière a renforcé la dynamique du secteur secondaire qui aujourd'hui s'est diversifié et fait preuve d'une ingéniosité rare dans les villes indiennes de cette importance. L'originalité de Coimbatore tient aussi aux liens étroits qui unissent les membres des castes économiquement dominantes de la ville à ceux de la campagne environnante et la diffusion urbaine est aussi en partie l'expression de ce continuum social et économique (SCHAR, 1992).

L'identification des différents quartiers conduit là aussi à constater des dissemblances entre les deux métropoles. À Coimbatore, le degré de végétalisation (mis en évidence par l'indice de végétation NDVI) est un indicateur particulièrement pertinent contrairement à Hyderabad, capitale politique ancienne, dont le tissu urbain est globalement plus dense et plus étendu (BOURCIER *et al.*, 1996a). Les nuances du bâti sont d'ailleurs plus délicates à repérer pour Hyderabad que pour Coimbatore.

D'une certaine façon la seconde ville du Tamil Nadu illustre à perfection le modèle urbain indien simplifié. La structure duale liée à l'apport urbanistique colonial apparaît clairement à travers la corrélation de la densité du bâti et de la végétalisation (BOURCIER *et al.*, 1996b). Les deux villes (indigène/coloniale) sont même séparées ici par une barrière

physique : la voie ferrée, implantée en 1872 (n° 1, fig. 16-4, voir cahier couleur). Celle-ci déchire inopinément aujourd'hui le tissu urbain et complique les transports internes (VAGUET et VAGUET, 1992).

Au sud-ouest se trouve le cœur historique qui abritait à l'origine le fort et le marché. À l'inverse de Hyderabad, c'est encore l'actuel centre des affaires (C.B.D.) dont le tissu urbain serré et le lacis de ruelles très étroites laissent peu de place à la végétation (n° 2, fig. 16-4).

Ce noyau ancien s'est étendu vers le nord et cette extension de première génération se compose d'un tissu urbain moins dense permettant même la présence de cocotiers (n° 3, fig. 16-4). On assiste depuis quelques années à un renforcement des fonctions commerciales et de services de cette partie récente de la ville qui s'organise désormais comme un second centre. Là aussi donc, s'opère un glissement progressif des fonctions centrales vers les quartiers neufs moins engorgés, plus facilement aménageables.

Quant à l'ancien secteur britannique (n° 4, fig. 16-4), à l'est de la voie ferrée, il présente les caractéristiques de l'urbanisme colonial et connaît une densité modeste avec ses nombreux espaces végétalisés. Le quartier du champ de course (n° 5, fig. 16-4), dont le tracé ovoïde apparaît nettement, est un modèle du genre. Il s'agit de l'un des quartiers les plus huppés de la ville, investi après l'indépendance par l'élite économique locale.

Au nord-est du champ de course, la présence d'espaces disponibles a conduit la municipalité à y implanter des équipements publics : stade, prison, gare routière, etc.

Un troisième type de quartier a été identifié, intermédiaire entre les deux unités précitées. Il s'agit des zones récentes, essentiellement situées au nord de l'extension de première génération. Ces quartiers résidentiels revêtent des formes diverses mais présentent tous une organisation géométrique et aérée du bâti qui s'accompagne d'une végétation abondante (n° 6, fig. 16-4).

Comme pour Hyderabad, la reconnaissance des réseaux et l'identification hiérarchique des linéaments précisent les grands traits de l'organisation spatiale métropolitaine. La hiérarchisation de la voirie est nette et souligne surtout l'âge des quartiers. Plus le secteur est récent et plus la trame viaire est nette. À l'opposé, dans le noyau ancien à très forte densité, le réseau est peu visible.

4.2. Diffusion périurbaine et mitage de l'espace agricole

La télédétection satellitaire s'avère particulièrement utile pour mettre en évidence les différents aspects de la dynamique urbaine. Or, Coimbatore connaît une périurbanisation active. Globalement, à l'instar de Hyderabad, la ville s'étend et l'auréole urbanisée s'élargit, ainsi qu'en témoigne la modification des limites de la ville en 1978. Le réajustement des limites n'était que la formalisation d'une situation objective : la prise en compte de la périurbanisation liée en grande partie à la remarquable vitalité économique de la région de Coimbatore.

Cette périurbanisation apparaît nettement sur l'image sous la forme de nébuleuses aérées constituées de points blancs isolés qui sont autant de zones d'habitat diffus. Mais la forme de périurbanisation la plus caractéristique ici est linéaire. Les extensions s'organisent en effet le long d'axes routiers et ferroviaires (n° 3, fig. 16-3). Ce phénomène est lié à la congestion et à l'accroissement des prix des terrains des zones centrales, conduisant des citadins de plus en plus nombreux à s'en éloigner. Les spéculateurs, en anticipant le phénomène, ont tendance à l'accentuer et acquièrent des terres agricoles sèches à bas prix. Entreprises industrielles et institutions renforcent ce phénomène en adoptant une politique d'implantation ou de délocalisation en zone périurbaine : terrains

moins chers et plus étendus. Quant aux particuliers, ils appartiennent essentiellement aux classes moyennes et supérieures surreprésentées à Coimbatore. Ces acquéreurs désirent acheter grand et disposent d'une autonomie en matière de transports, ce qui leur permet de s'éloigner des équipements encore concentrés dans le centre-ville. D'autres participent tout simplement à la spéculation. À la colonisation des espaces péricentraux et périphériques succède celle des espaces périurbains. La composition colorée générée à cette occasion souligne d'ailleurs le contraste entre l'agglomération constituée d'un amalgame de points blancs resserrés et les extensions récentes. Deux caractéristiques méritent alors d'être soulignées : le rôle primordial des voies de communication et la discontinuité de la diffusion périurbaine. En effet, lotissements et terrains nus ou encore périmètres cultivés sont intercalés suggérant une image de puzzle incomplet dont les pièces manquantes sont de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que l'on s'éloigne de Coimbatore. On peut y voir les conséquences de la spéculation foncière et paradoxalement l'effet pervers d'une loi conçue pour l'éviter : ainsi, les acquisitions de terrain sont (au moins en théorie) soumises à un plafonnement depuis la loi nationale de 1976. Cependant, la législation s'applique seulement à un rayon de 5 km autour des villes et les transactions s'opèrent plus facilement lorsque la parcelle dépend encore d'une juridiction rurale.

4.3. Route et voie ferrée « étirent » la métropole vers le nord

L'extension périurbaine s'organise au nord suivant l'axe routier et la voie ferrée en direction de Mettupalayam (n° 4, fig. 16-3). Un semis de points blancs révèle la présence de constructions identifiées comme étant essentiellement des quartiers résidentiels plutôt plus nombreux le long de la route. L'espace agricole est progressivement mité et si l'on en discerne encore le parcellaire, les noyaux d'habitations (colonies ou lotissements) se multiplient. Le transfert de la propriété foncière des ruraux vers les urbains s'accompagne bien sûr d'une augmentation des prix et les terres sèches, dont l'exploitation est de plus en plus coûteuse du fait de l'abaissement du niveau des nappes phréatiques, se transforment peu à peu en terrains à bâtir. À plus grande échelle, l'image permet de détecter les réserves foncières, c'est-à-dire des zones non mises en culture mais en attente de lotissement.

4.4. Les deux axes est et ouest

Bien que dans des directions diamétralement opposées, Coimbatore s'étend le long des axes est et ouest de façon assez analogue.

Vers l'ouest, la progression métropolitaine se trouve toutefois rapidement bloquée par la présence des Ghats bien que l'une des routes menant vers le massif montagneux ait toujours revêtu une grande importance. En effet, Coimbatore est située au débouché du seul passage traversant les Ghats, permettant le lien entre les côtes est et ouest. L'Université de Bharathiar (n° 5, fig. 16-3), créée très récemment en 1978, est située dans cette direction mais dans une voie sans autre issue que le temple de Maruthamalai (n° 6, fig. 16-3), au pied de la montagne. Son environnement physique y est difficile, très sec et on est très loin du campus verdoyant de Hyderabad. Néanmoins, ces terrains disponibles constituaient l'opportunité pour la métropole de s'affranchir dans ce domaine de la tutelle de Madras distante de 500 km. L'implantation de l'Université et l'approvisionnement en eau du secteur ont favorisé le développement urbain. Des lotissements et des maisons sont apparus, essentiellement le fait des classes moyennes et supérieures. Un quartier résidentiel s'est constitué notamment, regroupant des enseignants.

Vers l'est, deux axes presque parallèles ont été des facteurs de diffusion périurbaine : la route d'Avanashi et celle de Trichy (delta de la Kavéry). La première passe par l'aéroport de Peelamadu (n° 7, fig. 16-3). Le long de ces voies, se répète le même scénario : construction de lotissements, absorption de villages mais aussi implantation d'entreprises nouvelles ou délocalisées et de services. Ces derniers montrent néanmoins une prédilection pour la route de l'aéroport, ainsi en est-il des universités privées ou des hôpitaux haut de gamme. Le secteur de Peelamadu est devenu synonyme de quartier aisé.

La périurbanisation, on le voit, est par conséquent sélective et divers facteurs interviennent pour expliquer les dynamiques spatiales. Certes l'image fournit une strate d'information dont l'interprétation doit se nourrir d'une connaissance précise des acteurs présents sur le territoire analysé mais en termes d'échelle et d'objectivité, l'apport de la télédétection spatiale est pour l'instant unique.

Le rôle primordial joué par l'implantation industrielle dans la diffusion urbaine apparaît tant pour Hyderabad que pour Coimbatore : les sites d'industrialisation récente sont excentrés mais répondent à des logiques économiques et politiques différentes. À Hyderabad, les zones industrielles ont été planifiées, répondant à une géographie volontaire et à une impulsion de l'État. Situées en périphérie lors de leur création, elles ont été rattrapées par l'urbanisation attirée par la possibilité de desserte. À Coimbatore, le déplacement ou l'implantation des usines résulte d'initiatives privées, ce qui aboutit à une dispersion des unités de production contrastant avec les zones organisées rencontrées à Hyderabad. Ceci contribue à expliquer tant la tendance auréolaire de l'expansion de Hyderabad que celle linéaire de Coimbatore.

5. Conclusion

Pourtant situées dans un contexte très proche en termes de morphologie et de dynamique urbaines, Hyderabad et Coimbatore présentent une image pourtant très différente lorsque l'on utilise la télédétection spatiale.

L'analyse des processus d'urbanisation de la cinquième ville indienne tire grand profit de l'imagerie satellitaire. La taille de cette métropole et la complexité de sa morphologie sont très favorablement servies par l'échelle à laquelle cette source d'information permet de travailler. À un niveau plus fin, dans l'état actuel d'avancement de nos méthodes, l'imagerie HRV de SPOT ne permet cependant pas d'approfondir ou de réactualiser des recherches effectuées précédemment sur le terrain. Ainsi l'habitat sous-intégré, qui constitue un fait majeur de la dynamique des métropoles du Tiers monde, n'est pas identifié même par le biais de la superposition des modes multibande et panchromatique. Dans cette perspective, quelques pistes de recherche visant à combiner analyse texturale par opération de filtrage et morphologie mathématique (LAKE, 1991) sont en cours d'exploration.

À Coimbatore, le binôme espaces végétalisés/espaces artificialisés, constitue un facteur de différenciation spatiale essentiel. Cependant, l'une de nos étapes de travail mérite d'être rapportée ici. En effet, nous disposons pour Coimbatore d'une autre scène HRV (XS) du 21 avril 1993 non traitée ici. Or, cette image a montré un rendu très différent de notre acquisition plus récente [image HRV (XS) du 4 février 1994] présentée ici. Bien que toutes deux enregistrées pendant la saison d'hiver (temps clair dominant), l'image du 21 avril 1993 comprend de nombreux nuages (masquant certaines portions de l'espace urbanisé) mais affiche de plus nets contrastes entre zones végétalisées et zones bâties que l'image du 4 février 1994, sans nuage. Sans doute des averses préalables ont-elles opportunément accentué le contraste sur la première scène!

De façon plus générale, l'on se doit de souligner le grand intérêt de la superposition des images multibande et panchromatique pour l'analyse spatiale urbaine et la perspective, seulement ébauchée ici, en matière d'analyse comparative. La télédétection satellitaire, présente ainsi que le déclare F. Verger « l'avantage d'offrir une universalité d'acquisition qui permet des études comparées avec un même filtre dimensionnel », cette « universalité d'acquisition dans des conditions homogènes est un atout considérable » (POUYLLAU, 1991).

Conscients du potentiel offert par l'outil, nous nous orientons désormais vers l'élaboration d'une méthode d'analyse comparative des formes et dynamiques urbaines.

6. Références

BOURCIER, A. 1994. Télédétection et combinaison d'informations géographiques en mode image. Application à l'estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, Département de géographie, Université de Rouen, 421 p.

BOURCIER, A., VAGUET, O. et VAGUET, A. 1996a. Caractérisation et suivi de l'environnement urbain par imagerie SPOT; l'étude d'une métropole indienne : Hyderabad (Andhra Pradesh). Actes Marisy 95, Ifrane, Maroc, p. 383-387.

BOURCIER, A., VAGUET, O. et VAGUET, A. 1996b. Morphologie et dynamique urbaines à Coimbatore, Inde du Sud. Photo-Interprétation, vol. 34, n° 1, p. 23-28.

LAKE, L. A. 1991. Analyse des méthodes texturales appliquées au traitement des images. Essai, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 38 p.

LEJEUNE, J. C., BONN, F., ROUX, C. et ODOUX, B. 1987. Apport de l'information de texture à la segmentation des images du satellite SPOT en milieu urbain. I.E.E.E Compint 87, p. 173-177.

POUYLLAU, M. 1991. Télédétection et Tiers monde. CNRS-CEGET, Bordeaux, 395 p.

SCHAR, P. 1992. Capitalisme agraire et industrialisation rurale en Inde méridionale (étude de la région de Coimbatore, Tamil Nadu). Les cahiers d'Outre-Mer, Revue de géographie de Bordeaux, n° 178, p. 125-158.

VAGUET, O. et VAGUET, A. 1992. Une métropolisation sans drame : l'exemple de Coimbatore (Inde du Sud). Les cahiers d'Outre-Mer, Revue de géographie de Bordeaux, n° 178, p.107-124.

VAGUET, O. et VAGUET, A. 1993. Du bidonville à l'épidémie : la crise urbaine indienne à Hyderabad. Collection Espaces Tropicaux, n° 9, Éditions du CEGET/CNRS, Bordeaux, 240 p.

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

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 173-179

17

Étude de l'occupation du sol et de l'environnement à Cartagena (Colombie) à partir d'une image HRV (XS) de SPOT

JUAN FRANCISCO ABADIA, ANNE COLLIN DELAVAUD et JEAN-MICHEL EBERHARD

Institut des hautes études de l'Amérique latine, Université de Paris III, 28, rue Saint-Guillaume, 75007 Paris, France; téléphone : +33 (1) 44-39-86-70; télécopieur : +33 (1) 45-48-79-58

Résumé

Cartagena, ville portuaire de Colombie, offre l'exemple d'une étude préliminaire à une enquête de terrain sur l'occupation du sol et sur l'environnement, étude rendue possible grâce à l'imagerie satellitaire HRV (XS) de SPOT. Cette approche, combinant des traitements destinés à l'amélioration de l'image avec une interprétation visuelle, facilite le repérage des limites urbaines en fonction des divers milieux naturels et l'identification des quartiers dans la ville. Située entre mer et lagunes, sur d'étroites bandes de terres séparées par des chenaux, Cartagena connaît une croissance rapide dans des milieux naturels variés et fragilisés par les effets du développement urbain et industriel de ces dernières décennies.

1. Introduction

Pour favoriser l'approche globale d'une ville de plusieurs centaines de milliers d'habitants, le traitement d'une image satellitaire offre de puissants moyens de connaissance de l'occupation du sol, dans des délais rapides et à une échelle intéressante pour les urbanistes, les planificateurs et les décideurs. Cette source d'informations très riche pour l'observation de l'espace et de l'environnement est d'autant plus intéressante que la cartographie

régionale ou urbaine, dans les pays en voie de développement, est loin d'être complète ou actualisée régulièrement. En effet, les méthodes classiques (photo-interprétation et restitution) sont trop coûteuses en temps et en moyens financiers et ne permettent que des missions partielles étant donné l'étendue des agglomérations.

La ville de Cartagena, en Colombie, servira d'exemple à l'application de cette méthode, préliminaire aux études de terrain et qui facilitera le contact avec la réalité. Elle suggère les premières hypothèses de recherche. Avec plus de 610 000 habitants au recensement de 1991, la population de la ville a été multipliée, dans les quatre dernières décennies, par six, soit un gain de plus de 500 000 habitants. En conséquence, l'espace bâti s'est développé dans des proportions comparables, dans plusieurs directions de l'arrière-pays, composé de milieux littoraux et terrestres très divers. Cette forte dynamique a provoqué une dégradation accélérée de l'environnement encore mal connue aujourd'hui en l'absence d'informations traditionnelles. Dans ce contexte, l'image satellitaire (image multibande HRV de SPOT du 20-12-1990; mise à disposition par Yves Thomas du Laboratoire de géographie physique, URA 141 du CNRS) peut-elle aider à connaître et à comprendre l'espace urbain contemporain ? À Cartagena, le milieu naturel d'interface entre la mer des Caraïbes et la côte colombienne est exceptionnel par la variété de ses composantes : milieu marin, lagunes, longs cordons de plage reliant récifs coralliens, îles et presqu'îles.

Depuis plusieurs siècles, les hommes ont façonné ce décor pour implanter une ville à vocation défensive, tête de pont entre la métropole espagnole et les vastes territoires andins. Point d'arrivée et de départ des hommes et des marchandises, Cartagena a dû, dès ses origines, se protéger pour maintenir une prospérité convoitée par des corsaires agissant au profit d'autres puissances européennes (GUTIERREZ, 1992). De ce fait, ce premier port espagnol à vocation militaire sur le continent sud-américain, s'inscrit au cœur de tout un système défensif composé non seulement de remparts et de fossés, mais aussi d'une protection qui s'appuie sur le milieu maritime et lagunaire. Une muraille enserrant la ville a été achevée en 1778. Une citadelle, San Felipe de Bajararas, implantée au sommet d'une vaste colline, domine l'ensemble actuel et défend le seul accès terrestre (POMBO PAREJA, 1992). Unique dans l'art militaire, une muraille sous-marine, destinée à faire échouer les navires ennemis, relie la presqu'île de Bocagrande à l'île de Tierrabomba.

Ainsi, Cartagena s'est peu à peu bâtie sur une presqu'île séparant, d'une part, une vaste lagune, la Cienaga de Tesca et, d'autre part, la baie de Cartagena, plus vaste et plus ouverte sur la mer. Le développement urbain gagne depuis trente ans tous les espaces vides le long des chenaux et des lagunes ainsi que les zones marécageuses et les rares collines. La ville connaît aussi deux vocations contradictoires : le développement industriel avec une raffinerie et une entreprise de pétrochimie implantées sur les rives méridionales de la baie et un essor touristique sur les arcs sableux de bordure de mer. En malmenant rudement paysages et ressources naturelles, ces deux activités remettent aussi en question l'avenir de l'ensemble urbain de Cartagena.

2. Méthodologie

L'objectif proposé est d'analyser un espace urbain à partir d'une image satellitaire HRV (XS) de SPOT du 20-12-1990 de façon à faciliter et à rendre plus efficace l'enquête de terrain en l'absence de données cartographiques et d'études contemporaines. En effet, seule l'évolution ancienne peut être étudiée, grâce à des documents sur l'histoire de la ville du XVI^{e} au XVIII^{e} siècle. Repérer l'extension de la ville, délimiter les secteurs bâtis et le non-bâti, observer la concentration urbaine, le mitage périphérique et les espaces végétalisés

amènent à se poser de nombreuses questions sur les relations entre l'homme et le milieu. Cette approche s'avère indispensable pour aborder la ville dans sa totalité grâce à une seule image.

Nous avons cherché à montrer que l'utilisation de méthodes simples peut apporter une grande quantité d'informations intéressantes, même pour le non-spécialiste en traitement d'image. Nous nous appuierons essentiellement sur trois néo-canaux : 1) une composition colorée (fig. 17-1, voir cahier couleur) produite à partir des canaux bruts; pour assurer une bonne dynamique et un bon équilibre entre les trois canaux pour la composition des couleurs, nous avons déterminé les bornes min-max en tenant compte de la distribution statistique des pixels selon leur niveau de gris; la borne minimum correspond à la fréquence cumulée égale à 1 % des effectifs et la borne maximum à 99 % des effectifs (EBERHARD, 1994); 2) une image classée en 10 classes radiométriques (fig. 17-2, voir cahier couleur) produite par la méthode non dirigée des nuées dynamiques; ce document correspond à une seconde étape de traitement; il est issu d'une image présentant 21 classes dont on a regroupé certains thèmes (en particulier les classes de végétation) au cours d'une première analyse visuelle (la formule $n = 5 \log N$, donnant le nombre optimal n de classes en fonction de la taille N de l'échantillon); 3) une deuxième composition colorée, intégrant les canaux bruts 2 et 3 de HRV et l'image résultant du calcul d'un laplacien appliqué sur le canal 2 (fig. 17-3, voir cahier couleur); on a attribué les trois couleurs dans l'ordre : bleu au XS2, vert au laplacien de XS2 et rouge au XS3.

Ces trois documents apportent chacun une information particulière essentielle à l'interprétation visuelle d'une image urbaine : 1) la composition colorée des canaux bruts présente une information sur la texture de l'image tout en conservant une information radiométrique, ces deux types d'information pouvant être associés; 2) l'image classée résume l'information radiométrique et propose une information sur la nature des surfaces; 3) la composition colorée intégrant le filtre laplacien souligne les contours et facilite l'étude des structures urbaines, en particulier le maillage de la voirie.

La superposition d'un plan de ville recalé à l'image classée a également contribué à faciliter, au pixel près, l'identification des espaces bâtis, des équipements, du réseau de voirie, etc.

L'amélioration de l'image permet une interprétation visuelle plus rapide et plus efficace (DUREAU et WEBER, 1995) qui aboutit à la réalisation d'un croquis de lecture aisée pour des décideurs et des responsables peu habitués à « lire une image ». Le croquis sur l'occupation du sol obtenu ici synthétise en quelque sorte l'ensemble des travaux de télédétection. Il rend possible une comparaison entre des villes notamment celles étudiées à l'Institut des hautes études d'Amérique latine : Rio de Janeiro, Mexico, Bogota, Neuquen, Buenos Aires, etc. (IHEAL - IAURIF - CNES, 1994).

3. Analyse et interprétation des données

Le croquis d'interprétation (fig. 17-4, voir cahier couleur) présente une synthèse de l'interprétation des documents satellitaires. Il s'agit d'une carte de l'occupation du sol à la date du 20 décembre 1990, établie pour l'enquête de terrain mais à partir de laquelle on peut d'ores et déjà extraire quelques grands caractères urbains.

3.1. Analyse de la composition colorée et de l'image classée

Trois grands milieux se dessinent nettement : 1) le milieu marin apparaît en surfaces homogènes de couleur bleu foncé; la classification mettra en évidence une très grande diversité d'états de la surface marine et lacustre en fonction de la profondeur, de la salinité, de la turbidité, des courants et de la pollution; la dégradation du milieu lagunaire (fig. 17-1, voir cahier couleur) est due au déversement du canal del Dique, situé dans le sud de la baie de Cartagena, au-delà de Mamonal; ce canal, long de près de 150 km, a été construit au XVI[e] siècle, à partir de cours d'eau secondaires, pour assurer la jonction entre le fleuve Magdalena, qui draine toute la Colombie centrale et septentrionale, et le port de Cartagena; 2) les milieux naturels ou ruraux présentent deux grands secteurs mis en évidence par deux types de couleur rouge : au nord, le secteur de contact de la Cienaga de Tesca avec l'arrière-pays partiellement inondé, développant des contours irréguliers et au sud et au sud-ouest, de vastes zones planes mais d'altitude plus élevée, où se développent quelques secteurs agricoles parmi les pâturages et les zones boisées; 3) le milieu urbain apparaît en couleurs brune, beige et bleu-clair; épousant les contours littoraux et les îles, il se localise essentiellement sur la presqu'île centrale qui forme une zone de contact entre les milieux marin, lagunaire et terrestre; le bâti se prolonge sur la rive orientale de la baie.

3.2. Des quartiers très marqués par la géomorphologie littorale

Sur les néo-canaux, le secteur urbanisé ne se distingue pas seulement par les couleurs ou les types de classes radiométriques, mais également par l'agencement spatial de celles-ci et les formes qu'elles présentent. L'analyse visuelle de ce document, jointe à celle de la composition colorée (fig. 17-1, voir cahier couleur) et de l'image classée (fig. 17-2, voir cahier couleur), rend possible la délimitation de plusieurs grands types de quartiers. Elle permet de retrouver certains éléments des paysages urbains et les facteurs qui interviennent dans leur configuration : conditions naturelles, évolution historique, morphologie urbaine, occupation du sol, etc. Du centre historique aux quartiers périphériques plus récents, on observe plusieurs grands ensembles d'espaces urbains bien individualisés, en partie par la géomorphologie littorale.

Le centre historique (San Diego-Getsemani) apparaît clairement sur l'ensemble des néo-canaux, en vert foncé sur la composition colorée, et dans la classe 2 de la classification. La forme générale de cette zone sur l'image correspond bien à celle délimitée par les remparts de l'ancienne citadelle. La structure du réseau de voirie en damier irrégulier n'apparaît pas sur les images du fait de l'étroitesse des rues. Les bâtiments anciens, de deux ou trois étages, aux toits de vieilles tuiles, aux *patios* intérieurs, offrent un paysage de forte densité urbaine, unique à Cartagena. Cette densité est classique dans le centre des villes anciennes de l'Amérique latine.

L'absence de couleur rouge sur la composition colorée et l'absence de classe radiométrique représentative indiquent l'absence quasi totale de végétation, dans ce centre historique au bâti serré. De petites surfaces et des linéaments bleus clairs correspondent aux installations portuaires et défensives (murailles) qui ceinturent le centre historique.

Cette même densité se retrouve dans l'extension du XIX[e] siècle, dans l'île de Manga et dans le sud de la presqu'île, séparées l'une de l'autre par un chenal. L'aspect général de ce secteur ressemble au précédent mais avec une plus forte présence de rouge. Nous sommes donc en présence d'une morphologie urbaine proche du centre historique, également sans aucune structure de voirie visible sur les images, mais avec davantage de végétation, notamment le gazon de jardins de petite taille. Au nord de ce secteur, une vaste tache rouge,

homogène mais aux contours irréguliers, frappe la surface tramée brune; il s'agit du Cerro de la Popa, petit relief boisé conservé en espace vert, dont la base est localement envahie de constructions.

Au contraire, vers le sud, la presqu'île de Bocagrande est totalement occupée par des quartiers à vocation touristique. Sur les images, ce secteur revêt une apparence très semblable à celle des quartiers anciens, bien qu'il soit de création récente. Le contraste des paysages explique l'aspect hétérogène du secteur correspondant sur l'image : immeubles à étages dispersés dans des zones de résidences individuelles d'un certain standing. La végétation arborée, relativement abondante, masque en partie les rues étroites, efface sur l'image l'essentiel du réseau viaire, renforce les contrastes locaux et, donc, la ressemblance avec les quartiers anciens sur les documents satellitaires.

L'urbanisation s'est prolongée sur la côte est de la baie, avec un type d'urbanisation fort semblable à celui des extensions du XIX^{e} siècle. Celle-ci correspond à des quartiers de bâti consolidé, entre les secteurs d'El Bosque et de Ceballos. Face au front de mer, on distingue nettement la presqu'île de Manzanillo qui abrite certaines institutions militaires (École navale). Elles sont repérables sur l'image par les caractéristiques de leur aménagement : vastes espaces verts constitués de plantations arborées déjà anciennes dont l'ombre ample cache en partie les bâtiments utilitaires de grand volume.

Les extensions récentes de la deuxième moitié du XX^{e} siècle, vers le nord et vers l'est, se caractérisent sur la composition colorée par des couleurs marron et, sur l'image classée, par la forte représentation des classes 3 et 5. Ces vastes quartiers se détachent par leur structuration très marquée constituant des trames réticulaires qui correspondent au dessin en damier des rues. Cette structure est fréquente dans les périphéries modernes d'Amérique latine où l'espace est découpé en lots standards occupés par un habitat qui se consolide progressivement au fil des années. Les secteurs les plus récents (extrémités est et sud-est de l'agglomération : Educador, Simon Bolivar, Medellin, Granada, Fredonia) se caractérisent donc par une forte proportion de constructions totalement ou partiellement précaires (voir plus loin). La disparition locale de la végétation et sa survie sous forme de lambeaux éparpillés, laissent place à un sol dégradé du fait des passages fréquents de la population et des véhicules, et des activités diverses (couleurs brunes sur la composition colorée).

La rive de contact de la Cienaga de Tesca avec la zone urbaine de la presqu'île, se signale, sur la composition colorée, par un cordon plus clair à l'ouest, strié nord-sud, qui cède la place à l'est à un secteur plus rouge (Republica Ricaurte). Sur l'image classée, la plus forte présence des classes 1 et 2 rappelle les structures d'image correspondant aux quartiers anciens décrits ci-dessus. Il s'agit des extensions les plus récentes où la ville et les hommes disputent l'espace à la lagune, à l'eau et à la végétation. Ces quartiers se constituent à partir d'avancées de terre, pratiquées dans la lagune en prolongement des rues existantes (linéaments nord-sud sur l'image). Sur ces supports, des maisons de bois se dressent, serrées les unes contre les autres, habitat précaire occupé par une population très démunie. La limite de l'expansion urbaine est ici déterminée par la stabilité de ces secteurs vaseux de bordure de lagune en cours de colmatage. À l'est de cette bande, le secteur reste inoccupé du fait de la trop grande abondance en eau et donc de l'instabilité du sol.

3.3. Bordures est et sud de l'agglomération

Si la limite nord-sud de l'agglomération montre une rupture nette entre les milieux urbains et lagunaires, la périphérie est et sud ne présente pas de frontière précise. Les deux compositions colorées, davantage que l'image classée, montrent en effet : 1) dans le sud, des faisceaux de linéaments orientés nord-sud, de couleur marron, contrastant bien avec le

fond rouge vif; 2) à l'est, une mosaïque de formes géométriques rectangulaires marron alternant avec des formes rouges.

Ces deux configurations correspondent à deux démarches d'urbanisation différentes. Dans le premier cas, il s'agit d'une « urbanisation fourmi », dans les secteurs de Fredonia et de Granada, caractérisée par des alignements plus ou moins parallèles de constructions qui se placent empiriquement les unes à côté des autres. Dans le deuxième cas, l'espace rural cède à la pression urbaine par parcelle, de manière non contiguë, de telle sorte que des surfaces agricoles subsistent quelques temps entre les pâtés de maisons. La densité de parcelles non bâties diminue vers l'intérieur de l'agglomération comme le montre la rareté des rectangles rouges dans la partie correspondante de la composition colorée.

Dans le centre sud de l'agglomération, une vaste étendue en forme de U, de couleurs bleues et blanches sur la composition colorée, montre le secteur de Poligone Ceballos, villa Caracoles, à la végétation décimée et au sol dégradé. L'irrégularité de la texture d'image (pointillés, pixels isolés, etc.) traduit un paysage au sol constitué de petits éléments éparpillés, caractéristiques de la forme d'urbanisation extensive de création de quartier.

Tout au long de la baie de Cartagena s'étalent vers le sud des zones d'occupation très diverses. À côté des hameaux de pêcheurs et des collecteurs de coquillages dans la mangrove, alternent des petits lotissements et des espaces à vocation industrielle et portuaire. Depuis Albornoz, qui jouxte la ville à son extrémité sud, l'espace bâti est discontinu et limité à une étroite frange littorale de tracé irrégulier; cet espace est constitué d'établissements spontanés qui envahissent les pentes du cerro Albornoz. Plus au sud encore, du secteur Mamonal à Pasacaballos, on observe une série de vastes formes géométriques sur l'image qui montrent les nombreux établissements industriels, en particulier une raffinerie de pétrole avec sa zone de réservoirs, les installations d'une entreprise de pétrochimie et un vaste bassin rectangulaire de décantation. Pasacaballos apparaît comme l'ultime noyau urbain de cet ensemble dispersé sur près de 20 km.

4. Conclusion

Grâce à l'imagerie satellitaire, il nous a été possible d'obtenir une approche globale de la ville de Cartagena permettant de comprendre le développement de l'agglomération sur une zone de contact où se chevauchent milieu marin et milieu terrestre. Les espaces bâtis ont gagné progressivement les espaces naturels à la fois les plus faciles à urbaniser mais aussi les plus proches. Peu à peu, les zones intermédiaires ont été conquises même lorsque les conditions n'étaient pas favorables car la proximité avec la ville devenait déterminante. Ainsi s'explique l'occupation depuis dix ans de la bordure de la Cienaga de Tesca et de la zone marécageuse de Ceballos. L'image satellitaire facilite la connaissance de ces nouvelles zones en cours de construction qui offrent un paysage confus par opposition aux secteurs consolidés.

L'image permet en outre de constater que les surfaces en cours de construction présentent une extension nettement plus importante dans le sud, sur les rives de la baie, que sur les franges de l'agglomération. La pression urbaine s'exerce donc de manière plus forte sur les sites d'Albornoz et de Mamonal, qui peuvent utiliser les voies maritimes pour développer d'importantes activités industrielles.

En l'absence de documentation sur les usages du sol et leur évolution, le recours à l'analyse d'autres images est indispensable pour mettre en évidence avec plus de précision cette constatation non seulement sur les lieux de la dynamique urbaine mais aussi sur le laps de temps nécessaire pour qu'un espace naturel lagunaire mal consolidé devienne partie

intégrante d'une grande ville. La disparition des vides de l'espace interne et l'augmentation des densités du bâti seraient également des éléments de dynamique urbaine à étudier pour comprendre les bouleversements de Cartagena en cette fin de XX^{e} siècle.

L'analyse de l'image a préparé l'enquête de terrain en permettant de poser quelques grandes questions sur les relations entre la ville et son milieu, sur les types d'occupation du sol et sur les zones de croissance. Elle fait gagner ainsi beaucoup de temps lors de la validation sur le terrain. L'intégration à l'étude d'autres données exogènes aboutira à délimiter avec plus de précision des unités paysagères, voire « des écosystèmes urbains » (LENCO, 1996) rapidement décrits ici à Cartagena.

Ces observations obtenues par l'étude satellitaire entrent dans un programme de recherche sur les dynamiques spatiales des villes d'Amérique latine. Une nomenclature adaptée, déjà utilisée dans une étude portant sur 10 villes d'Amérique latine (IHEAL - IAURIF - CNES, 1994), est en cours d'élaboration pour faciliter la comparaison des villes entre elles et mettre en évidence les modes d'occupation du sol dans le contexte particulier de cette fin du XX^{e} siècle où l'urbanisation a été exceptionnellement rapide.

5. Références

DUREAU, F. et WEBER, C. 1995. Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Economica, Paris, 375 p.

EBERHARD, J.-M. 1994. Urbanisation et développement urbain du sud-est de l'agglomération de Mexico entre 1986 et 1989.– Étude à l'aide de l'imagerie SPOT. Thèse de doctorat de géographie. École des hautes études en sciences sociales, Paris, 615 p.

GUTIERREZ, R. 1992. La ciudad de Cartagena de Indias. La ciudad iberoamericana, Generalitat Valenciana, Artes Graficas Soler S.A. Valencia, p. 119-131.

IHEAL - IAURIF - CNES (Institut des hautes études d'Amérique latine – Institut d'aménagement urbain de la région Ile-de-France – Centre national des études spatiales). 1994. Images des villes d'Amérique latine. Paris, 45 p.

LENCO, M. 1996. Étude par télédétection des écosystèmes des agglomérations françaises.– La cartographie urbaine aujourd'hui. Cahiers du CREPIF, n° 54, p. 99-114.

POMBO PAREJA, A. 1992. La cuadricula en la ciudad hispanoamericana - Cartagena de Indias, Colombia. Universidad Jorge Tadeo Lozano, seccional del Caribe. Cartagena, 33 p.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p.181-190

18

Utilisation des données de télédétection satellitaires multisources et multibandes ainsi que des photographies aériennes pour l'étude des milieux urbain et périurbain à Bucarest (Roumanie)

FLOREA ZAVOIANU [1], CALIN NITU [2] et CATALIN NEDELCU [1]

[1] *Universitatea tehnica de constructii Bucuresti, Laboratorul de fotogrammetrie si teledetectie, B-dul Lacul Tei Nr.124, sectorul 2, 72302 Bucuresti 38, Roumanie; téléphone : +40 (1) 240-73-80 (poste 292); télécopieur : +40 (1) 312-77-80*

[2] *Directia topografica militara, B-dul 1 Mai Nr.124-126, sectorul 1,78219 Bucuresti, Roumanie; téléphone : +40 (1) 666-46-85*

Résumé

Dans ce travail, on résume les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre d'une étude visant à analyser l'espace urbain par l'utilisation des données satellitaires et des photographies aériennes pour la détection des changements dans l'évolution de la zone urbaine et périurbaine de la ville de Bucarest. Pour cette étude des cartes historiques et des cartes actuelles ont été consultées; nous avons aussi utilisé des images satellitaires MSS et TM de Landsat et les clichés HRV de SPOT de différentes dates, de même que des photographies aériennes. Les changements ont été détectés par comparaison classifiée des données de MSS et de TM de Landsat. Le cliché HRV a été transformé par redressement au 1: 100 000 et les agrandissements obtenus ont été photo-interprétés. La dynamique urbaine a été représentée sur la carte au 1: 100 000. Les photographies aériennes numérisées ont été normalisées. Après l'amélioration par filtrage, les limites ont été extraites par la transformée de Hough. Les lignes polygonales ont été vectorisées en utilisant la transformation Ψ - S et utilisées pour l'actualisation de la base géométrique du système d'information du

territoire (SIT). Pour optimiser la classification, l'utilisation de la réalité de terrain permet de visualiser les changements pour les intervalles de temps donnés de façon efficace et rapide.

1. Introduction

Une analyse globale de l'espace urbain en ce qui concerne la dynamique, les directions de développement, la surveillance de la pollution, etc. peut être faite efficacement à partir de données satellitaires. Les possibilités offertes par ces données pour l'établissement et l'actualisation des cartes topographiques et thématiques sont bien confirmées. Les études expérimentales déjà effectuées dans ce domaine, de même que la présente étude essaient d'adapter aux conditions locales et au logiciel disponible, la méthodologie de traitement de ce type de données pour répondre aux besoins locaux de façon efficace et rapide.

2. Objectif

Pour l'élaboration du plan général (PGU) ou du plan zonal d'urbanisation (PZU), il faut tenir compte de la situation actuelle, des directions et des possibilités de développement de la ville. Dans ce but, on a créé un SIT pour la zone urbaine et périurbaine. L'objectif de cette étude est d'analyser les possibilités d'enregistrement de la télédétection satellitaire pour distinguer la dynamique urbaine dans le cadre d'un SIT.

3. Documents de base

Nous avons décidé d'utiliser les sources d'informations suivantes : 1) des cartes topographiques au 1: 25 000, au 1: 50 000 et au 1: 100 000 de 1963 et des plans cadastraux établis directement sur le terrain par les géomètres; 2) les enregistrements MSS du 5 juin 1978 et TM de 1988 à partir desquels nous avons extrait des fenêtres de la zone d'intérêt; 3) l'enregistrement HRV (P) de SPOT du 1er juillet 1990; les données numériques n'étaient pas disponibles et nous avons utilisé le cliché de cette image; 4) les photographies aériennes de 1994 à l'échelle d'environ 1: 6 000; 5) les données d'urbanisme en ce qui concerne l'aménagement urbain et périurbain relatif à l'emplacement des industries, des zones vertes, etc; 6) les travaux de terrain ont été effectués pour la photo-interprétation du cliché HRV agrandi.

4. Traitement des données

Les possibilités d'utilisation des données de télédétection pour l'urbanisme sont montrées par RIDD et DUDLEY-MURPHY (1992). De nombreuses études ont été faites sur l'analyse de la teneur en information du pixel dans ce domaine.

Cette étude essaie d'apporter une information utile dans les projets PGU et PZU par la mise en évidence de la dynamique urbaine, des directions d'extension de la zone construite, en utilisant les données MSS et TM de Landsat et HRV de SPOT.

4.1. Traitement des données MSS

De l'image MSS de 1978, on a sélectionné une fenêtre de 627 x 507 pixels. Le traitement a été fait en utilisant les logiciels ERDAS et EASI/PACE. On a effectué un prétraitement concernant les corrections de « lignage », le renforcement radiométrique de l'image et un rééchantillonnage par interpolation linéaire à 30 m pour la comparaison avec TM. Pour la superposition avec la carte au 1: 100 000, 26 points ont été identifiés sur la carte au 1: 25 000 et utilisés pour la transformation définitive. Avec les transformations polynomiales de premier, deuxième et troisième ordre, les erreurs moyennes quadratiques de 0,69, 0,68 et 0,48 pixels ont été obtenues. La dernière transformation a été retenue pour le calcul de l'image transformée faite par interpolation linéaire. Les principaux éléments de la carte au 1: 100 000 ont été numérisés et superposés sur l'image transformée pour la vérification. Pour la réduction des données, on a calculé la transformation en composantes principales à partir des bandes 1 et 2 et on a retenu la première composante de celles-ci avec les bandes 3 et 4 (CZERANKA, 1992) pour la classification dirigée par maximum de vraisemblance qui a été faite.

4.2. Traitement des données TM

De l'image TM de 1988, une fenêtre de 700 x 700 pixels a été retenue. Dans la partie SE de l'image, il y a un recouvrement des nuages situés à la limite de la zone d'intérêt. Pour le recalage de l'image TM avec la carte au 1: 100 000, ont été utilisés les mêmes points d'appui que pour l'image MSS. Après la transformation polynomiale, on a obtenu une erreur moyenne quadratique de 0,43 pixels. La réduction du volume des données TM a été faite par la transformation en composantes principales. Pour les trois premiers plans d'image et pour les bandes 5 et 7, on a calculé les composantes principales dont le premier plan a été retenu qui avec la bande 4 ont été utilisés pour la classification. Pour détecter les changements entre les deux groupes de données, on a choisi la comparaison des images classifiées. Les données MSS et TM ont été classifiées distinctement, pour chaque groupe en utilisant les mêmes classes par la combinaison dirigée des classes. Les classes suivantes ont été retenues : zone dense construite, zone construite, plans d'eau, forêt et espace vert (fig.1). Les changements de classes entre les deux groupes de données ont été reclassifiés dans les bandes MSS en tenant compte des résultats obtenus avec TM. Pour les données TM et les classes retenues le pourcentage de pixels bien classés est compris entre 90 % et 93 %. La vérification finale a été faite sur la base de la réalité de terrain obtenue par photo-interprétation. Les résultats sont donnés sur le tableau 1. Il faut signaler qu'entre les deux classes représentant la zone construite (la première d'habitat collectif, de blocs et la deuxième de logements individuels) il y a des confusions. En général, il y a une surestimation de la zone construite au détriment du terrain à d'autres affectations.

4.3. Traitement des données HRV

Le reproduction sur film de HRV (P) de SPOT couvre la région du Nord de Bucarest. Le film en noir et blanc en mode panchromatique a un pixel de 10 x 10 m. Pour la photo-interprétation, le film a été transformé par redressement à l'échelle du 1: 100 000. Pour cette opération, on a utilisé un redresseur de type Rectimat. Les points d'appui ont été identifiés sur le cliché et sur la carte au 1: 100 000. Les cinq éléments indépendants du redresseur (les angles de basculement autour des axes x et y de la table de projection, les

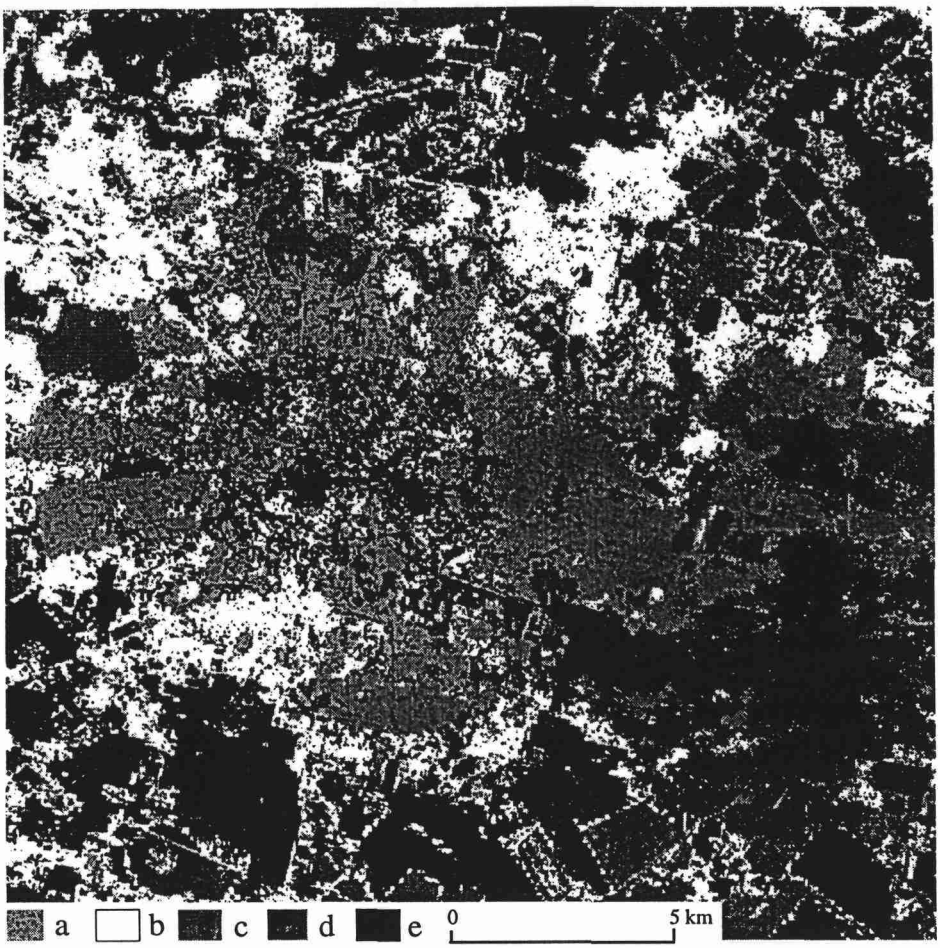


Figure 1. Image TM classifiée : a) la zone dense construite; b) la zone construite; c) les surfaces d'eau; d) forêts et espace vert; e) chantiers existants

translations du négatif en x et y et l'échelle) ont été calculés à l'aide d'un programme. Cette opération n'aurait pas été nécessaire si on avait disposé d'une carte à jour. Du cliché agrandi, on a retenu la zone d'intérêt dans un but de photo-interprétation (CARBONNELL, 1990). Sur le terrain ont été identifiés les différents types de constructions, les zones industrielles, les zones vertes et les forêts, etc. Les résultats de la photo-interprétation concernant les limites des différentes classes ont été retenus pour la classification des données TM.

4.4. Travaux sur le terrain

Les travaux sur le terrain ont été exécutés pour l'identification des différentes classes et des limites des zones urbaines afin de compléter la photo-interprétation des photographies aériennes faite à l'interprétoscope. Les résultats ont été reportés sur la carte au 1: 50 000 pour la numérisation et le calcul de surfaces, en vue d'établir la dynamique urbaine.

Tableau 1. Évolution de la zone urbaine

Classes d'occupation du sol			Surfaces totales (ha)			
1978	1988	1990	Classe	1 978	1 988	1 990
A	A	A	A	1 327	1 542	1 542
F	F	F	F	1 991	1 960	1 910
ZC	A	A	ZC	4 698	3 944	3 114
ZDC	ZDC	ZDC	ZDC	5 352	6 732	5 527
O	O	O	ZI	-	-	2 295
O	O	ZDC	Extension de la zone urbaine			
O	ZDC	ZDC	1978-1988		1988-1990	
O	ZC	ZC	Extension urbaine			
O	O	ZC	840 ha – 6,3 %		210 ha – 3,8 %	
			Reconstruction urbaine			
			1 978 ha – 4,2 %		1 240 ha – 22,4 %	
			Rythme annuel			
			3,7 % / année		13,1 % / année	

A : surfaces d'eau;
F : forêts et zones vertes;
ZDC : zone dense construite;
ZI : zone industrielle;
ZC : zone construite;
O : autres affectations

5. Analyse des résultats

La comparaison des images classées et la représentation de celles-ci sur la carte ont permis la mise en évidence de la dynamique urbaine. Les données MSS ont été utilisées pour représenter la situation de départ, existante en 1978 (COULOMBE et SEUTHÉ, 1993). Les données TM classées sur lesquelles a été superposée cette situation permettent l'identification de changements effectifs entre 1978 et 1988 (fig. 2). Les zones d'incertitude sont situées dans les quartiers d'habitation résidentiels où les arbres couvrent les maisons dispersées. Une partie des changements de classes est due aux démolitions et aux reconstructions sur de grandes superficies, dans le but de l'extension de la zone industrielle ou pour la construction d'habitations collectives. Le développement de la ville a été fait selon un mode radial. Les zones industrielles qui, à un moment donné, étaient à la limite de la zone construite, sont aujourd'hui englobées dans les nouveaux ensembles d'habitation. Les nouveaux ensembles d'habitation conçus et exécutés dans la période analysée, comme Aviatiei au nord de la ville et Berceni Sud, ont été élevés sur l'emplacement d'anciennes constructions démolies. Les espaces verts n'ont pas subi de grandes transformations pour la période analysée. Les plans d'eau ont été agrandis par la réalisation, en amont de Bucarest, sur la rivière Dâmbovita, d'un barrage et d'un lac au détriment de la zone

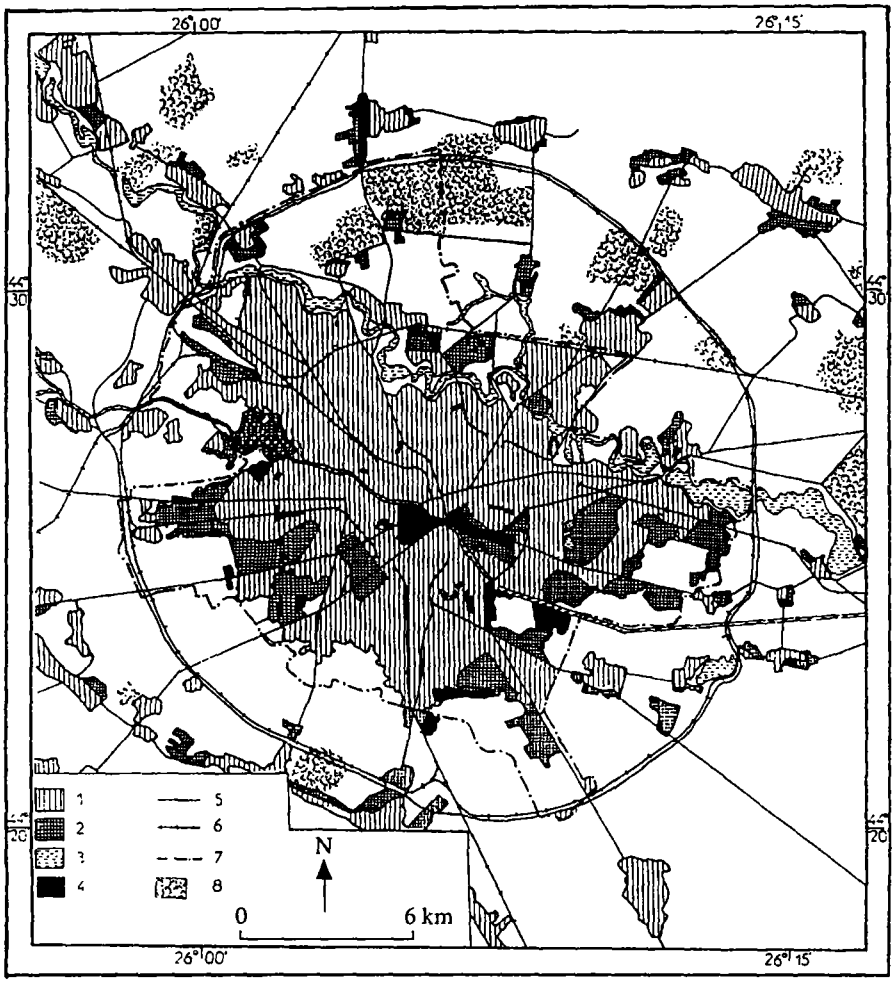


Figure 2. Développement urbain de la ville de Bucarest de 1978 à1990 (d'après MSS 1978, TM 1988 et HRV 1990) : 1) zone urbaine en 1978; 2) zone de développement de 1978 à 1988; 3) plans d'eau; 4) zone de développement de 1988 à1990; 5) routes principales; 6) chemins de fer; 7) limites administratives; 8) forêts

construite qui a été démolie. La surface couverte par la zone urbaine étudiée pour la période de 1978 à 1988 est d'environ 840 ha et, pour la période de 1988 à 1990 est d'environ 210 ha.

Le développement s'est fait radialement avec des proportions identiques dans les six secteurs administratifs. Des transformations profondes ont eu lieu dans le domaine du patrimoine architectural et des monuments historiques avec la politique de systématisation pratiquée en ce temps-là. Ces types de changements n'ont pas été mis en évidence. Le développement des localités périurbaines s'est fait en mode planifié dans des zones destinées aux nouveaux quartiers. Pour les périodes de 1978 à 1988 et de 1988 à 1990, 359 ha et respectivement 65 ha sont occupés par de nouvelles constructions dans la zone d'étude. Les villages démolis avant 1989 sont en voie de reconstruction sur les anciens sites.

6. Utilisation des photographies aériennes

Les photographies aériennes numérisées sont utilisées pour la création et l'actualisation de la base géométrique d'un SIT urbain. Les images numérisées sont exploitées automatiquement.

6.1. Prétraitement des images numérisées

Il s'agit des corrections géométriques, de la création de l'image normalisée dans le cas d'un cliché isolé ou de deux images dans le cas de l'exploitation stéréoscopique. Dans cette étape, on effectue un filtrage radiométrique et des opérations de renforcement des lignes et des limites ou binarisation des images.

6.1.1. Corrections géométriques

Il faut appliquer les corrections suivantes aux photographies numérisées : la déformation du support d'émulsion, la distorsion de l'objectif de la chambre de prise de vue, la réfraction atmosphérique, la courbure de la Terre (KRAUS, 1993) et la correction de la distorsion du système de numérisation.

6.1.2. Création de l'image normalisée

Les images normalisées sont les images qui ont été obtenues par orientation absolue. Dans le cas de deux images, elles ont seulement une parallaxe longitudinale dans les images normalisées (KRAUS, 1993). Pour la création d'une telle image, il faut connaître les éléments d'orientation Xo, Yo, Zo (les coordonnées du centre de projection dans le système de référence) et les angles K (déversement), Φ (convergence) et Ω (site). Ces éléments peuvent être déterminés à l'aide de points d'appui dont les coordonnées sont connues dans l'espace de l'image et dans l'espace de l'objet. Les formes linéaires correspondantes, connues aussi dans les deux espaces (STRUNZ, 1992), peuvent être utilisées pour la détermination de ces éléments. Après l'application des corrections énumérées ci-dessus et après le calcul des éléments d'orientation en utilisant une transformation par colinéarité, on passe à la formation de l'image normalisée par rééchantillonnage linéaire ou cubique. Dans le cas d'un couple d'images pour la création des images normalisées, il faut tenir compte des composantes de la base de prélèvement (WOOSUG and SCHENK, 1992) en considérant connus les éléments d'orientation absolue des deux images. Pour l'interprétation automatique et l'exploitation des couples d'images numérisées et normalisées par des méthodes stéréoscopiques, on utilise la corrélation sur les lignes épipolaires.

6.1.3. Renforcement, identification et extraction des formes linéaires de l'image numérisée

L'amélioration des images est effectuée par filtrage avec des filtres mettant en relief les formes linéaires. On utilise les filtres laplaciens, où les valeurs de la matrice de convolution sont déterminées sur des bases statistiques (BONN et ROCHON, 1992). L'identification des limites dans l'image numérisée peut être faite directement à l'aide des algorithmes unidimensionnels ou bidimensionnels de manière séquentielle avec des éléments de contrôle, par exemple le nombre de pas recherché, la longueur de la ligne, etc. (PAVLIDIS, 1984). L'extraction des formes linéaires de l'image normalisée en utilisant un SIT de

référence peut être faite à l'aide d'une base de connaissances sur l'espace-objet. Les limites correspondantes de la base de données géométriques du SIT seront extraites et reportées sur l'image à partir des éléments connus : le point final, le point initial, la longueur de la ligne, etc. Cette projection va créer une région de recherche dans laquelle la limite sera identifiée et extraite. Pour l'extraction, la transformée de Hough (DUDA and HART, 1973) est utilisée. En considérant une valeur d'un seuil T, les éléments connexes de la ligne seront éliminés. Les lignes du contour polygonal ont été vectorisées en utilisant la transformation Ψ - S décrite par GREENFELD et SHENK (1989). La vérification des formes linéaires extraites de l'image (fig. 3d) peut être faite par comparaison avec sa correspondante extraite de la base de connaissances sur l'espace-objet (fig. 3c), dans le cas d'une image isolée, ou en rapport avec sa correspondante extraite de la deuxième image du couple, sur un test de similarité, en cas d'exploitation stéréoscopique.

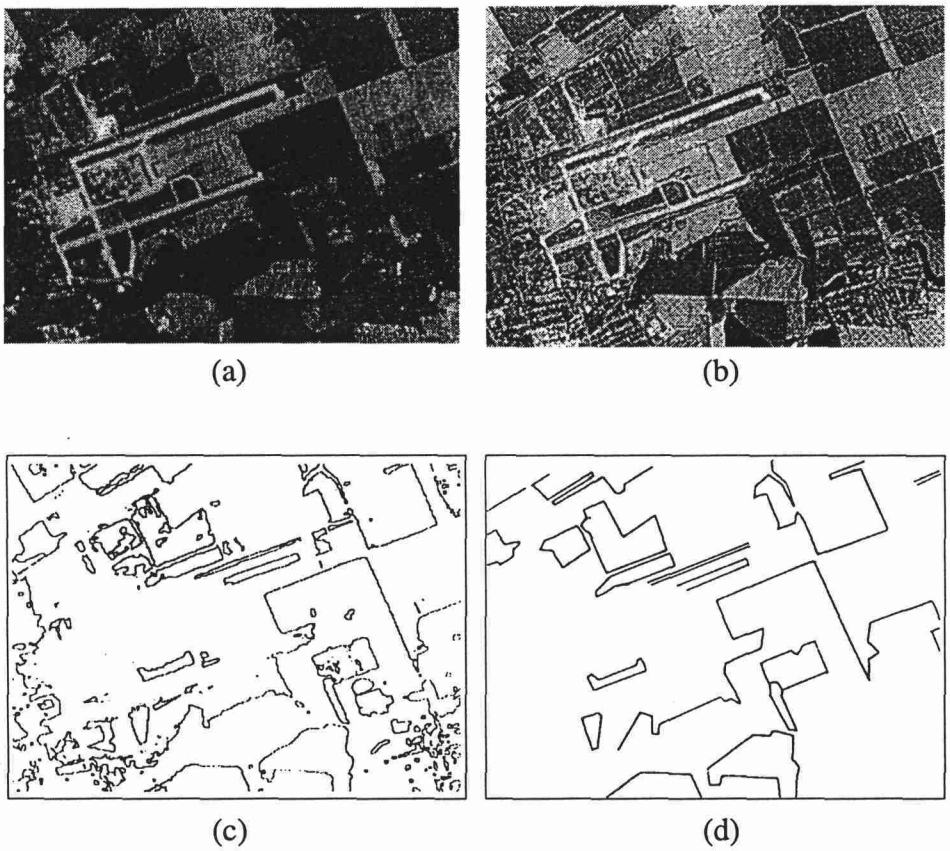


Figure 3. Extractions des formes linéaires de l'image numérisée : a) image originale; b) image améliorée par filtrage; c) formes linéaires; d) formes linéaires extraites

7. Conclusion

Pour la ville de Bucarest, un SIT urbain est en train d'être créé. Les principales sources d'informations sont les enregistrements de télédétection et les photographies aériennes. Cette étude confirme les avantages d'utilisation, pour de grandes surfaces, des données de télédétection pour la création de la base géométrique du SIT de façon efficace et rapide. Les données satellitaires doivent être complétées avec des sources complémentaires d'information et le traitement de ces données doit être fait en concordance avec la réalité de terrain. Pour l'analyse plus détaillée, les photographies aériennes numérisées constituent une base pour prélever les informations nécessaires à la mise à jour de la base géométrique d'un SIT urbain.

Les technologies de télédétection dans notre étude répondent aux nécessités pratiques suivantes : 1) collecte de grands volumes de données; 2) élaboration d'études concernant l'occupation du sol, l'emplacement d'industries, voies de communication, etc; 3) mise au point du support technique pour les solutions concernant la conservation, la reconstruction ou le développement des zones urbaine et périurbaine.

L'analyse de l'espace urbain doit être effectuée périodiquement à l'aide de données satellitaires intégrées dans un SIT urbain. Nos prochaines préoccupations seront orientées vers l'insertion des images KVR-1000 dans le SIT et l'utilisation de la dimension multispectrale des données TM de Landsat et HRV (XS) de SPOT en vue de dresser la carte du biotope de la zone urbaine et de la zone périurbaine de la ville de Bucarest.

8. Références

BONN, F. et ROCHON, G. 1992. Précis de télédétection – Volume 1 : Principes et méthodes. AUPELF/Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, 485 p.

CARBONNELL, M. 1990. Essai d'utilisation des images satellitaires SPOT pour la détection et le suivi des modifications du paysage urbain en Roumanie. Société française de photogrammétrie et télédétection, bulletin n° 118, p. 22-26.

COULOMBE, A. et SEUTHÉ, C. 1993. Nouvelles méthodologies d'exploitation de SPOT pour le développement en milieu urbain. Actes 8eCongrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke, 7-10 juin, p. 735-743.

CZERANKA, M. 1992. Monitoring and analysis of urban trends of great Cairo using multitemporal satellite imagery. Archives internationales de photogrammétrie et de télédétection, vol. XXIX, tome B7, p. 494-498.

DUDA, O. and HART, P. 1973. Pattern classification and scene analysis. John Wiley & Sons, New York, 482 p.

GREENFIELD, J. and SHENK, A. 1989. Experiments with edge-based stereo matching. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n° 12, p. 1771-1779.

KRAUS, K. 1993. Photogrammetry – Vol. 1 : Fundamentals and standard processes. Ed. Dummler, Bonn, 397 p.

PAVLIDIS, T. 1984. Algorithms for graphics and image processing. Springer, Berlin-Heidelberg, 420 p.

RIDD, M. and DUDLEY-MURPHY, E. 1992. Global change and urban ecosystems; a role for remote sensing. ASPRS/ACSM, Technical papers Washington D. C. Aug. 3-8, vol. 4, p. 508-513.

STRUNZ, G. 1992. Feature based image orientation and object reconstruction. Archives internationales de photogrammétrie et de télédétection, Aug. Washington D. C. Com. III, vol. B3, p.113-118.

WOOSUG, C. and SCHENK, T. 1992. Resampling digital imagery to epipolar geometry. Archives internationales de photogrammétrie et de télédétection, Aug. 1992, Washington D. C., Com. III, vol. B3, p. 404-407.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 191-206

19

Étude par télédétection des écosystèmes urbains des grandes agglomérations françaises à l'échelle du 1: 25 000

MICHEL LENCO

Ministère de l'Environnement, Direction générale de l'administration et du développement, 20, avenue de Ségur, 75302 Paris 07 SP, France; téléphone : +33 (1) 42-19-16-16; télécopieur : +33 (1) 42-19-18-33

Résumé

Le ministère de l'Environnement développe depuis cinq ans l'étude de l'écologie urbaine au moyen d'une politique de plans municipaux et de chartes locales pour l'environnement basée sur le partenariat. Parallèlement à cette action, une étude expérimentale par télédétection des écosystèmes urbains des grandes agglomérations a été lancée par l'environnement sur dix agglomérations-pilotes : Montbéliard, Le Havre, Nancy, Nantes, Limoges, Bordeaux, Mulhouse, Dunkerque, Saint-Étienne et Perpignan. La télédétection apporte en effet des informations intéressantes à l'échelle du 1: 25 000 dans le domaine urbain sur l'association « bâtiments + végétation + voirie » selon l'importance relative de chaque composante, sur l'ancienneté et la nature des matériaux de construction, sur la forme et la hauteur des bâtiments. Elle contribue à décrire les différentes unités paysagères et les écosystèmes urbains non disponibles par ailleurs. L'analyse des 10 unités urbaines choisies pour leur importance, pour la variété des sites géographiques et d'équipement en SIG, permet d'aboutir à une méthodologie éprouvée d'exploitation des données avec proposition d'une nomenclature commune à 60 rubriques reliable à la classification européenne *Corine-Land Cover*. L'approche d'interprétation visuelle assistée par ordinateur d'images HRV (XS + P) de SPOT, améliorées sur les plans géométrique et radiométrique, selon des unités d'une taille minimale de 1 ha, a été retenue comme démarche principale. Les résultats sont ensuite intégrés dans les SIG locaux afin d'être fusionnés avec d'autres informations exogènes géocodées. Le but est d'aider à la gestion de l'espace avec des

préoccupations d'environnement urbain de distance et de densité à certains écosystèmes ou équipements dans divers découpages administratifs ou géographiques. L'étude conduit à faire des recommandations de méthodes de traitement et de nomenclature commune pour être étendues aux autres villes de France et dans d'autres pays.

1. Introduction

Le ministère de l'Environnement développe depuis quatre ans l'étude de l'écologie urbaine au moyen d'une politique de plans municipaux et de chartes d'environnement basée sur le partenariat. Parallèlement à ces plans et chartes, et en prolongement de travaux prometteurs effectués sur la région parisienne (SFERES, 1986) une étude expérimentale par télédétection des écosystèmes urbains des grandes agglomérations a été lancée par ce Ministère avec la participation financière du Centre national d'études spatiales (CNES), du ministère de l'Équipement, de l'Union européenne (DGXI, EUROSTAT) et d'une dizaine d'agglomérations-pilotes : Montbéliard (MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, 1989), Le Havre, Nancy (UNISFERE, 1992; LENCO, 1993; LENCO and TOURNEUX, 1993); Nantes, Limoges (VERCLER, 1994), Bordeaux (opération lancée par EUROSTAT et l'Institut national de statistiques) (GÉOIMAGE, 1993), Mulhouse (SERTIT et LABORATOIRE IMAGE ET VILLE, 1995), Dunkerque (BOUSQUET, 1995), Saint-Étienne, Perpignan (certaines agglomérations sont constituées en communauté urbaine ou district, ou bien encore en syndicat de communes, d'autres non).

La télédétection apporte en effet des informations intéressantes sur l'association « bâtiments + végétation + voirie » selon l'importance relative de chaque composante, sur l'ancienneté et la nature des matériaux de construction, sur la forme et la hauteur des bâtiments. Elle contribue ainsi à décrire les différentes unités paysagères et les « écosystèmes urbains » non disponibles par ailleurs.

Les projets de développement de la connaissance de l'environnement urbain en Europe occidentale et orientale et, d'autre part, la méthode d'analyse par télédétection des grandes agglomérations au 1: 25 000 de plus de 1 ha étant semblable à celle de l'opération européenne *Corine-Land Cover* au 1: 100 000 et par unités de plus de 25 ha, expliquent la participation de l'Union européenne et du CNES à l'entreprise. Il sera ainsi possible de mettre au point une classification spécifique des écosystèmes urbains détaillée à 5 niveaux et compatible avec la nomenclature Corine qui n'en compte que 3.

Le ministère de l'Équipement s'est intéressé à l'expérience surtout pour l'aspect gestion de l'occupation du sol détaillée des grandes villes dans des systèmes d'information géographique (SIG) intégrant les données utilisées habituellement par les urbanistes. De leur côté, les agglomérations-pilotes, déjà sensibilisées aux problèmes d'environnement, attendaient de cette étude, l'obtention d'informations détaillées et actualisées sur l'occupation du sol avec introduction de préoccupations environnementales. Elles souhaitaient rapprocher ces résultats d'autres renseignements localisés disponibles dans des SIG, en cours de fonctionnement ou en cours de constitution, afin de parvenir à une gestion automatisée au 1: 25 000 de l'ensemble du territoire et des écosystèmes urbains de chaque agglomération. Le système mis en place doit en particulier servir à calculer des indicateurs d'environnement de densité et de proximité, et contribuer à analyser les paysages. Il donnera ainsi la possibilité de suivre l'exécution des plans et projets et de préparer des scénarios d'aménagement.

2. Objectifs

Les buts recherchés sont les suivants :

- établir une méthodologie éprouvée d'exploitation des données satellitaires sur l'occupation biophysique du sol (avec proposition d'une nomenclature commune détaillée et raccordable à la classification européenne Corine) et d'intégration des résultats dans les SIG locaux; ceci permettra de satisfaire les besoins d'information des aménageurs et des environnementalistes afin d'aider à la gestion à l'échelle du 1: 25 000 des grandes unités urbaines qui posent des problèmes d'environnement spécifiques à cause de leurs dimensions humaines et spatiales; c'est pourquoi les agglomérations retenues sont d'importance et de caractéristiques différentes ainsi que de niveau d'équipement variable en SIG;
- mettre au point un outil pour connaître l'état et les modifications des écosystèmes urbains au 1: 25 000 afin de suivre les changements à un rythme triennal ou quinquennal (DELAVIGNE *et al.*, 1991; VILLE DE STRASBOURG, 1992), des grandes unités urbaines en vue d'aider :

. à la prise de décision pour la gestion et l'élaboration des scénarios relatifs à l'occupation du sol et aux unités paysagères, avec la prise en compte de préoccupations d'environnement pour améliorer le cadre de vie (POS : plan d'occupation des sols; SDAU : schéma directeur d'aménagement urbain);

. à la sensibilisation des responsables locaux au moyen d'images et de résultats cartographiques intégrés dans un SIG avec d'autres informations exogènes;

- faire des recommandations pour entraîner les 50 autres grandes agglomérations françaises dépassant 100 000 habitants à utiliser la télédétection dans leur SIG, où les résultats numérisés issus des données satellitaires pourront être fusionnés avec d'autres informations géocodées : recensement de la population et des logements par îlot (DUREAU *et al.* 1991), équipements et services, réseaux linéaires, limites administratives, documents d'urbanisme, cadastre, établissements industriels classés, etc., pour déboucher sur un système d'indicateurs d'accès, de proximité et de densité, qui apportera des renseignements par îlot, quartier, commune, sur les grandes concentrations urbaines qui posent des problèmes d'environnement spécifiques.

Le traitement sur SIG permet, en effet, d'établir un système d'indicateurs d'environnement : 1) en décrivant le cadre de vie de la population vivant dans ou à proximité des diverses unités paysagères ou des divers écosystèmes urbains; 2) en mesurant la distance des logements et de la population à certains écosystèmes ou installations attractifs ou répulsifs dans l'agglomération; 3) en calculant la densité de la population par type et surface d'écosystème selon la distance ou selon divers découpages administratifs ou géographiques; 4) en appréhendant également la répartition et la densité en nombre et en surface de certains écosystèmes ou équipements suivant différentes limites administratives ou géographiques avec la population concernée.

Il est prévu aussi d'étendre l'opération dans le cadre de l'Union européenne (GÉOIMAGE,1993) aux autres pays membres, aux pays de l'Est et à ceux du bassin méditerranéen (ANDRIAMIHAMINA, 1992; ÉQUIPE FRANCO-ÉGYPTIENNE, 1990; ÉQUIPE FRANCO-LIBANAISE, 1989; GAMBA, 1989; NASCIMENTO *et al.*, 1991).

3. Description de l'expérimentation

Les dix agglomérations-pilotes (tab. 1) ont été choisies en fonction de la diversité des sites géographiques et des équipements de SIG parmi les agglomérations ayant souscrit ou

Tableau 1. Agglomération retenues dans l'étude expérimentale par télédétection au 1: 25 000 des écosystèmes urbains des grandes agglomération de plus de 100 000 habitants

	Données utilisées	Particularités des sites	Particularités des études
Montbéliard	TM et HRV (XS)	Agglomération industrielle subissant d'importantes mutations. Conflit de zone d'influence avec l'agglomération voisine de Belfort. Proximité du tracé du TGV-est.	Étude diachronique et analyse des phénomènes thermiques. Utilisation pour des scénarios de développement. Mise sur SIG artisanal.
Nancy	TM et HRV (XS + P)	Agglomération traversée par la Meurthe avec de faibles écarts d'altitude et des types d'habitat particulier.	Évaluation de l'apport des différents types de données. Développement des prétraitements d'amélioration et fusion d'images. Utilisation importante sur SIG.
Le Havre	HRV (XS + P)	Agglomération portuaire en estuaire, sans cadre juridique et comportant des zones humides. Travaux d'équipement en cours.	Traitements sur petit équipement Multiscope d'un CETE. Utilisation d'une classification dirigée en deux temps. Essai d'analyse par quartiers. Étude d'évolution.
Limoges	HRV (XS + P) et MNT	Agglomération étendue ayant un dénivelé notable et recouvrant des milieux naturels importants.	Utilisation des résultats pour la préparation du SDAU et la création d'un SIG.
Nantes	HRV (XS + P)	Agglomération venant de se constituer, étendue en estuaire et comprenant des milieux naturels importants (zones humides notamment).	Traitements mixtes, partie en classification dirigée, partie en PIAO, selon les zones. Utilisation des résultats pour la création d'un SIG.
Mulhouse	HRV (XS + P), MNT et TM	Agglomération non constituée dans un cadre juridique. Zone frontalière (REGIO du district des trois frontières).	Agglomération disposant d'un SIG très perfectionné et d'un MNT. Développement de prétraitements et traitements en PIAO.
Dunkerque	HRV (XS + P)	Port de mer très important. Agglomération étendue située en zone frontalière et incluant des milieux naturels côtiers variés (zones humides et dunes notamment).	Agglomération ayant un SIG perfectionné.
Saint-Étienne	HRV (XS + P), MNT et TM	Agglomération non constituée dans un cadre juridique. Contact de zones d'influence avec l'agglomération voisine de Lyon. Situation en vallée fluviale à relief accentué.	Étude des aspects paysagers en 3D sur cette agglomération située en milieu accidenté à végétation préservée. Utilisation pour un SIG à créer.
Bordeaux	HRV (XS + P)	Agglomération portuaire en estuaire, très étendue, à limites physiques imprécises. Existence d'un fichier cadastral numérisé.	Essais de nomenclature EUROSTAT (U.E.) et étude des limites d'urbanisation par analyse morphologique. Absence de participation locale.
Perpignan	HRV (XS + P) et MNT	Agglomération méditerranéenne à proximité de la mer. Absence de cadre juridique.	Valorisation du SIG local. Étude d'évolution.

devant signer un plan ou une charte d'environnement et intéressées, en outre, par l'usage de la télédétection spatiale dans un SIG.

Dans le but de présenter des recommandations pour étendre l'utilisation de la télédétection à d'autres grandes unités urbaines et d'évaluer assez précisément les coûts et la méthodologie la plus adéquate, différents types de données satellitaires, associés ou non à un modèle numérique de terrain (MNT) selon le cas, ont été utilisés et soumis volontairement à des méthodes et ateliers de traitement différents (les ateliers étaient localisés en général à proximité des agglomérations, par exemple la société SERTIT, installée dans la banlieue de Strasbourg, a été choisie pour l'étude de Mulhouse).

Les opérations les plus réussies sont celles qui se sont déroulées en collaboration très étroite avec les responsables des services techniques locaux. Un suivi de l'utilisation des résultats dans les SIG est par ailleurs assuré *a posteriori.*

Dès les premières agglomérations examinées deux faits marquants ont ressorti : 1) les données TM de Landsat ou HRV (XS) de SPOT seules sont insuffisantes pour fournir des résultats cartographiques sur le milieu urbanisé à l'échelle du 1: 25 000 qui intéressent les services techniques des agglomérations pour gérer l'ensemble des territoires de leur ressort; les données HRV fusionnées XS + P sont celles qui apportent le meilleur tronc d'informations de base pour l'étude thématique des écosystèmes urbains au 1: 25 000, ce qui est évident pour la finesse géographique, mais l'était moins au départ quant à la richesse thématique par rapport à une fusion TM + HRV(P) par exemple; le complément TM permet d'améliorer la connaissance thématique de l'occupation du sol de certaines zones (voir section 4); 2) les classifications dirigées par pixel en approximativement 25 classes ne peuvent donner seules une description de l'occupation du sol très détaillée sur le milieu urbain avec une fiabilité effective de classement thématique du territoire suffisante de l'ordre de 90 à 95 % et sans comporter de rubrique rebut à classement indéterminé difficilement gérable dans un SIG (CETE, 1992). Le lien entre les classifications dirigées avec la nomenclature européenne *Corine-Land Cover* est quasi impossible du fait que la méthode utilisée pour parvenir à cette dernière repose sur une conception différente d'analyse d'image : celle de la photo-interprétation d'images assistée par ordinateur (PIAO) donnant une classification hiérarchisée par zone à plusieurs niveaux sans classe rebut.

Ceci explique pourquoi l'interprétation d'image améliorée assistée par ordinateur avec l'appui d'informations exogènes a paru être la méthode la plus adaptée pour satisfaire les besoins exprimés par les agglomérations d'une classification très fiable comprenant 50 à 55 rubriques établie par zone de 1 ha ou plus. À l'exception de l'essai effectué sur Le Havre, toutes les agglomérations ont été analysées en PIAO, mais avec des variantes cependant.

4. Méthodologie proposée

4.1. Choix des images

L'idéal est d'obtenir un couple d'images HRV (XS-P) de SPOT enregistrées simultanément pendant la belle saison: ce qui a pu être réalisé sur les agglomérations de Nancy et de Bordeaux. La fusion d'images XS et P prises à des dates différentes ne pose pas de problème particulier, mais il faut éviter d'acquérir des images enregistrées pendant la mauvaise saison lorsque le rayonnement solaire et l'activité végétale sont affaiblis. Si ceci paraît évident pour les données multibandes XS, la remarque vaut aussi pour les données panchromatiques, destinées surtout à améliorer la finesse géométrique de l'image XS

associée. Cet inconvénient n'est pas dû aux corrections géométriques et a été rencontré sur les agglomérations de Limoges, Le Havre et Dunkerque : la fusion XS+P présente alors un aspect flou et l'on est conduit à examiner à part chacune des images XS (en belle saison) et P (en mauvaise saison). Il est recommandé d'éviter les images HRV présentant un angle de prise de vue trop important, de façon à ne pas avoir d'écarts de positionnement géométrique inégalement répartis sur l'ensemble de l'agglomération quel que soit le soin apporté aux corrections géométriques.

4.2. Prétraitements et améliorations d'images

L'acquisition d'images brutes au niveau 1A semble préférable pour effectuer en une seule fois les corrections géométriques suivies des améliorations d'images. Lorsque le relief de l'agglomération est relativement plat, on peut se contenter d'une correction orbitographique affinée par points de contrôle pour minimiser l'erreur de parallaxe des angles de prise de vues (cas de Nancy). L'orthorectification est conseillée pour les agglomérations à relief accusé ou observées avec des images ayant un angle de visée important. Elle permet une parfaite cohérence géométrique recherchée dans la combinaison P+XS et dans l'intégration des résultats obtenus en télédétection dans les SIG. Des MNT existants auparavant ont été utilisés pour l'étude de Mulhouse (pas de 40 m) et Perpignan (pas de 50 m), et des MNT ont été acquis spécialement pour Limoges (pas de 20 m), qui présentait un dénivelé de près de 500 m, ainsi que pour Saint-Étienne (pas de 40 m) où une analyse paysagère particulière en trois dimensions a été effectuée sur ce site collinaire. Dans les trois derniers cas, le MNT a été élaboré par l'Institut géographique national tandis que, pour Mulhouse, il a été établi à partir d'un couple stéréoscopique HRV.

Après une série de prétraitements de délignage ou décolonnage et de suppression des artefacts par prise de moyenne ou filtrage, lorsque ces inconvénients se présentent, les données spatiales sont soumises à des corrections géométriques à partir de points d'appui et à un rééchantillonnage qui consiste à affecter une valeur à des pixels dont les dimensions ou la position ont été modifiées par rapport aux pixels d'origine. Pour le rééchantillonnage, on utilise en particulier la méthode de restauration par déconvolution qui fournit les meilleurs résultats. L'information radiométrique est restituée de façon correcte sur le plan physique et permet un suréchantillonnage par création de nouvelles informations très proches de la réalité et non par simple multiplication de pixels; c'est pourquoi les images résultantes ont des contours nets et respectent les détails. Le rééchantillonnage à 10 m ou à 7,5 m a été employé en calant XS sur P et a permis de diminuer la taille des pixels en minimisant l'effet de zoom dû au suréchantillonnage. L'image rééchantillonnée et suréchantillonnée permet d'obtenir des contours améliorés, de mieux mettre en lumière les objets linéaires et les phénomènes de texture, ce qui est important pour l'analyse par PIAO des écosystèmes urbains de forte et moyenne densités d'occupation.

Une bonne technique pour fusionner les données panchromatiques HRV (P) avec les données multibandes HRV (XS) est la transformation tristimulus, ou intensité-teinte-saturation, ou bien encore luminance-teinte-saturation (*intensity-hue-saturation = I.H.S.*). Cette technique consiste en un transfert de données entre deux référentiels de représentation des couleurs disponibles dans la station de traitement d'image :

- le référentiel de synthèse RVB (rouge, vert et bleu);
- le référentiel numérique en intensité-teinte-saturation qui code les couleurs au niveau de l'ordinateur (comme le RVB corrélé avec XS1 et XS2).

Le panchromatique est corrélé le plus fortement avec la luminance (gamme de gris) qui forme un canal indépendant. C'est pourquoi les valeurs panchromatiques sont recalées par

rapport à l'histogramme de répartition des valeurs de l'intensité. Le référentiel « intensité, teinte, saturation » devient alors « panchromatique, teinte, saturation » où la teinte et la saturation décrivent les valeurs radiométriques des canaux XS1, XS2 et XS3. Les 4 canaux XS3, XS2, XS1 et P se trouvent ainsi réunis dans un référentiel à 3 dimensions seulement. En repassant au référentiel RVB on récupère l'information colorée visualisable sous forme de 3 néocanaux (PXS3, PXS2, PXS1) dont une partie de l'information multibande a été éliminée par la substitution du panchromatique à l'intensité. Les néocanaux produits sont considérablement améliorés : le flou dû au suréchantillonnage des données disparaît. Le résultat de cette opération donne une nouvelle image riche en couleurs mais avec une bonne amélioration de la netteté des contours en plus.

L'amélioration des contrastes de l'image se fait par adaptation de dynamique des bandes spectrales (linéaire, égalisation de l'histogramme) au paysage de la scène; elle peut être globale ou locale, cette dernière distinction étant utile pour différencier l'étude des communes périphériques de celle de la partie centrale de l'agglomération. Les contours peuvent être rehaussés par application d'une convolution unidirectionnelle avec une fenêtre n x n, variable ($3 \leq n \leq 51$) selon l'intensité des contrastes de l'image, où les pixels (en nombre impair) sont affectés de cœfficients de pondération symétriques par rapport au pixel central qui a une pondération dominante.

4.3. Interprétation visuelle assistée par ordinateur

La PIAO (photo-interprétation assistée par ordinateur) peut être effectuée à partir de calques d'interprétation d'image sur tirage papier ou directement sur écran en station de traitement. L'interprétation sur écran immobilise davantage la station, mais permet d'éviter l'étape de numérisation des résultats sur calques, opération longue et source d'erreurs de codification (y compris les oublis) et d'écarts de positionnement. *A contrario*, le recours systématique à l'écran risque aussi de limiter la fonction de globalisation de l'œil et le temps de réflexion nécessaire au règlement des cas complexes ou litigieux. Dans le cas d'une analyse visuelle sur tirage papier, la restitution d'image doit être d'excellente qualité pour faciliter le travail de l'interprète.

L'interprète s'appuie sur une documentation exogène pour effectuer son analyse d'image : 1) cartes et documents divers disponibles localement (parfois même sur SIG); 2) échantillon de photographies aériennes verticales extrait de la dernière couverture disponible, au 1: 20 000 en général, pour aider à analyser l'image et à lever les cas douteux (problèmes de hauteur de bâtiments et de distinction entre zones commerciales et industrielles par exemple); 3) observations sur le terrain.

Le zonage des « écosystèmes urbains », avec un seuil minimum de 1 ha compte tenu de l'échelle de travail, repose sur des raisonnements multicritères de couleur, de texture, de structure et de forme. Il est effectué à 95 % sur la base des données satellitaires et à 5 % avec l'appoint de photographies aériennes pour une nomenclature de 50 à 60 rubriques. On peut estimer que les affectations thématiques des zones élémentaires délimitées à l'aide des données satellitaires sont faites à 80 % uniquement à partir des images satellitaires, à 15 % avec l'appui de photographies aériennes et à 5 % avec l'aide de la documentation exogène disponible ou de visites sur le terrain. Il est bien clair que certains espaces urbains spécialisés et fonctionnels comme les lieux scolaires, les parcs et châteaux, les campings boisés, les petites emprises industrielles et commerciales imbriquées dans les zones d'habitat, ne peuvent être repérés qu'avec l'appoint de sources complémentaires exogènes à la télédétection.

Au cours de son analyse d'image, l'interprète a accès à une station de traitement interactive pour visualiser et traiter les données de base. Il y effectue des zooms sur les zones à problèmes, procède à une décorrélation des canaux par analyse en composantes principales et à des transformations radiométriques : ratios et combinaisons linéaires de bandes spectrales donnant des néocanaux tels que : l'indice normalisé de végétation, l'indice de brillance, l'indice de minéralisation ou de cuirasse (SERTIT et LABORATOIRE IMAGE ET VILLE, 1995; BOUSQUET, 1995). Il se livre aussi à des analyses de voisinage à l'aide de filtres. Parmi les filtres utilisés, outre le filtre laplacien bidimensionnel, on citera les filtres passe-haut, de Wallis et de Sobel pour accentuer les contrastes locaux, et celui de Kirsch pour la détection des contours. On notera cependant que l'apport d'information dû à l'usage de filtres apparaît faible après les améliorations d'image effectuées au préalable. L'œil humain reste fondamental pour le choix des filtres.

L'interprète peut avoir recours aussi à des classifications automatiques dirigées ou non dirigées pour dégrossir ou, au contraire, affiner son interprétation.

Le concept de PIAO recouvre finalement des variantes de méthode assez nombreuses. Lors de son travail, l'interprète peut avoir recours à des images semblables prises à des saisons différentes ou par d'autres capteurs. Les données TM apportent en particulier des informations supplémentaires intéressantes dans les bandes spectrales TM1 (bleu) et TM5 (infrarouge moyen).

Seuls les axes majeurs des réseaux ont été pris en compte sur les images satellitaires car, au 1: 25 000, la représentation des réseaux (connus par ailleurs et incorporés dans les SIG locaux) ne peut être que symbolique, leur largeur ne représentant pas le plus souvent un nombre entier de pixels et l'erreur de superficie cartographiée pouvant être importante.

La cartographie obtenue est contrôlée par sondage spatial au moyen d'une grille de points ou de parcours de transects donnant lieu à une vérification ou à une validation sur photographies aériennes ou sur le terrain. Elle s'est avérée fiable à 95-97 % sur les agglomérations de Montbéliard, Nancy et Limoges en ce qui concerne la définition et la classification thématique des zones d'écosystèmes. Ces résultats sont valables pour l'ensemble des classes. En effet, la méthode de PIAO utilisée pour l'interprétation permet d'introduire des traitements plus développés et un recours plus important aux données exogènes pour discriminer les zones élémentaires des catégories les plus difficiles à isoler par télédétection. La méthode d'analyse explique le niveau de fiabilité assez uniforme obtenu sur l'ensemble des classes, ce qui n'est pas le cas dans les classifications automatiques. Une autre méthode a été essayée sur Mulhouse à partir de profils d'image qui permettent de repérer des séries de réponses sur les canaux ou indices et de les mettre en relation avec les séquences correspondantes de la nomenclature. Cette procédure semble prometteuse pour fournir une validation spatiothématique qualitative. Le tirage aléatoire de zones classées par thèmes à valider sur le terrain demande un positionnement rigoureux, un échantillonnage important et un travail assez lourd sur le terrain ou sur photographie aérienne; c'est pourquoi il s'avère peu opérationnel.

La nomenclature établie pour la connaissance des « écosystèmes urbains » (tab. 2) tient compte des possibilités offertes par l'imagerie satellitaire et des besoins des grandes agglomérations. Cette nomenclature conserve l'architecture de la classification générale européenne d'occupation du sol *Corine-Land Cover* qui a l'avantage de présenter des niveaux thématiques hiérarchisés partant d'une conception globale et qui peut être développée à des niveaux supplémentaires par affinements successifs de thèmes particuliers d'autant que les échelles sont plus précises. C'est ainsi que la nomenclature européenne à trois chiffres a pu être détaillée à des niveaux supplémentaires 4 et 5, sur les zones urbanisées principalement. Le travail sur les grandes agglomérations a ainsi permis d'exploiter au maximum toutes les possibilités offertes actuellement par la télédétection

Tableau 2. Nomenclature des écosystèmes urbains des grandes agglomérations françaises (synthèse); développement et raccord avec la nomenclature européenne *Corine-Land Cover*

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
1 Territoires artificialisés	11 Zones urbanisées	111 Tissu urbain continu dense	1111 Type centre ville	11111 Noyau (centre) dense (ancien, parcellaire étroit)
	12 Zones industrielles et commerciales, activités de services	112 Tissu urbain discontinu	1112 Type centre bourg (noyaux denses des communes périphériques)	11112 Faubourgs et quartiers denses ou moyennement denses
	13 Mines, décharges et chantiers	113 Espaces urbains spécialisés	1121 Habitat pavillonnaire bas	11211 Habitat d'extension linéaire des communes périphériques (villages-rues)
	14 Espaces verts artificialisés non agricoles	121 Emprises industrielles commerciales et de services	1122 Habitat (ou bâtiment) collectif	11212 Forte densité de construit (peu de végétation et forte organisation linéaire) lotissements
	15 Espaces non affectés en milieu bâti résidentiel, commercial ou de service (espaces vacants et friches urbaines)	122 Réseaux de communication et espaces associés	1123 Habitat mixte collectif et pavillonnaire	11213 Moyenne densité de construit (présence de végétation et organisation parcellaire marquée)
		123 Zones portuaires (y.c. ports de plaisance)	1124 Habitat de type rural (bourg, hameau, mitage) bâtiments isolés	11214 Assez faible densité de construit (végétation marquée et organisation perceptible autour du réseau viaire)
		124 Aéroports, aérodromes	1131 Cimetières	11215 Faible densité de construit avec forte présence de végétation
		131 Extraction de matériaux (sablières, carrières, mines à ciel ouvert, gravières sous eau)	1132 Emprises militaires	11221 Grands ensembles avec grande emprise des bâtiments au sol, grands collectifs hauts (grandes barres et tours)
		132 Décharges et dépôts de remblais, déblais	1133 Emprises scolaires et universitaires	11222 Grand ensembles avec une petite emprise des bâtiments au sol, petits collectifs bas, cités minières
		133 Chantiers (espaces en construction, excavations et sol remaniés à l'exclusion des travaux d'aménagement foncier agricole)	1134 Emprises hospitalières	11321 Installations (casernes, camps,...)
			1135 Sites historiques, lieux culturels, emprises religieuses	11322 Autres (terrains de manoeuvre, champs de tirs, pistes d'essai, etc.)
			1136 Autres services publics (parcs des expositions, centres postaux, etc.)	1133 Emprises scolaires et universitaires
			1211 Emprises industrielles (y.c. entrepôts, stockage, accès, stationnement)	11331 Installations, bâtiments
			1212 Zones commerciales (au sens large)	11332 Autres (cours, campus, parkings)
			1213 Parcs technologiques, aires d'activité de service	1134 Emprises hospitalières
			1214 Emprise du retraitement de l'eau	11341 Installations, bâtiments
			1215 Stations d'élevage	11342 Autres (cours, jardins, parkings)
			1216 Friches industrielles	11361 Bâtiments, installations
			1221 Réseau routier principal et espaces associés (routes, autoroutes, échangeurs, aires de repos)	11362 Parkings
			1222 Réseau ferré et espaces associés	12111 Type industries lourdes (grandes unités) et production d'énergie
		141 Espaces urbains aménagés (pelouses et zones arborées)		
		142 Equipements sportifs et de loisirs		
		143 Jardins familiaux ou ouvriers (en concentration)		

Tableau 2 (suite). Nomenclature des écosystèmes urbains des grandes agglomérations françaises (synthèse); développement et raccord avec la nomenclature européenne *Corine-Land Cover*

			1223 Espaces parkings hors des zones industrielles commerciales et de services	12112 Autres activités industrielles (légères)
				12113 Pistes et terrains d'essai
			1231 Bassin de marée (avant port et rade)	12121 Bâtiments, installations
				12122 Parkings
			1232 Bassin de radoub, chantiers navals	12141 Station d'épuration
				12142 Décanteurs, lagunage
			1233 Installations et entropôts (y.c. quais)	12211 Tronçons, voiries (y.c. remblais)
				12212 Espaces interconnexions, péages, aires de repos, gares routières
			1241 Aéroports	12221 Tronçons ferrés (y.c. remblais)
			1242 Aérodromes	12222 Gares, triages, ateliers de réparation, entrepôts, quais
			1311 Extractions actives et espaces associés	12411 Installations
				12412 Pelouses
			1312 Zones d'extraction en mutation (à l'abandon, en friche, en réhabilitation)	12421 Installations
				12422 Pelouses
			1321 Décharges et dépôts de remblais, déblais	13111 Gravières et sablières actives
				13112 Carrières actives
			1322 Dépôts de mines et industries lourdes (terrils, etc.) hydrocarbures	13113 Mines à ciel ouvert actives
			1411 Parcs et jardins publics ou privés	
			1412 Chateaux et parcs associés	
			1421 Golfs	
			1422 Hippodromes, centres équestres	
			1423 Equipements sportifs et de loisirs (stades, tennis, etc.)	
			1424 Campings	
			1425 Autres (vélodromes, motocross, karting, etc.)	
2 Territoires agricoles	21 Terres arables (y.c. jachères)	211 Terres arables hors périmètre d'irrigation	2111 Maraîchage, cultures florales	21111 Maillage bocager important
			2112 Autres	21112 Maillage bocager lâche ou absent
	22 Cultures permanentes	212 Périmètre irrigué en permanence	2121 Maraîchage, cultures florales	21121 Maillage bocager important
			2311 Prairies humides	21122 Maillage bocager lâche ou absent
	23 Prairies	221 Vignobles	2312 Autres prairies	21211 Maillage bocager important
		222 Vergers et petits fruits		21212 Maillage bocager lâche ou absent
		231 Prairies		23111 Maillage bocager important
				23112 Maillage bocager lâche ou absent
				23121 Maillage bocager important
				23122 Maillage bocager lâche ou absent

Tableau 2 (fin). Nomenclature des écosystèmes urbains des grandes agglomérations françaises (synthèse); développement et raccord avec la nomenclature européenne *Corine-Land Cover*

3 Forêt et milieux semi-naturels	31 Forêt (y.c. coupes) 32 Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée 33 Espaces ouverts sans ou avec peu de végétation	311 Forêts de feuillus 312 Forêts de conifères 313 Forêts mélangées 321 Pelouses et pâturages naturels 322 Landes et broussailles (y.c. friches) 323 Végétation sclérophylle 324 Forêts et végétation arbustive en mutation (dégradation ou recolonisation) 331 Plages, dunes, sable 332 Roches nues 333 Végétation clairsemée 334 Zones incendiées	3111 En zone humide (forêt hydrophyle) 3112 En zone non humide 3311 Sable, plage de sable ou de galets 3312 Dunes	31111 Plantations (peupleraies, etc.) 31112 Boisements naturels (saulaie, hetraie, aulnaie, etc.) 33121 Dunes vives 33122 Dunes grises (Oyat, carex, chiendent, mousse et lichens, etc.)
4 Zones humides	41 Zones humides intérieures 42 Zones humides maritimes	411 Marais intérieurs 412 Tourbières 421 Marais maritimes 422 Marais salants 423 Zones intertidales (slikke, schorre, bancs de sable)	4111 Marais à roseaux 4112 Marais à joncs 4113 Marais à molinies 4114 Autres marais (caricaies, baccharis, etc.) 4211 Vasières 4212 Autres marais maritimes	
5 Surface en eau	51 Eaux continentales 52 Eaux maritimes	511 Cours et voies d'eau 512 Plans d'eau (y.c. espaces associés immergés) 521 Lagunes littorales 522 Estuaires 523 Mer et océan	5111 Cours d'eau 5112 Voies d'eau, canaux 5121 Naturels (lacs, étangs) 5122 Artificiels	

spatiale à usages civils pour décrire le tissu urbanisé.

Cette articulation par rapport à une classification de référence permet d'assurer une cohérence entre les différents résultats obtenus par diverses opérations utilisant la télédétection à des échelles différentes. Elle donne la possibilité d'effectuer des comparaisons dans le temps et dans l'espace et avec les séries statistiques existantes par ailleurs. La complexité de la nomenclature, faisant appel à des critères d'aspect et de fonction, interdit pratiquement l'emploi unique et généralisé de méthodes purement automatiques. Un ensemble de 50 à 60 catégories a été retenu avec des variantes par chacune des agglomérations-pilotes. Les modifications de la nomenclature existant entre les agglomérations, en dehors de celles dues aux particularités des milieux et des sites rencontrés, sont minimes et la nomenclature générale de synthèse (tab. 2) recueille un large consensus.

Les classes d'écosystèmes urbains apportent des informations originales de nature biophysique qui complètent bien les données habituellement utilisées par les urbanistes au niveau des SDAU, des POS et des BDU (banques de données urbaines). Inversement, les BDU fournissent des renseignements supplémentaires de type fonctionnel.

4.4. Numérisation de l'interprétation visuelle

L'interprétation cartographique sur calque ou sur écran de station de traitement est ensuite numérisée avec les limites des communes de chaque agglomération afin : 1) de disposer de statistiques sur les superficies par catégorie d'écosystème par commune et pour l'ensemble de l'agglomération; 2) d'avoir une représentation numérique thématique superposable aux images et intégrable dans le SIG de l'agglomération.

Il existe des écarts résiduels avec les superficies des communes de l'agglomération connues par ailleurs. Ces écarts sont normalement de l'ordre de 0,5 % sur l'ensemble d'une agglomération et proviennent des erreurs résiduelles des corrections géométriques, du tracé un peu schématique des limites communales sur la carte nationale au 1: 25 000 et, surtout, de la représentation vectorielle des contours communaux qui laisse toujours une petite marge d'erreur pouvant atteindre un total non négligeable de 5 ou 6 % en cas de contours très échancrés. En général, les écarts relatifs aux communes situées au centre du district urbain sont négligeables, tandis que ceux qui concernent les communes périphériques sont un peu plus importants, surtout si l'altitude varie.

Dans le cas d'une interprétation sur calque et de l'utilisation d'un MNT (Mulhouse), le résultat de l'interprétation est saisi par numérisation des contours et des attributs des polygones, le fichier est ensuite superposé à l'image HRV améliorée géoréférencée à partir du MNT. Par observation directe et interactive des limites des polygones, l'interprète contrôle la géométrie des objets identifiés; puis chaque rubrique de la nomenclature est vérifiée pour l'ensemble des polygones classés dans la catégorie qui sont placés sur le fond image. Cette démarche garantit un niveau de qualité élevé de la numérisation de l'interprétation et de ses aspects géométriques sans préjuger de la qualité de cette interprétation. La PIAO réalisée sur SIG évite des distorsions géométriques dues à l'utilisation de documents intermédiaires (suppression de la cartographie manuelle et de la numérisation) et aide l'interprétation si l'on dispose de données exogènes sur le SIG. Au moment de la numérisation de la cartographie interprétée, le balayage est préférable à la numérisation car cette dernière doit être vérifiée très minutieusement ainsi qu'on vient de la décrire. Le mode raster est mieux adapté que le mode vecteur pour les mises à jour et pour l'étude des zones complexes ou à contours compliqués, mais ce dernier, donne une meilleure définition des distances de connexion entre les bâtiments.

L'étude par télédétection des grandes agglomérations offre aussi la possibilité d'examiner la continuité du tissu bâti pour aider à fixer de façon automatique les limites physiques des agglomérations ou zones morphologiques urbaines en utilisant des logiciels de morphologie mathématique après avoir établi la cartographie de l'occupation du sol (cas de Bordeaux, étudié à l'initiative d'EUROSTAT et de l'Institut national de statistiques). Le recours aux algorithmes de morphologie mathématique peut aussi être utilisé en PIAO pour isoler ou préciser divers types de territoires, notamment certaines catégories d'habitat.

5. Délais et coûts, mise à jour

La durée de réalisation effective, sauf difficultés particulières telles que la mauvaise qualité des images restituées sur Limoges, est de l'ordre de 4 mois. Cependant, avec les délais pratiques séparant la commande de la remise des résultats et comprenant les discussions avec les responsables des agglomérations ainsi que les étapes intermédiaires de contrôle et réflexion, elle peut atteindre 12 mois. Le coût de l'investissement initial est de l'ordre de 180 000 F TTC sans usage de MNT pour une superficie de 20 000 à 60 000 ha selon la configuration, la densité et l'importance des agglomérations en population et en surface. En phase opérationnelle, les coûts initiaux devraient être légèrement moins élevés que ceux observés sur les agglomérations-pilotes qui incluaient des travaux exploratoires avant d'aboutir à la méthodologie de synthèse exposée ci-dessus.

La mise à jour devrait être prise en main par les agglomérations elles-mêmes qui ont été normalement associées à l'inventaire initial pour bénéficier des transferts du savoir-faire en télédétection. On peut envisager une mise à jour tous les 3 ans sur le domaine périurbain et tous les 5 ans sur la zone urbaine dense centrale qui change peu. Les travaux effectués sur les évolutions multidates à Montbéliard, Le Havre, Mulhouse, et Perpignan, et les réflexions présentées par les différents centres de traitement et les agglomérations-pilotes conduisent à proposer la procédure suivante : achats de nouvelles images enregistrées à une même époque soumises aux mêmes prétraitements, comparaison ou fusion en créant une image multidate avec les images anciennes, interprétation des changements sur SIG. Le coût de la mise à jour est sensiblement moindre que l'investissement initial. Le chiffre de 40 % peut être avancé, mais les estimations des ateliers de traitement restent encore disparates et doivent être affinées.

6. Utilisation des résultats dans les SIG des agglomérations

Les résultats de la cartographie des écosystèmes urbains donnant le découpage des agglomérations en zones élémentaires classées et codées ont été intégrés sans grande difficulté dans les SIG et bases de données urbaines existants, plus ou moins perfectionnés et développés, avec l'aide technique des ateliers de traitement de données télédétection. L'opération télédétection menée en collaboration avec des agglomérations ayant souscrit un plan ou une charte d'environnement a été entreprise dans le but d'introduire et d'identifier des éléments d'environnement dans le domaine urbain et de pouvoir en suivre l'évolution de façon régulière, ce qui prolonge l'approche globale inhérente aux chartes.

Les expériences dans les agglomérations ont montré que, pour les services techniques, les données de télédétection ont aujourd'hui acquis un caractère opérationnel en complétant les autres types de données traditionnellement utilisées par ces services. Les résultats

obtenus par télédétection ont permis de faire un bilan de l'occupation biophysique détaillée du territoire tenant compte de l'association végétation-tissu bâti et de la densité des constructions. Ces renseignements cartographiques et statistiques n'étaient plus à jour ou faisaient souvent défaut. Ce bilan fournit une référence de base pour décrire l'état actuel, pour élaborer des projets et pour suivre la dynamique de l'occupation du territoire par les différents services. Il semble bien que les résultats sur les écosystèmes urbains, bien utilisés en priorité par les urbanistes et les aménageurs, entraînent de nouvelles réflexions chez les responsables locaux quant à la gestion, au suivi et à la prévision de l'usage du sol avec des préoccupations environnementales. Les données issues de l'imagerie satellitaire peuvent aussi facilement trouver place dans un tableau de bord ou un observatoire de l'environnement au niveau de chaque agglomération.

La mise en relation des données socio-économiques exogènes avec les résultats sur les écosystèmes urbains issus de l'interprétation des images satellitaires est une opération plus complexe qui n'est pas encore achevée dans les agglomérations-pilotes, et il est encore trop tôt pour faire un bilan de l'utilisation des résultats dans cette direction, un certain nombre d'actions en cours ou en projet n'étant pas terminées. Par exemple, on peut, à partir des résultats des recensements par îlot, présenter les caractéristiques sociales de la population et des logements dans les différents écosystèmes qui décrivent le cadre de vie et le paysage urbain. On aura ainsi une meilleure perception des conditions de vie des différents groupes sociaux.

On peut aussi connaître la densité de la population par écosystème et mieux délimiter et décrire les quartiers. Il est possible également de répartir la population selon la distance aux espaces verts, à certains services, à certaines sources polluantes, ou bien encore selon l'appartenance à des zones de risque (inondation par exemple), ceci dans différents découpages administratifs : quartier, commune, centre-ville et couronnes périphériques successives, ensemble de l'agglomération. Le rapprochement des résultats de télédétection avec les données socio-économiques permet alors d'aboutir à des indicateurs utilisables pour une meilleure prise en compte et gestion de l'environnement urbain.

Le développement des travaux de rapprochement des données socio-économiques avec les écosystèmes urbains dépend surtout de l'initiative des services de l'environnement des agglomérations qui sont souvent relativement jeunes et ne gèrent pas directement les SIG locaux, à l'inverse des aménageurs et des urbanistes. Enfin, la mobilisation des ressources pour l'exploitation des données dans les SIG dépend aussi de la volonté des autorités locales d'utiliser le système ainsi créé pour l'application des politiques d'aménagement et d'environnement. L'inventaire des utilisations sur SIG de l'information de télédétection produite dans les agglomérations-pilotes est important car il doit permettre de mettre en évidence le rôle des différents partenaires : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, gestionnaires, associations, public, aux différents niveaux de décision dans la création, la maîtrise et l'utilisation de tels outils. L'information thématique élaborée finale doit être suffisamment simple et illustrative pour servir dans les processus de consultation et d'information du public et des élus sur les plans de l'environnement et de l'aménagement.

La cartographie numérique des écosystèmes urbains semble bien satisfaire les besoins d'information de gestion locale aux niveaux de l'ensemble d'une agglomération, de la ville-centre, des quartiers, des premières et deuxièmes couronnes périphériques et des schémas directeurs. Par contre, les résultats par commune rurale en périphérie paraissent moins intéressants, à l'échelle du 1: 25 000, aux gestionnaires de cette catégorie de communes. En effet, en ces lieux le paysage urbain a un champ plus restreint et l'intérêt se cristallise sur certains bâtiments individualisés de faible taille que l'échelle ne permet pas d'analyser de manière assez fine : l'école, le terrain de sport ou le dispensaire du village par exemple. Lorsque les exemples concrets d'application sur SIG sur l'étude de

l'environnement urbain et l'aménagement intégrant l'environnement seront achevés par les agglomérations-pilotes, une action de sensibilisation auprès des autres grandes agglomérations françaises sera entreprise pour développer l'étude des écosystèmes urbains de manière opérationnelle.

7. Conclusion

La télédétection spatiale s'avère être l'une des rares sources d'information opérationnelle permettant d'appréhender (par PIAO), en 50 à 60 classes avec une bonne fiabilité, un espace étendu d'un seul bloc et de façon uniforme pour une prise en compte globale au 1: 25 000 des écosystèmes des grandes agglomérations. Le fait que quelques thèmes soient reconnus grâce à l'apport d'informations exogènes ne retire rien à cet avantage.

Les résultats de l'opération-pilote se sont révélés satisfaisants autant sur le plan technique que sur celui de l'intérêt manifesté par les autorités locales. Du fait que les bases méthodologiques sont communes aux différentes villes, que l'on a recours à une même source d'information satellitaire (HRV) et que la nomenclature des écosystèmes comporte un tronc commun, les résultats statistiques et cartographiques peuvent être comparés entre agglomérations. L'intérêt apparaît aussi d'examiner des agglomérations européennes transfrontières (par exemple celle de. Mulhouse - Bâle - Fribourg). La dimension des agglomérations de plus de 100 000 habitants fait aussi, pour des questions de relation d'échelle et de population, que la télédétection spatiale est directement utilisable à l'échelle du 1: 25 000 par les aménageurs et environnementalistes pour gérer des ensembles urbains de cette taille, en attendant SPOT 5 qui permettra d'atteindre le 1: 10 000 après l'an 2000. L'étude par télédétection des écosystèmes urbains des grandes agglomérations peut être étendue dès maintenant à l'ensemble des grandes cités françaises et européennes.

8. Références

ANDRIAMIHAMINA, R. 1992. Connaissance de l'occupation du sol du grand Antananarivo à Madagascar. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 28 p.

BOUSQUET, S. 1995. Cartographie de l'occupation des sols sur l'agglomération de Dunkerque, Wasquehal. Société SIRS, 30 p.

CETE (Centre d'études techniques de l'équipement), 1992. Étude de l'agglomération du Havre par télédétection, CNES - Équipement - Environnement et CETE de Rouen, Rouen, 51 p.

DELAVIGNE, R. *et al.* 1991. Télédétection et schéma directeur, le SDAU d'Arcachon. CNES, ministère de l'Équipement et IAURIF, Paris, 87 p.

DUREAU, F. *et al.* 1991. Sondages aérolaires sur image satellite pour les enquêtes socio-démographiques en milieu urbain, Quito. CNES - ORSTOM, Paris, 12 p.

ÉQUIPE FRANCO-ÉGYPTIENNE, 1990. Le développement urbain du Grand Caire. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 47 p.

ÉQUIPE FRANCO-LIBANAISE, 1989. Le Grand Beyrouth, occupation du sol et évolution. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 215 p.

GAMBA, A. 1989 Observatoire urbain de l'aire de Buenos Aires. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 40 p.

GÉOIMAGE, 1993. Télédétection et statistiques urbaines, projet Bordeaux. Journée de présentation à Paris par Eurostat, Luxembourg, 23 p.

LENCO, M. 1993. Étude des écosystèmes urbains des grandes agglomérations par télédétection au 1/25 000. Journée d'étude ville et statistiques du Conseil National de l'Information Statistique, Institut national de statistiques, Paris, 5 p.

LENCO, M. and TOURNEUX, F. 1993. Remote sensing from space at 1/25 000 scale to study and watch the urban ecosystems in the built up areas above 100 000 inhab. Vienna ERIM symposium, Ann Arbor, 5 p

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, 1989. Étude par télédétection des écosystèmes urbains des agglomérations moyennes de Belfort et Montbéliard. Environnement- Équipement, région Franche-Comté, Paris, 12 p.

NASCIMENTO, I. *et al.* 1991. Occupation du sol, aptitude à l'urbanisation des grandes villes brésiliennes : Brasilia, Rio-de-Janeiro et Sao-Paulo. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 30 p.

SERTIT et LABORATOIRE IMAGE ET VILLE, 1995. Intégration de la cartographie des écosystèmes urbains dérivée de l'imagerie SPOT dans le SIG de la ville de Mulhouse. Illkirch, 86 p.

SFERES, 1986. Analyse du tissu urbain de Paris et des départements de la petite couronne par télédétection. Environnement - IAURIF, Montrouge, 26 p.

UNISFERE, 1992. Étude des grandes agglomérations de plus de 100.000 habitants par télédétection, application au district de Nancy. CNES -Environnement, Besançon, 51 p.

VERCLER, 1994. Étude par télédétection des écosystèmes urbains de l'agglomération de Limoges. Environnement - Syndicat de communes de Limoges, Paris, 78 p.

VILLE DE STRASBOURG, 1992. Urbanisation, évolution. CNES-Agence d'urbanisme de Strasbourg, Ministère de l'Équipement, Strasbourg, 13 p.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 207-212

20

Apport de l'imagerie multibande HRV de SPOT à l'étude de l'utilisation du sol de l'environnement urbain : cas de la ville de Blida (Algérie)

ALI BOUCHERIT, MALEK HÉMIS, MOHAMED DAOUDI et ABDELKADER ABDELLAOUI

Département de géographie, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El-Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie;
téléphone : +213 (2) 75-12-85; télécopieur : 213 (2) 76-43-11

Résumé

Le présent travail a pour objet l'analyse d'une partie de la scène HRV (XS) de SPOT englobant l'agglomération blidéenne et son environnement proche dans le but : 1) d'identifier les grands thèmes d'occupation de l'espace; 2) d'extraire la tache urbaine; 3) de caractériser les différentes composantes de l'espace bâti (densité, âge, types spécifiques, voiries, etc.). Plusieurs traitements ont été testés pour lever les multiples ambiguïtés de différenciation des thèmes particuliers à la nature de la zone (roche nue en altitude et bâti, terres en jachère et bâti, etc.). Les principaux traitements effectués ont consisté en des rehaussements d'images, filtrages, ACP, indices, analyse de contours, etc. Des résultats bien corrélés avec la réalité du terrain ont été obtenus : 1) la mise en évidence de la forte corrélation entre les canaux XS1 et XS2; la troisième composante de l'ACP, malgré sa faible contribution, a été utilisée pour faire ressortir certaines caractéristiques; 2) la délimitation de la tache urbaine; 3) l'identification de plusieurs classes de bâti en fonction de l'âge et de la densité; 4) l'identification des voies principales de communication; 5) l'identification de seuils de discrimination des artères et des voies de communication à l'intérieur et à l'extérieur du tissu urbain.

1. Introduction

L'agglomération blidéenne (ville de Blida et les foyers urbains satellites) est située sur une zone de contraste entre plaine (plaine de la Metidja, zone à l'origine essentiellement agricole) et montagne (piémont nord de l'Atlas blidéen) à proximité de la capitale (45 km). Cette double particularité géographique a induit une très forte croissance se traduisant principalement par un développement notable de l'activité commerciale et de l'activité industrielle (petite industrie et industrie de transformation), par une forte augmentation de la population avec un taux de croissance annuel moyen voisin de 4 % jusqu'au recensement de 1977 tel qu'illustré par la figure 1 (ABDELLAOUI *et al.*, 1994) et, enfin, par une extension du bâti à la fois accélérée et anarchique aux dépens des zones initialement agricoles; à titre d'exemple, 1 055 ha de terres agricoles ont été accordés à la construction entre 1979 et 1982, soit une extension de 260 ha/an; depuis 1982, la situation a encore empiré.

La diminution de la surface agricole utile ajoutée et la croissance de l'activité ainsi que de la population ont provoqué une augmentation de la demande en ressources (notamment hydroagricoles) et en même temps une réduction des surfaces exploitables. Cette situation rend vitale une gestion rationnelle de l'espace et des ressources par l'utilisation de moyens adaptés aux changements rapides du milieu naturel. Les outils dont disposent actuellement les services chargés de la gestion de l'espace ne leur permettent pas de produire des documents suivant de manière fidèle les changements si bien que les plans d'occupation et d'aménagement sont successivement et rapidement dépassés. Ce constat nous a amenés à commencer un projet d'évaluation de l'apport de l'imagerie satellitaire pour l'étude et la gestion de l'espace en zone particulière de transition montagne/plaine, d'une part, et des capacités locales à intégrer l'outil dans l'activité courante, d'autre part. La résolution élevée du capteur HRV ouvre en effet de nouveaux champs d'investigations, particulièrement dans le domaine urbain (FLOURIOT et GOSSO, 1987). En outre, l'utilisation d'algorithmes

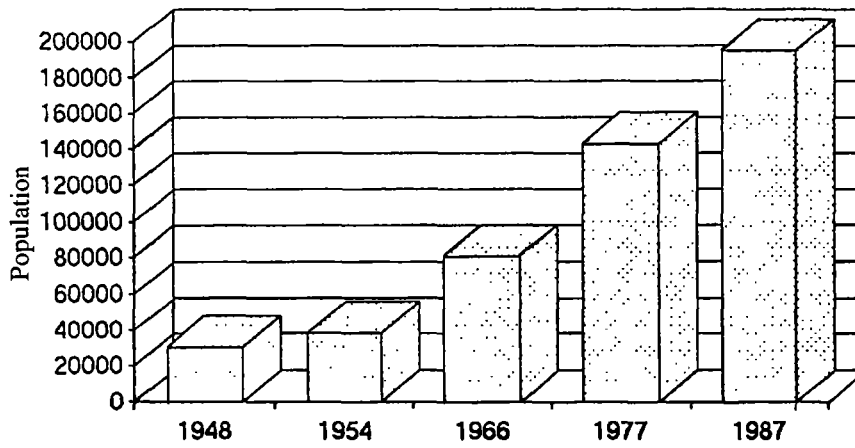


Figure 1. Évolution comparée des populations de Blida et Médéa entre 1948-1987 : une forte croissance de la population est observée après l'indépendance (1962) suite à l'immigration venant des villes limitrophes

appropriés permet de cartographier les grandes classes d'affectation (DEKEERSMAECKER *et al.*, 1987). Nous nous sommes intéressés dans le présent travail à l'étude de la tache urbaine et nous nous sommes fixés comme objectifs principaux : 1) la délimitation de la tache urbaine et son analyse intrinsèque; 2) l'estimation de l'apport de l'imagerie satellitaire pour cette analyse; 3) l'élaboration d'une chaîne spécifique de traitements; 4) l'essai de réalisation d'un modèle de système d'information urbaine pour notre zone d'étude. Nous avons utilisé pour cela une partie de la scène HRV de SPOT multibande de 1986 que nous avons combinée avec des photographies aériennes de la zone prises successivement en 1972 et en 1992 ainsi qu'à des cartes topographiques (1960) et des plans de la ville réalisés en 1916 et 1960. Ces documents sont complétés par une enquête terrain.

2. Méthodologie

2.1. Traitements préliminaires

Des traitements préliminaires classiques ont servi à préparer l'image : 1) pour la corriger géométriquement, nous nous sommes basés sur les travaux réalisés par DAOUDI (1994) sur l'Atlas blidéen; nous avons appliqué, par la suite, plusieurs algorithmes d'amélioration d'image, en particulier une transformation linéaire d'histogrammes qui nous a permis d'améliorer le contraste et pallier ainsi à la faible dynamique (fig. 2) due à la similitude relative des réponses spectrales des thèmes de cette zone de complexité particulière (ABDELLAOUI *et al.*, 1994); 2) des combinaisons de canaux (notamment composition colorée et analyse en composantes principales) et des masques de convolution ont été également appliqués à l'image multibande pour augmenter la probabilité de discrimination des thèmes.

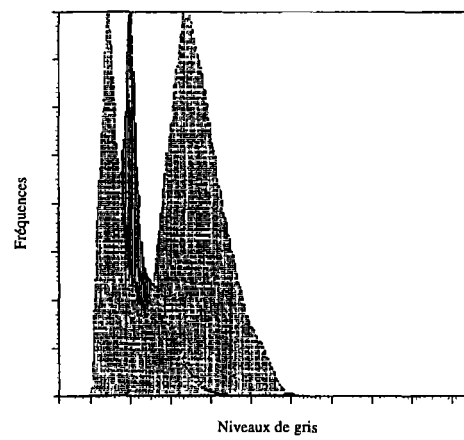


Figure 2. Histogrammes des trois bandes XS1, XS2 et XS3 : les réponses spectrales dans les trois canaux occupent un intervalle restreint

2.2. Traitement des divers documents

Une mise à la même échelle de tous les documents disponibles a été réalisée. Nous avons par la suite effectué une numérisation des cartes et plans en utilisant une table à numériser avec l'objectif de pouvoir comparer nos divers documents et estimer ainsi l'évolution de la tache urbaine sur la base de l'analyse de situations à différentes dates, sur une période significative, de 1961 à 1987 dans le cas présent.

La photographie aérienne a été analysée par les techniques classiques de photo-interprétation; elle a permis de préciser des éléments du paysage non visibles sur l'image satellitaire. Divers traitements ont été effectués sur l'image HRV, notamment l'application d'indices de végétation, des filtres spécifiques, une classification dirigée et un étalement dynamique des résultats de l'analyse en composantes principales. Des fichiers « vecteur » ont été réalisés pour identifier des structures particulières, notamment les grandes artères du complexe urbain, les lignes de chemin de fer, le réseau hydrographique et les limites de la tache urbaine. Une carte de synthèse de l'occupation de l'espace et une base de données, prélude au système d'information urbain sont enfin réalisées.

3. Résultats et discussion

L'analyse en composantes principales a confirmé la forte corrélation entre les divers canaux de l'image HRV et plus particulièrement les canaux XS1 et XS2 comme cela est montrée au tableau 1. La troisième composante ACP3 de l'analyse en composantes principales est très pauvre en informations (0,69 % de l'information totale) mais ne peut être négligée à cause de la spécificité de l'information apportée, en particulier, l'identification des grandes artères de la ville et la composition du centre-ville; ceci est montré sur la figure 20-3 (voir cahier couleur).

L'application de l'indice de végétation NDVI a permis de mettre en évidence les grands thèmes présents dans l'image : tache urbaine, végétation spontanée (forêt), végétation artificielle (culture, arboriculture) et réseaux (route, chemin de fer, oued); ces résultats sont précisés sur la figure 20-4 (voir cahier couleur). Nous noterons cependant les confusions entre certains thèmes (notamment surfaces bâties et terre nue) qu'il était difficile de lever à l'extérieur de la tache urbaine.

Pour préciser la tache urbaine, nous avons utilisé une classification dirigée basée sur la sélection de quatre échantillons pour chacun des thèmes principaux de l'image. Les réponses spectrales moyennes des quatre thèmes sont données sur le tableau 2 où nous montrons l'existence des plages de confusion plus prononcée pour les thèmes bâti et route d'une part, et, bâti et sol nu, d'autre part. Les données de la figure 5 confirment ce résultat.

L'application de l'indice de brillance nous a permis de préciser les zones d'activités (zone industrielle, zone d'activité spécifique) et l'emprise au sol de la tache urbaine. Enfin,

Tableau 1. Indice de corrélation des trois bandes XS1, XS2 et XS3

	XS1	XS2	XS3
XS1	1,000	0,975	0,095
XS2	0,975	1,000	0,015
XS3	0,095	0,015	1,000

Tableau 2. Plages moyennes des réponses spectrales des grands thèmes présents dans l'image : des confusions sont observées entre les thèmes bâti et route, bâti et terre nue

	XS1	XS2	XS3
Bâti	63-90	67-88	65-79
Végétation	42-53	28-41	100-140
Terre nue	59-76	58-77	71-100
Route	49-79	41-83	66-81

l'application d'un masque de convolution approprié nous a permis de distinguer différents types de constructions selon l'âge de celle-ci. Sur le tableau 3, nous récapitulons les différents thèmes et sous-thèmes mis en évidence.

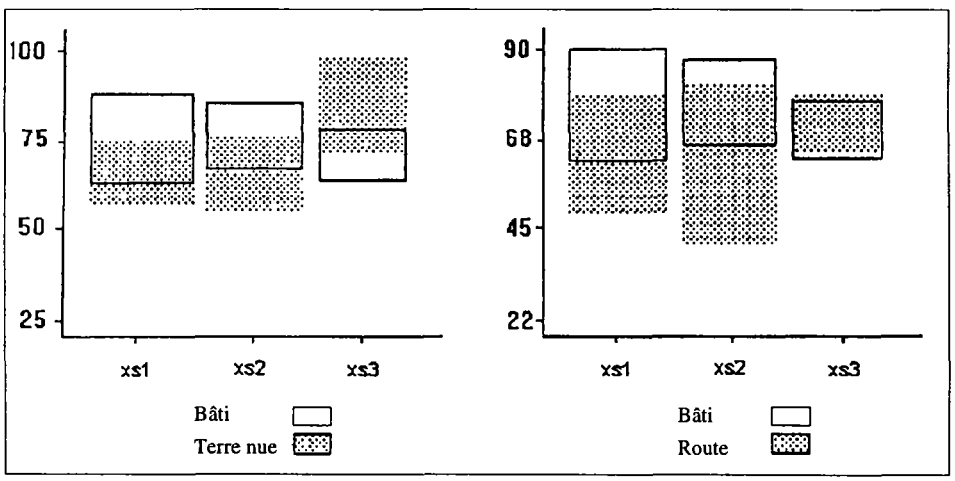


Figure 5. Représentation des signatures spectrales des grands thèmes : une confusion existe entre le bâti et la terre nue, le bâti et le réseau de voirie

4. Conclusion

L'utilisation de l'image multibande HRV de SPOT nous a permis, après essai de plusieurs algorithmes de traitement, d'extraire la tache urbaine avec une bonne précision. Cependant, la résolution de l'image XS ne nous semble pas suffisante pour distinguer les différentes composantes du tissu urbain et pousser plus loin nos investigations pour le cas particulier de notre zone d'étude. À l'extérieur de la tache urbaine, les divers traitements effectués sur l'image n'ont pas permis de lever totalement les confusions entre surfaces bâties isolées et terres nues. L'utilisation de l'image panchromatique devrait permettre de pallier à ces imprécisions.

Tableau 3. Thèmes et sous-thèmes retenus

Thème	Sous-thème
1. Emprise au sol	1.1. Forte emprise 1.2. Faible emprise
2. Tissu urbain	2.1. Tissu continu 2.2. Tissu discontinu
3. Habitat	3.1. Habitat collectif 3.2. Habitat individuel et semi-collectif
4. Age des constructions	4.1. Construction ancienne 4.2. Construction récente
5. Culture	5.1. Arboriculuture 5.2. Culture annuelle 5.3. Friche agricole
6. Végétation spontanée	6.1. Forêt dense 6.2. Forêt faiblement dense
7. Zone industrielle	
8. Zone d'activité spécifique	
9. Aérodrome	

5. Références

ABDELLAOUI, A., ROUGAB, A. et BENTRIA, B. 1994. Intégration de données multi-sources pour l'étude des paysages urbains : cas de l'agglomération blidéenne. Colloque international « Information géographique, télédétection et formation », Toulouse, 17-19 mai 1994.

DAOUDI, M. 1994. Étude de l'espace par utilisation des systèmes d'informations géographiques et les images satellitaires : application à l'Atlas blidéen (Algérie). Thèse de magister, Département de géographie et d'aménagement du territoire, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, 110 p.

DEKEERSMAECKER, M. L., JACQUES, P. et WILMET, J. 1987. Analyse de données multi-spectrales de SPOT relatives à une zone de contact entre deux régions géographiques de la Belgique méridionale. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Paris, novembre 1987, Cepaduès éditions, Toulouse, p. 637-646.

FLOURIOT J. et GOSSO, F. 1987. Croissance des grandes agglomérations tropicales. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Paris, novembre 1987, Cepaduès éditions, Toulouse, p. 499-504.

PARTIE III

Statistiques urbaines

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 215-224

21

La production rapide d'informations démographiques et économiques par sondage aréolaire sur une image satellitaire : application à trois villes de pays en développement (Quito, Bogota et Yaoundé)

FRANÇOISE DUREAU

Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), Ap.aereo 94647, Bogota 8, Colombie; téléphone : +57 (1) 212-92-04; télécopieur : +57 (1) 212-92-04; CÉ : fdureau@uniandes.edu.co

Résumé

Dans les villes des pays en développement, les techniques traditionnelles de la collecte démographique (recensements exhaustifs et enquêtes par sondage sur liste) se révèlent peu efficaces et difficiles à mettre en œuvre. Nous avons développé une méthode de production rapide d'informations démographiques et socio-économiques adaptée aux caractéristiques de l'urbanisation et aux moyens disponibles dans ces pays. Il s'agit d'un sondage aréolaire à 2 degrés (îlots et ménages), où l'image satellitaire sert à la définition et à la stratification de la base de sondage, ainsi qu'à la sélection d'un échantillon d'îlots répartis sur l'ensemble de la ville. Les trois exemples d'application (Quito, 1987; Bogota, 1993; Yaoundé, 1993) témoignent du caractère opérationnel et de l'efficacité de la méthode pour la production rapide de données de nature démographique, mais aussi économique, dans les villes des pays en développement ne disposant d'aucune base de sondage classique. Ils montrent également les modalités concrètes de sa mise en œuvre dans des contextes contrastés tant du point de vue des caractéristiques des villes étudiées, que des informations exogènes susceptibles d'optimiser le plan de sondage aréolaire stratifié à deux degrés sur une image satellitaire. Apportant des éléments de réponse aux problèmes posés par l'observation des populations des villes des pays en développement et l'ensemble des tâches pouvant être réalisé sur un micro-ordinateur, les sites potentiels d'application sont très nombreux.

1. Introduction

Dans les villes à croissance rapide du Tiers monde, la périodicité et la durée d'exploitation des recensements remettent largement en cause l'intérêt de cette source d'information pour le suivi des populations. Quant aux enquêtes par sondage, l'absence de base de sondage complète et à jour hypothèque le plus souvent leur réalisation et leur fiabilité. La rapidité des transformations urbaines et les déficiences de l'information de base rendent les populations de ces villes particulièrement difficiles à observer. Cette situation conduit à rechercher des systèmes d'observation originaux, adaptés aux formes d'urbanisation ainsi qu'aux contextes locaux d'information, et de moyens humains et financiers. C'est dans cette perspective que s'inscrit la recherche commencée en 1985 par une équipe de l'ORSTOM, et donnant lieu au développement d'une méthode opérationnelle de production rapide de données sur les populations urbaines intégrant l'information apportée par les satellites à haute résolution (DUREAU *et al.*, 1989). L'idée centrale est d'utiliser l'image satellitaire comme base de sondage et d'exploiter l'information sur l'occupation du sol fournie par l'image pour stratifier un plan de sondage aréolaire permettant de sélectionner un échantillon pour une enquête auprès des ménages. Les recherches effectuées de 1985 à 1987 dans les domaines de l'analyse des images satellitaires et des sondages aréolaires en milieu urbain ont permis de définir l'ensemble de la chaîne d'opérations nécessaire à la mise en œuvre d'un sondage probabiliste à partir d'images satellitaires et adaptée à la production rapide de données sur les populations des villes des pays en développement. Après une description générale de la méthode et des principales étapes à suivre dans le cas d'une ville disposant uniquement d'une image HRV de SPOT, trois exemples d'application montrent les modalités concrètes de sa mise en œuvre dans des contextes contrastés tant du point de vue des caractéristiques des villes étudiées (Quito, Bogota, Yaoundé), que des informations exogènes susceptibles d'optimiser le plan de sondage aréolaire stratifié à deux degrés sur une image satellitaire.

2. Description de la méthode de sondage aréolaire sur image satellitaire

Dans une ville ne disposant d'aucune base de sondage classique, la méthode développée par l'ORSTOM permet de sélectionner de façon rigoureuse, à partir d'une image HRV de SPOT, un échantillon de ménages, autorisant la production rapide de données relatives aux populations urbaines. La méthode d'échantillonnage consiste en un sondage aréolaire stratifié à 2 degrés : au 1er degré, les aires géographiques sélectionnées sont des îlots (pâtés de maisons); au 2^{e} degré, les unités enquêtées sont des ménages sélectionnés au sein de l'échantillon d'îlots. L'image satellitaire sert : 1) à la définition de la base de sondage : la limite urbaine est tracée sur l'image, à partir de l'information fournie par celle-ci; 2) à la stratification de la base de sondage : on améliore la précision des estimations démographiques en utilisant une information sur la morphologie des quartiers pour stratifier la base de sondage; une stratification selon la densité du bâti extraite d'une image HRV permet un gain de précision de 30 à 40 %; 3) à la sélection d'un échantillon d'îlots géographiquement répartis sur l'ensemble de la ville : en procédant à un tirage spatial systématique à l'aide d'une grille de points superposée à l'image satellitaire, on assure une bonne répartition géographique des îlots de l'échantillon sur l'ensemble de la ville; cette technique améliore de 20 à 30 % la précision des résultats.

Ce plan de sondage combine donc les avantages bien connus du sondage aréolaire et de la stratification (ARDILLY, 1994) et ceux apportés par le tirage spatial systématique des îlots. Sa mise en œuvre suppose de réaliser un certain nombre d'opérations (fig. 1), que nous allons examiner maintenant.

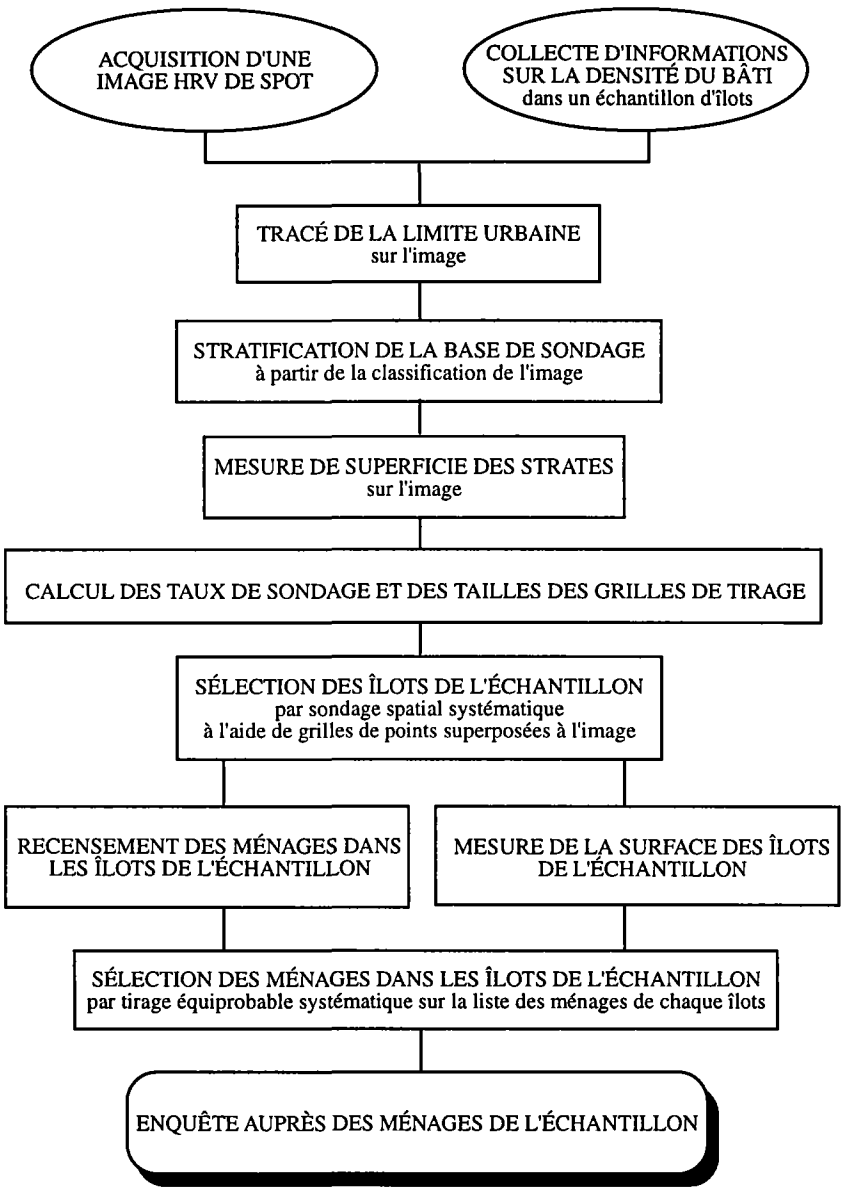


Figure 1. Les étapes de sélection de l'échantillon

2.1. Délimitation de la base de sondage sur une image satellitaire

Délimiter la base de sondage consiste à tracer la limite externe de la ville étudiée. Dans le cas où la base de sondage doit nécessairement correspondre à des limites administratives, le travail de délimitation de la base de sondage consiste uniquement à reporter le tracé de ces limites, connues par un document cartographique quelconque, sur l'image satellitaire. Par contre, si l'on adopte une définition physique de la ville, ce qui permet d'appréhender ainsi l'ensemble de l'agglomération y compris les quartiers périphériques illégaux, deux solutions peuvent être mises en œuvre pour délimiter la zone urbanisée :

- si l'on ne dispose que du film de l'image HRV (P), le tracé est réalisé sur un tirage photographique de cette image à une échelle comprise entre le 1: 30 000 et le 1: 15 000, en utilisant les teintes de gris de l'image, l'agencement général, la structure et la texture qui renseignent sur le degré de végétation ou de minéralisation (construction) et le type de tissu urbain; la limite est tracée là où se termine une zone continue d'espace bâti, en s'efforçant de suivre une limite (naturelle ou artificielle) visible sur l'image et sur le terrain;
- si l'on dispose, en plus, d'une bande magnétique HRV (XS), il est possible de réaliser un traitement numérique simple pour aider à la détermination de la limite urbaine, qui sera établie, comme précédemment, sur un tirage du canal P. L'objet de ce traitement est de classer l'image selon l'indice de végétation et le degré d'hétérogénéité des valeurs radiométriques (écart-type local); faisant l'hypothèse que la zone urbaine correspond à un espace à dominante minérale et fortement hétérogène, on peut ainsi isoler, numériquement, la zone urbanisée (fig. 21-2, voir cahier couleur).

2.2. La stratification de la base d'après une classification de l'image satellitaire

Parmi les stratifications actuellement réalisables à partir d'images satellitaires, la plus efficace pour une enquête socio-démographique correspond à une classification selon la densité du bâti. Cette classification, dirigée, est basée sur la recherche de la meilleure régression entre la densité du bâti observée sur le terrain dans une centaine d'îlots et l'indice de végétation calculé sur l'image; les cœfficients de la régression sont ensuite appliqués à l'ensemble de l'image. Après avoir seuillé ce néocanal en 3 à 6 classes, on dispose d'une classification de la zone urbanisée en fonction de ces niveaux de densité du bâti.

Une fois en possession de cette classification, il s'agit d'élaborer la stratification proprement dite, c'est-à-dire de délimiter des zones le plus homogènes possibles au regard des différentes classes de densité du bâti. Le zonage est effectué sur un tirage à grande échelle du canal P, en s'efforçant de suivre des frontières, naturelles ou artificielles, afin de ne pas couper les îlots qui constitueront l'unité de base de l'échantillon au premier degré (fig. 21-3, voir cahier couleur). Enfin, on mesure les zones ainsi délimitées, la superficie des strates étant une information nécessaire pour l'extrapolation des résultats de l'enquête.

2.3. Sélection de l'échantillon d'îlots

Le premier travail consiste à déterminer le nombre total d'îlots à enquêter et leur répartition dans les strates. Ce calcul nécessite de connaître la surface totale de chaque strate (mesurée sur image satellitaire), et la surface moyenne des îlots de la strate (connue d'après les relevés de terrain). Le tirage de l'échantillon d'îlots s'effectue ensuite indépendamment dans chaque strate à l'aide d'une grille placée sur le tirage à grande échelle du canal P, la maille de la grille étant calculée pour respecter le taux prévu. Pour obtenir la surface de la

maille de la grille de tirage dans chaque strate, il suffit de diviser la surface totale de la strate par le nombre d'îlots à sélectionner, d'où l'on déduit la taille de la maille. Sont sélectionnés les îlots correspondant aux points d'intersection de la grille (fig. 21-4, voir cahier couleur). Lorsque le type de quartier, et donc le degré de lisibilité de la voirie sur l'image rendent impossible une identification directe des îlots sur l'image, ce travail est réalisé directement sur le terrain avec le superviseur chargé de la zone.

2.4. Recensement des ménages, mesure de la surface des îlots et sélection des ménages à enquêter

Dans un premier temps, les superviseurs effectuent un recensement des ménages dans chaque îlot de l'échantillon : sur le terrain, ils établissent un schéma simplifié de l'îlot sur lequel figurent les renseignements nécessaires à son identification par l'enquêteur, le dessin des bâtiments, le nombre de ménages dans chacun des bâtiments et la numérotation des ménages. Après le recensement des ménages, le superviseur effectue la mesure de la surface de l'îlot, information indispensable pour l'extrapolation des données de l'enquête. À l'aide d'un décamètre, d'un clinomètre et d'une boussole, le superviseur établit un croquis mentionnant les angles et les longueurs de chaque segment droit délimitant l'îlot ainsi que leur pente; la surface est ensuite calculée, informatiquement ou manuellement, à partir de ce schéma.

Dans chacun des îlots de l'échantillon, on enquête un nombre constant de ménages (n_1, de l'ordre de 5 à 10), sélectionnés par tirage systématique sur la liste des ménages de l'îlot. Si un îlot compte moins de n_1 ménages, l'enquête est exhaustive, auprès de tous les ménages identifiés sur le croquis de l'îlot.

3. Modalités de mise en œuvre du plan de sondage dans des contextes contrastés

La démarche qui vient d'être décrite ne correspond qu'à l'une des modalités d'application de la méthode : il s'agit là de son application intégrale, correspondant au cas d'une ville ne disposant, pour la sélection d'un échantillon de ménages, que de la seule image HRV. Les trois exemples d'application de la méthode présentés ci-après, dont les principales caractéristiques figurent sur le tableau 1, témoignent du caractère opérationnel et de l'efficacité de la méthode pour la production rapide de données de nature démographique, mais aussi économique, dans les villes d'Amérique du Sud et d'Afrique. Ils montrent également les modalités concrètes de sa mise en œuvre, variables selon les informations exogènes susceptibles d'optimiser le plan de sondage aréolaire stratifié à deux degrés décrit au chapitre précédent.

3.1. Quito : sélection de l'échantillon à partir de la seule image HRV

Suite à deux années de développement méthodologique, une première application en vraie grandeur de la méthode s'imposait à la fin de 1987 pour vérifier son efficacité en termes de rapidité et de précision et pour évaluer les coûts de sa mise en œuvre. Un double objectif thématique a été assigné à l'enquête : d'une part satisfaire les besoins des décideurs en information démographique de base et, d'autre part, faire progresser la compréhension de

Tableau 1. Principales caractéristiques des trois applications de la méthode

Lieu	Quito (Équateur)	Bogota (Colombie)	Yaoundé (Cameroun)
Date	Novembre 1987	Octobre 1993	Janvier 1993
Thème de l'étude	Caractéristiques démographiques de base et migration	Formes de mobilité spatiale de la population et leur impact	Secteur informel
Univers d'étude	Ensemble de l'agglomération de Quito	11 zones de l'aire métropolitaine de Bogota : 7 dans le District et 4 communes périphériques	Ensemble de l'agglomération de Yaoundé
Système d'enquête	Enquête démographique à passage unique	2 enquêtes : 1: Démographique, deux passages à un an d'intervalle 2: Anthropologique sur un sous-échantillon de ménages de 1	2 phases : 1: Enquête emploi auprès des ménages 2: Enquête auprès des unités de production informelles
Structure plan de sondage	Sondage aréolaire stratifié à 2 degrés (îlots, ménages)	Sondage aréolaire stratifié à 3 degrés (îlots,logements,ménages)	Sondage aréolaire stratifié à 2 degrés (îlots, ménages)
Image satellitaire utilisée	Image HRV P et XS: juin 86	Image HRV P: janvier 93 et XS: octobre 92	Image HRV XS: février 92
Autres informations utilisées		Photos aériennes 1993 (1: 30 000) Cartes 1985 (1: 10 000) Indicateurs démographiques 1985 Stratification socio-éco. 1990	Mosaïque photographies aériennes 1991 (1: 15 000)
Base de sondage	Image P (1: 15 000)	Image P (1: 15 000) Dans 3 zones d'enquête: cartes	Mosaïque photographies aériennes
Limite urbaine	Images P et XS (analyse visuelle et classif.)	Images P et XS (analyse visuelle et classif.)	Mosaïque photo. et image XS (analyse visuelle et classif.)
Stratification	5 strates de densité du bâti (issues de la classif.image)	2 ou 3 strates (issues de l'image) Dans 5 zones d'enquête : 2 ou 3 strates	3 strates de densité du bâti (issues de la classif.image)
Échantillon enquêté	3 157 ménages, dans 426 îlots	1 031 ménages, dans 212 îlots	1 961 ménages, dans 331 îlots
Coût et durée	90 000 FF 9 mois	150 000 FF 10 mois	190 000 FF 10 mois

la dynamique démographique de la capitale équatorienne en focalisant l'enquête sur la question des migrations. En effet, en 1987, les institutions publiques intervenant sur le développement et la gestion de la ville ne disposaient que des résultats publiés du recensement de 1982, désactualisés et sans aucune désagrégation géographique. De plus, en dépit de l'importance du phénomène, l'information sur la migration vers et au sein de Quito était particulièrement déficiente.

Le processus de sélection de l'échantillon a reposé sur l'application intégrale de la méthode, en suivant les différentes étapes telles qu'elles sont décrites à la section 2. Afin de satisfaire la justification première de cette application, d'ordre méthodologique, pour l'échantillonnage, nous n'avons utilisé que l'image HRV (scènes P et XS de 1986) et les données sur la densité du bâti recueillies à la même date sur le terrain dans près de 200 îlots. L'échantillon enquêté comprend 3 157 ménages résidant dans 426 îlots répartis sur l'ensemble de la ville de Quito, y compris dans ses extensions illégales les plus récentes, puisque la limite de l'agglomération retenue pour le sondage correspond à un critère physique issu de l'image.

Cette première application a confirmé l'intérêt de la méthode, permettant de sélectionner de façon rigoureuse, à partir de la seule image HRV, un échantillon pour une enquête démographique. Outre la satisfaction des objectifs proprement méthodologiques, l'enquête a mis à disposition des ministères et de la Mairie une information actualisée et localisée sur les caractéristiques démographiques de la population quiténienne, les conditions d'occupation du logement, l'activité économique et la migration. La plupart des résultats produits correspondent au découpage en districts, division administrative utilisée par la Mairie pour ses opérations de planification et de gestion. En effet, avec cette méthode, il est possible de produire des résultats en fonction de différentes divisions géographiques, la seule limite résidant dans le degré de désagrégation autorisé par la taille de l'échantillon. Dans un contexte d'intensification sensible de l'intervention municipale, se traduisant par la définition en 1988 d'une série de projets d'envergure (création d'un District métropolitain, nouvelle réglementation urbaine, etc.), l'enquête est venue combler un manque important en matière d'informations socio-démographiques.

3.2. Bogota : des modalités d'application variables selon les quartiers

Bogota, métropole andine de près de 6 millions d'habitants est actuellement soumise à de rapides et profondes mutations. Une analyse fine des différentes formes de mobilité spatiale de la population (navettes, mobilités temporaires et définitives) et des transformations qu'elles entraînent dans les différentes zones de l'aire métropolitaine constitue un élément clef pour la compréhension de la dynamique démographique, et donc de la gestion, de la capitale colombienne. C'est à cet objectif qu'est consacré le programme de recherche mené par l'ORSTOM et l'Université des Andes depuis 1992. Cette recherche repose, entre autres, sur une enquête démographique à deux passages auprès de 1 000 ménages, réalisée dans certains quartiers de l'aire métropolitaine. Compte tenu de la problématique de l'étude, du budget disponible et des impératifs statistiques pour obtenir une représentativité acceptable des informations sur la mobilité, nous avons choisi de faire porter notre recherche sur 7 quartiers inclus dans le district de Bogota proprement dit, et sur 4 communes de la périphérie métropolitaine. Dans chacune de ces 11 zones qui composent l'univers de l'enquête statistique, l'échantillon de ménages a été sélectionné par application d'un plan de sondage aréolaire à 3 degrés (îlots, logements, ménages) sur une image satellitaire.

Toutes les images enregistrées à notre demande par SPOT Image étant affectées par la présence de nuages, nous avons dû retenir deux scènes enregistrées à 4 mois d'intervalle. Leur combinaison permet d'avoir une observation de l'ensemble de l'aire métropolitaine : une image P enregistrée en janvier 1993, et une image XS enregistrée en octobre 1992. Ce sont donc ces deux scènes qui ont fait l'objet des traitements décrits aux sections 2.1 et 2.2. Outre l'information satellitaire, nous nous sommes efforcés d'utiliser les informations exogènes susceptibles d'optimiser la sélection de l'échantillon.

Ainsi, pour les données sur la densité du bâti nécessaires à la classification de l'image, la collecte sur le terrain a été remplacée par une mesure directe sur une mosaïque de photographies aériennes de 1993. En effet, bien que la couverture géographique et les restrictions de diffusion de ce document interdisaient son utilisation comme base de sondage, nous avons pu néanmoins le consulter ponctuellement pour relever la densité du bâti sur une centaine d'îlots du District. Pour la stratification, dans cinq zones d'enquête situées dans le District, nous avons combiné la classification de l'image selon la densité du bâti, avec des données d'origine statistique et administrative, disponibles au niveau du secteur cartographique (division spatiale regroupant une vingtaine d'îlots) : d'une part, quatre indicateurs issus du recensement de 1985, relatifs à la taille du ménage, le type de logement et la migration, et, d'autre part, la stratification socio-économique en 6 niveaux établie par les services du District pour l'application d'une tarification différentielle des services publics. Enfin, dans trois zones d'enquête du District affectées par des nuages sur l'image P et correspondant à des quartiers consolidés n'ayant pas connu de changement dans le réseau de voirie au cours des dix dernières années, nous avons procédé à la sélection des îlots sur des cartes au 1: 10 000 du recensement de 1985.

À Bogota, les modalités d'application de la méthode ont donc varié selon les zones d'étude. Dans les municipalités périphériques ne disposant d'aucune information statistique, administrative ou cartographique, la sélection de l'échantillon a reposé intégralement sur la seule image HRV. Dans les quartiers consolidés du district de Bogota, bénéficiant d'un meilleur contexte d'informations exogènes, le degré d'utilisation de l'image a varié selon le type de quartier, sa dynamique actuelle et la qualité de l'image à notre disposition. Mais, il importe de souligner que, dans aucune des 11 zones d'étude, la sélection de l'échantillon n'aurait pu être réalisée sans le recours à l'image HRV. Alors que les mairies de Bogota et des communes périphériques, dont plusieurs ont un rythme d'accroissement supérieur à 8 % par an, étaient tenues d'élaborer leurs plans de développement locaux au cours du premier semestre 1995, le dernier recensement disponible datait de 1985. Dans ce contexte, on conçoit aisément l'intérêt que représentent les résultats de l'enquête, publiés en juin 1994, même s'ils ne concernent que certains quartiers de Bogota et des communes voisines.

3.3. Yaoundé : utilisation d'une image HRV et d'une couverture aérienne

Dans l'économie des pays du Tiers monde, le secteur informel joue un rôle essentiel. Les limites de l'approche traditionnelle ont conduit au développement d'une stratégie alternative pour mesurer l'activité de ce secteur non plus à partir d'une appréhension directe des établissements, mais à partir d'une enquête auprès des ménages. La méthode « consiste à sélectionner un échantillon d'unités de production à partir d'informations tirées d'une enquête auprès des ménages et portant sur l'activité des individus (phase 1). À ces unités de production on applique alors un questionnaire spécifique sur l'activité informelle (phase 2) » (COGNEAU et ROUBAUD, 1992). Bien évidemment, la qualité statistique des informations sur l'économie informelle ainsi produites est entièrement dépendante de la première phase, c'est-à-dire de l'enquête auprès des ménages.

Pour l'enquête sur le secteur informel à Yaoundé en 1992 (réalisée en coopération par la Direction de la statistique et de la comptabilité du Cameroun, et le groupement scientifique DIAL), le recensement de la population, déjà vieux de 5 ans, ne pouvait être utilisé comme base de sondage étant donné le rythme d'accroissement (7 % par an) de la capitale camerounaise, et c'est donc la méthode de sondage aréolaire qui a été retenue pour la sélection de l'échantillon de l'enquête auprès des ménages. Deux sources d'information ont été utilisées : une couverture aérienne de 1991 et une image HRV (XS) enregistrée trois mois plus tard, en 1992. Par rapport à la démarche décrite à la section 2, le canal P de HRV a été remplacé par la mosaïque de photographies aériennes dont disposait l'équipe. C'est sur cette mosaïque que les limites de l'agglomération et de chacune des trois strates (définies à partir des résultats des traitements appliqués à l'image XS : croisement indice de végétation normalisé et écart-type local calculé sur le canal 2; classification en niveaux de densité du bâti) ont été tracées et que l'échantillon d'îlots a été sélectionné. Comme à Bogota, la classification en niveaux de densité du bâti a reposé non sur une information recueillie sur le terrain, mais sur une mesure effectuée directement sur la mosaïque dans 31 îlots. Cette classification constitue l'unique information utilisée pour la stratification de Yaoundé. En effet, l'ancienneté et la non disponibilité des fichiers informatiques du recensement y rendaient impossible toute amélioration de la stratification issue de l'image par une donnée exogène telle que le taux de travailleurs indépendants dans la population active, solution *a priori* prometteuse suggérée par COGNEAU et ROUBAUD (1992) pour améliorer la stratification dans de futures enquêtes de ce type.

L'enquête emploi, consacrée aux conditions d'activité des ménages, a été appliquée à 1961 ménages, sélectionnés d'après ce plan de sondage aréolaire. Cette première phase a permis d'identifier 1 096 unités de production informelles, auxquelles a été appliquée la phase 2 de l'enquête, centrée sur les conditions de production et les résultats économiques des établissements. L'expérience de Yaoundé confirme l'intérêt de cette approche du secteur informel, que l'on considère le degré de couverture de ce secteur, ou la richesse des analyses permises par la mise en relation de deux unités centrales dans le fonctionnement du secteur informel, le ménage et l'unité de production. En terme de coûts, de délais ou de précision des estimateurs, la méthode de sondage aréolaire appliquée à Yaoundé se révèle tout à fait efficace : utiliser la télédétection aérienne et spatiale pour la sélection de l'échantillon de ménages permet ainsi d'étendre le bénéfice de cette nouvelle approche du secteur informel, aux villes ne disposant d'aucune base de sondage traditionnel pour la sélection d'un échantillon de ménages.

4. Conclusion

Source d'information sur l'occupation du sol, l'imagerie satellitaire peut aussi jouer un rôle déterminant dans le processus de production d'une information ayant trait au domaine du « social ». Avec la méthode présentée ici, que celle-ci soit appliquée uniquement sur une image HRV, ou en relation avec des informations exogènes, il est ainsi possible de produire rapidement des informations démographiques et économiques quantifiées et spatialisées sur l'ensemble d'une agglomération, y compris ses quartiers périphériques illégaux. Si cette méthode est d'ores et déjà opérationnelle, elle est aussi, bien évidemment, perfectible. La multiplication des applications dans des contextes urbains divers, et l'intégration des innovations que connaîtra la télédétection urbaine, notamment celles relatives à la hauteur et à l'agencement des bâtiments, contribueront à améliorer la solution actuellement proposée.

Avec des méthodes simples telles que celle décrite dans cet article, ne réclamant pas d'investissement lourd en formation ou en équipement, la télédétection satellitaire peut constituer le pivot de l'établissement de diagnostics approfondis des dynamiques spatiales et sociales des villes du Tiers Monde. Dans le contexte actuel d'urbanisation accélérée du monde en développement, mais aussi de constat d'échec de l'urbanisme occidental, de ses modes de diagnostic comme de ses modes d'action, c'est en termes de renouvellement de l'approche de la ville qu'il importe d'appréhender ce nouvel outil de connaissance du milieu urbain.

5. Références

ARDILLY, P., 1994. Les techniques de sondage. Éditions Technip, Paris, 389 p.

COGNEAU, D. et ROUBAUD, F. 1992. Utilisation de la télédétection pour l'élaboration du plan de sondage d'une enquête sur le secteur informel : le cas de Yaoundé. Stateco n° 71, Paris, INSEE, p. 5-26.

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, Collection Didactiques, ORSTOM, Paris, 40 p.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 225-237

22

Pour une autre approche de la délimitation urbaine : application à Strasbourg (France)

CHRISTIANE WEBER, JACKY HIRSCH et AZIZ SERRADJ

Laboratoire Image et Ville (URA 902 CNRS), Institut de géographie, Université de Strasbourg 1, 12, rue Goethe, 67000 Strasbourg, France;
téléphone : +33 (3) 88-45-65-21; télécopieur : +33 (3) 88-45-33-88
CÉ : chris@lorraine.u-strasbg.fr

Résumé

L'espace urbain voire l'unité urbaine est actuellement particulièrement délicat à délimiter, tant le concept lui-même est en mutation. Surface, réseau ou nœud de commutation, les tentatives de normalisation des définitions possibles ne sont guère aisées. L'objectivité peut cependant résider dans l'identification de l'empreinte au sol de l'entité urbaine et de son évolution. Les données satellitaires peuvent offrir une vision objective de cette marque et aider à l'élaboration de quelques principes de définition. L'application sur Strasbourg proposée ici, a été envisagée en complémentarité avec celle testée par une équipe de Liège. À partir d'une image panchromatique du HRV de SPOT, un cheminement méthodologique mêlant opérateur de texture sur fenêtre circulaire et morphologie mathématique, a permis l'obtention d'une enveloppe de l'espace urbain. Ce résultat, appelé zone morphologique urbaine (ZMU), a été analysé au travers de diverses méthodes de comparaison, notamment des courbes et des silhouettes de densité. Confrontée à l'agglomération des communes définie officiellement par l'organisme statistique français, l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), la réalité physique de l'extension urbaine a mis en évidence d'une part les effets de tropisme liés au choix des données initiales et d'autre part la variabilité qui est associée aux critères d'agglomération tant au niveau de la distance d'agglomération qu'à celui des populations concernées.

1. Introduction

Dans le cadre de l'action de recherche partagée « Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud », les différentes équipes (Strasbourg, Liège et Fribourg) ont orienté leurs travaux plus précisément en fonction de deux objectifs : la discrimination de l'espace urbain et sa délimitation.

Le second objectif correspond aux préoccupations actuelles de nombreux organismes nationaux ou internationaux, pour qui acquérir les possibilités de comparer l'ensemble des sites urbains (notamment en Europe), en tenant compte de critères communs, représente un enjeu important pour l'avenir. Les multiples définitions et les critères divergents qui s'appliquent dans l'un ou l'autre pays, ne permettent pas une appréhension commune de l'objet urbain.

« Quelle que soit la position théorique choisie, il reste pour les statisticiens, la difficulté de trouver des limites nettes pour identifier des entités territoriales cohérentes et pertinentes que ce soit en termes de seuil de taille, dans le continuum rural-urbain, dans l'espace, aux périphéries des villes ou encore dans le temps puisque les expressions démographiques et spatiales de l'urbanisation se modifient continuellement » (PUMAIN *et al.*, 1991).

Or les enjeux sont importants au moment où la compétition se fait plus vigoureuse pour attirer des activités et des investissements. Le libéralisme aidant, la ville et sa région tendent à se comporter comme un système entrepreneurial où, à chaque point positif de statistique, correspond un point d'investissement. Savoir se situer au sein d'un réseau de villes et pouvoir se positionner pour drainer appuis et moyens deviennent sous l'égide du principe de subsidiarité, un nouvel aspect de la culture urbaine.

Cet article présente une partie des investigations menées sur la délimitation urbaine au sein du groupe, chaque équipe appliquant des directions différentes pour définir les limites urbaines des agglomérations : Liège œuvrant à partir d'une classification dirigée, par exemple. Le cheminement proposé ici, qui correspond à une application uniquement fondée sur la mise en évidence de l'enveloppe urbaine à partir d'une image panchromatique du HRV de SPOT, a aussi été appliqué à Genève et à Liège afin de déterminer les conditions de transférabilité de la méthode. Les opérateurs de texture puis de morphologie mathématique utilisés ont permis son individualisation et la constitution de la zone morphologique urbaine en tenant compte de plusieurs critères : la distance d'agglomération mais aussi les choix possibles quant à la place des infrastructures dans ce processus. Une série de cartes permet aussi de rendre compte de la variabilité des résultats selon les critères de population et de surface utilisés.

2. Définition de l'agglomération urbaine

Les organismes chargés de fournir des renseignements démographiques ou économiques ont donc pour tâche délicate la collecte des informations à fournir aux divers intéressés, si possible sous des formes comparables. Or, pour ce faire, il faut définir les villes selon des critères reconnus tant spatiaux que sociaux. Cependant, si les villes européennes peuvent se caractériser par un développement radioconcentrique commun, elles ne sont pas pour autant comparables. Administrativement les définitions sont très disparates : une ville en France a au moins 2 000 résidants, une unité urbaine est un regroupement statistique, une communauté urbaine est le résultat d'une décision politique, une zone de peuplement industrielle et urbaine (ZPIU) est un agglomérat d'activités résidentielles et de production.

Les critères utilisés pour rendre opérationnel quelque chose d'aussi fondamental que le concept d'agglomération, deviennent rapidement sujets à des critiques. Parce que la société continue son évolution, la pertinence des représentations associées aux critères et aux aires considérées est soumise à des fluctuations temporelles. Une des grandes difficultés est de prendre en compte la ville, objet intrinsèquement dynamique, avec des outils nécessairement statiques, par besoin de stabilité et d'économie de moyens, alors que les processus de changement exigeraient une adaptation quasi-interactive. En Europe, seuls les Pays-Bas révisent la trame des municipalités presque chaque année.

Plusieurs études ont donc tenté de définir des descripteurs communs permettant d'établir une première classification (PUMAIN *et al.*, 1991) :

- des localités urbaines définies par des limites administratives;
- des agglomérations urbaines (ou unités urbaines) plus ou moins étendues, centrées sur un noyau urbanisé bâti en continu et correspondant ou non, à des entités; elles se caractérisent par un continuum urbain-rural, sans qu'une limite franche ne puisse être désignée;
- des régions urbaines où un ou plusieurs centres jouent le rôle d'attracteur au sein de leur zone d'influence, drainant population, activités, souvent définie par les commutations journalières;
- des conurbations ou régions urbaines polynucléaires qui s'égrènent sur des étendues bâties en continuité, mais avec plusieurs centres qui résultent de la réunion de plusieurs agglomérations ou régions urbaines.

À partir de là, deux principes peuvent être mis en avant pour prendre en compte la définition de l'agglomération et de sa population : la détermination administrative des bases territoriales et la caractérisation spatiale de celles-ci.

Dans le premier cas, les disparités sont très importantes, que ce soit en fonction de la surface ou de la population résidante. Si beaucoup de pays européens ont procédé à des remaniements de maillages municipaux, quelques-uns n'ont favorisé que des regroupements mineurs, même si la tendance à une adaptation entre espace de vie quotidienne et gestion territoriale est de plus en plus présente. Les seuils de population définissant la notion d'urbain sont très variables.

Dans le second cas, les changements induits par le développement des infrastructures et des moyens de transport ont entraîné la dissociation entre territoire municipal (limites administratives) et la ville ou l'agglomération urbaine de population. La détermination de cette entité est dès lors définie en fonction de l'aire de bâti continu existant autour d'un centre. Elle est le creuset privilégié d'interactions entre la population et les activités diverses possibles. Cette aire de bâti continu est, bien entendu, aussi caractérisée par une population (au minimum entre 50 à 1 000 habitants selon les pays) et par une distance minimale de jonction précisant la continuité spatiale (celle-ci varie de 50 à 200 m) (PUMAIN *et al.*, 1991)

Une étude financée par EUROSTAT (Office statistique des communautés européennes) (EUROSTAT, 1993), a permis de mettre en évidence l'intérêt d'une approche de délimitation de l'agglomération urbaine à partir de données satellites. Les organismes statistiques nationaux participant à cette expérimentation ont pu comparer les résultats, acquis par des procédures automatiques de traitement d'image couplées à des manipulations au sein d'un système d'information géographique (SIG), aux moyens employés habituellement comme l'interprétation de photographies aériennes. Les applications ont toutes été faites à partir d'images multibandes fusionnées ou non avec des données panchromatiques du HRV de SPOT. La zone morphologique urbaine (ZMU), obtenue à l'aide de classifications dirigées, correspond à la surface bâtie en continu qui a été retenue après traitement. Dans le cadre de nos travaux communs, l'équipe de Liège (Laboratoire SURFACES) a appliqué

son modèle de potentiel à partir d'un tel résultat. Nous avons, pour notre part, testé l'extraction de la ZMU à partir de traitement de texture et de morphologie urbaine sur un canal HRV (P). Cette approche a aussi été appliquée à Liège et Genève.

3. Extraction de la ZMU de l'agglomération strasbourgeoise

L'utilisation du canal panchromatique du capteur HRV permet d'identifier l'espace urbain en tenant compte des ruptures entre le bâti continu et son hinterland et des éléments qui structurent cet espace bâti par les motifs engendrés (zones homogènes, ruptures anthropiques ou naturelles, etc.). Les possibilités d'extraction des structures urbaines à partir de ces données paraissent suffisamment opérationnelles pour que seule l'empreinte au sol ou tache urbaine soit retenue dans notre démarche et non pas uniquement la différenciation spatiale liée aux catégories d'occupation du sol.

L'image HRV (P) du 15-09-1986 (KJ : 50-252; niveau : 2B) (fig. 1) utilisée a permis d'individualiser la surface urbaine et ainsi d'en déterminer l'enveloppe. Cet objectif se combine aussi à la nécessité de comparaison spatiale et statistique entre les résultats obtenus, tout d'abord avec d'autres approches privilégiant l'établissement de l'enveloppe à partir des résultats d'une classification dirigée, et ensuite avec l'espace administratif reconnu par les organismes de recensement tel l'Institut national de statistique et des études économiques (INSEE – France) afin d'en analyser les divergences.

L'extraction de l'enveloppe urbaine a été menée en fonction de l'aire de bâti continu identifiable. Plusieurs étapes ont été appliquées pour dégager la tache urbaine, puis définir la ZMU et enfin comparer les résultats obtenus avec l'agglomération administrative définie par l'INSEE.

3.1. Première étape : individualisation du bâti continu

L'identification de l'empreinte urbaine a été réalisée à partir d'une convolution selon une fenêtre glissante afin de rehausser les sauts qualitatifs permettant le renforcement des zones bâties. L'opérateur « context » utilisé ici, correspond à un algorithme de détermination de texture sur niveaux de gris, selon une fenêtre circulaire 7 x 7 (afin d'optimiser la cohérence des contiguïtés d'ordre 8).

3.2. Deuxième étape : les critères statistiques définissant la ZMU

Pour isoler la tache urbaine il a été nécessaire de diminuer au maximum les risques d'introduction d'artefacts induits par la présence d'éléments de l'image, étrangers à la tache urbaine telles les variations du parcellaire ou encore des éléments structurant l'espace aux abords de la ville mais qui, dans un premier temps, ne sont pas considérés comme faisant partie de celle-ci telles les infrastructures autoroutières. On peut toutefois se demander si les réseaux de transport qui jouent actuellement un rôle essentiel dans les rapports entre le centre urbain et les communes qui l'entourent, ne sont pas des éléments de définition de l'enveloppe urbaine.

Plusieurs traitements ont été combinés (fig. 2) afin de poursuivre nos objectifs.

Une binarisation de l'image par seuillages auxquels se sont ajoutés des traitements de morphologie mathématique (érosions et dilatations successives) pour obtenir un agrégat

Figure 1. Image HRV (P) de SPOT du 15-09-1986 de la Communauté urbaine de Strasbourg

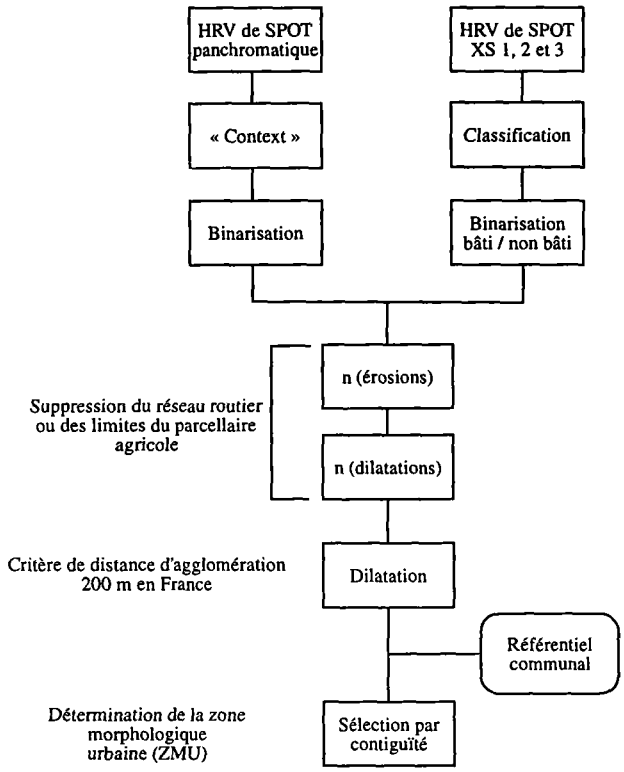


Figure 2. Schéma des procédures méthodologiques

cohérent. Le résultat a été soumis à une série d'érosions-dilatations (en nombre identique) afin d'éliminer ou de diminuer l'impact des artefacts notamment ceux introduits par les réseaux de communication (fig. 3).

Une dilatation du résultat a été faite ensuite pour déterminer une enveloppe urbaine qui tienne compte de la distance d'agglomération. Cette extension correspond dans notre cas à la distance légale de continuité utilisée en France (200 m). Cette distance déterminée par l'INSEE ne tient pas compte des infrastructures, sauf si celles-ci peuvent être considérées comme « élément de jonction », auquel cas leur taille est prise en compte pour mesurer la distance entre les agrégats de bâti (fig. 4).

Dans le cas de l'utilisation du canal panchromatique, il est évident que la distinction ne peut être faite, aussi avons nous considéré, comme ASHER (1995), que les infrastructures « participent à la transformation des systèmes urbains et facilitent l'émergence des îles de l'archipel de la métropole » et de ce fait considéré ceci comme un postulat. La détermination des communes pouvant être intégrées à l'agglomération dépend dans de nombreux pays de critères variés (population active, migrations alternantes, pourcentage d'activités dans la ville centre, etc.). Dans notre application nous avons retenu deux critères associés à la définition de l'agglomération urbaine se rapprochant de la définition légale : la population considérée et le pourcentage de la surface bâtie par rapport à la surface totale de la commune.

En France, une commune est déclarée comme une ville, si elle a au moins 2 000 habitants et l'affectation à une agglomération urbaine dépend de ce critère. « Lorsque

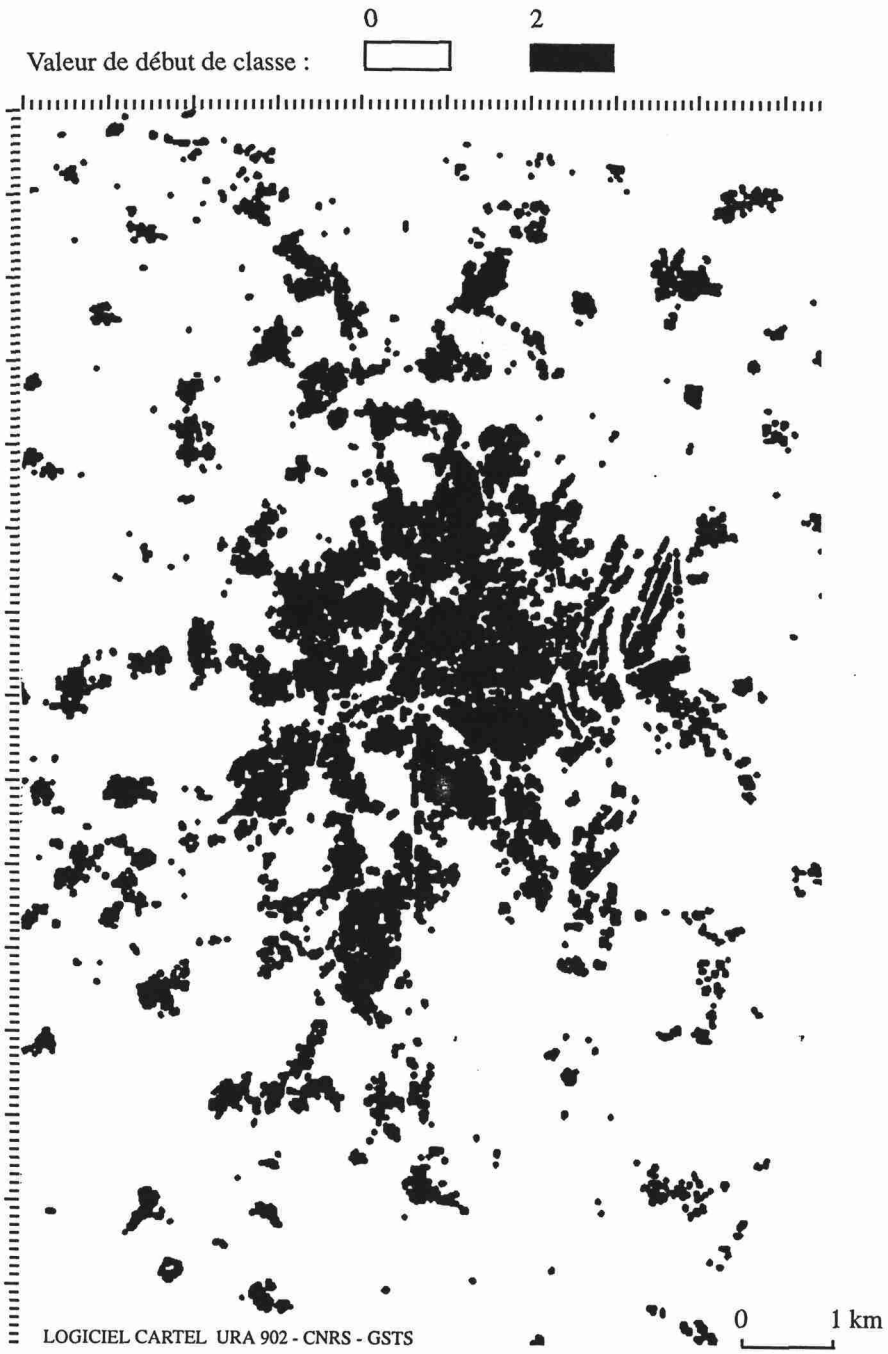


Figure 3. Image traitée par l'opérateur « context »

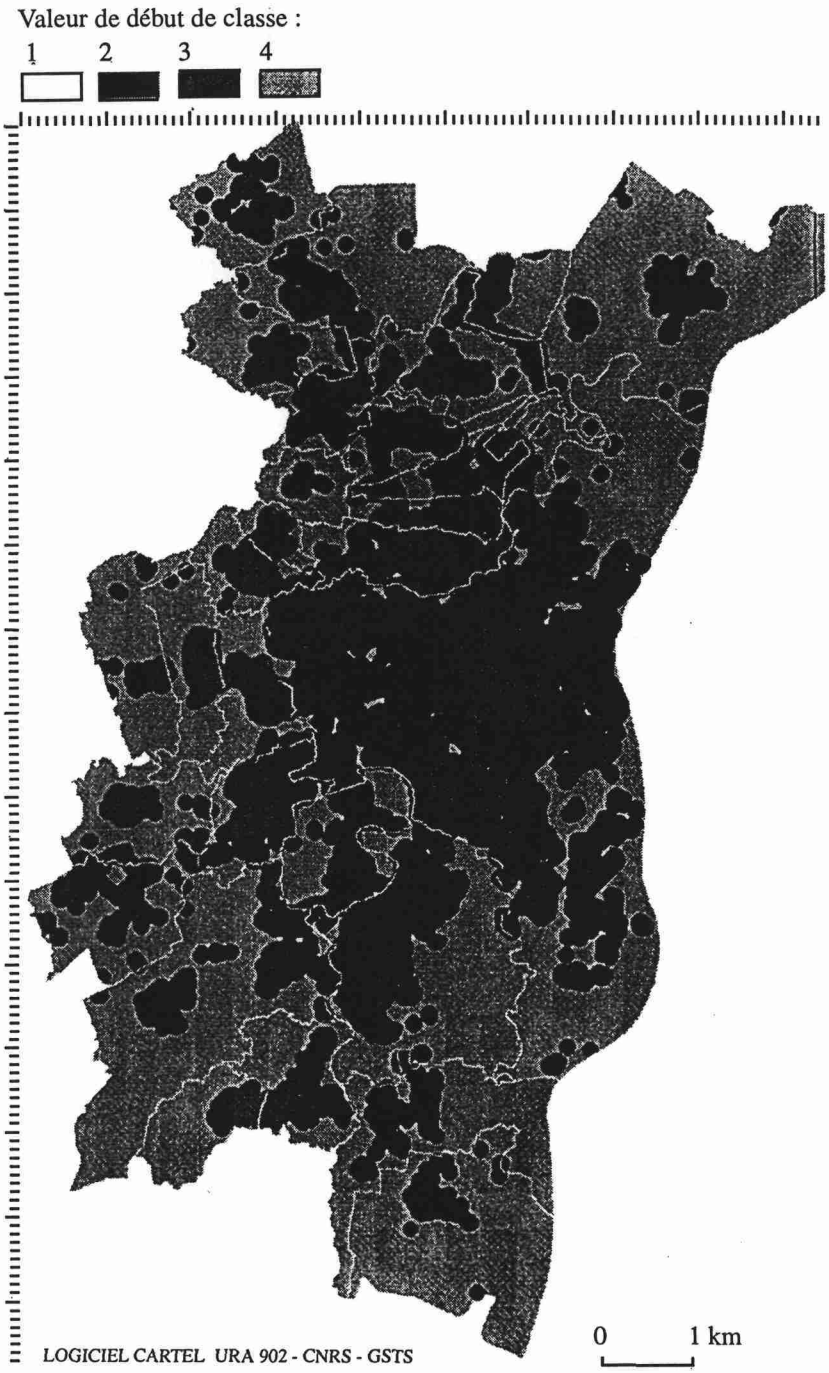


Figure 4. Image « context » plus les opérations de dilatation à 200 m

l'agglomération s'étend sur plusieurs communes, on délimite des agglomérations multicommunales en identifiant sur le territoire toutes les zones bâties qui représentent au moins 2 000 habitants. Parmi les communes réunies, toutes celles dont l'agglomération de population représente moins de la moitié de la population totale de la commune sont éliminées » (INSEE).

Une des difficultés réside dans l'impossibilité où nous sommes de dénombrer la population dans les communes où les noyaux de population sont éclatés et donc où la proportion de population résidant dans le noyau principal est supérieure ou égale à la moitié de la population totale. Le seuil du pourcentage de surface bâtie (± 50 %) a donc été introduit pour tenir compte d'une proportion potentielle de population sur les zones bâties continues. Ceci correspond aussi aux critères des expérimentations faites dans le cadre de l'étude EUROSTAT. Un tableau résumant les différents critères a été établi pour chaque commune de la Communauté urbaine de Strasbourg (CUS) (tab. 1).

3.3. Troisième étape : la cartographie des différents résultats et la comparaison avec la définition statistique officielle de l'INSEE

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par la combinaison de l'enveloppe urbaine et des critères utilisés pour la définition de l'agglomération, nous avons établi une liste de variantes (fig. 5) nous permettant de caler les résultats quelle que soit l'approche considérée (à partir d'une image HRV (P) ou du résultat d'une classification) selon les critères retenus pour l'établissement de l'agglomération. Ceci a conduit ensuite à la cartographie des résultats obtenus et à la mise en évidence de divergences parfois importantes par rapport à la définition administrative retenue pour Strasbourg. Les variations induites par ces critères concrétisent la difficulté qui peut exister quant à l'application de seuils de population ou de surface. Elles mettent en évidence la difficulté à fournir un seul référentiel, qui puisse être applicable de manière générale.

4. Résultats

Cette expérimentation a permis d'envisager une autre approche permettant la discrimination de la ZMU. Les résultats ont permis de visualiser très nettement les différences liées aux critères choisis. Ainsi, la figure 6 montre l'emprise que peut avoir l'agglomération selon le critère choisi.

On remarque que les agrégations correspondant aux critères 2 (communes intégrées dans la ZMU) et 6 (communes dites « urbaines » selon le seuil de population), fournissent des silhouettes de l'agglomération qui se différencient selon la surface de la ZMU obtenue. Compte tenu du pourcentage de surfaces bâties (totale, critère 3 ou ZMU, critère 5), les résultats ne sont pas identiques non plus, les bans communaux où la surface de forêts ou de terres agricoles est importante, se trouvent exclus de l'agglomération. Par contre, si l'on compare la contiguïté administrative et la ZMU intégrant les communes ayant plus de 50 % de surfaces bâties incluses, alors il y a similarité.

Comparés à la définition officielle de l'agglomération, les résultats obtenus divergent. Deux types de causes peuvent être avancés pour expliquer les différences : d'une part, le calcul de surface bâtie ZMU par rapport à la surface bâtie totale, dans le cas de Vendenheim les surfaces commerciales ont joué un rôle important; d'autre part, l'INSEE n'a pas retenu, contre toute attente, le seuil des 2 000 habitants pour l'agglomération de communes. Les

Tableau 1. Critères permettant la délimitation de l'agglomération urbaine de Strasbourg

N°	Localité	Critère *					
		1	2	3	4	5	6
43	Bischheim	1	1	1	1	1	1
118	Eckbolsheim	0	1	0	1	1	1
119	Eckwersheim	0	0	0	1	0	0
124	Entheim	0	0	0	1	0	0
131	Eschau	0	0	0	0	0	0
137	Fergersheim	0	0	0	0	0	0
152	Geisolsheim	0	1	0	1	1	1
204	Hoenheim	1	1	1	1	1	1
212	Holstzheim	0	0	0	1	0	1
218	Illk.-Graffenstaden	0	1	0	1	1	1
256	Lampertheim	0	1	0	1	1	1
267	Lingolsheim	1	1	1	1	1	1
268	Lipsheim	0	0	0	0	0	0
296	Mittelhausbergen	0	1	0	1	1	0
309	Mundolsheim	1	1	1	1	1	1
326	Niederhausbergen	0	0	0	0	0	0
343	Oberhausbergen	0	1	0	1	1	1
350	Oberschaeffolsheim	0	0	0	0	0	0
365	Ostwald	1	1	1	1	1	1
378	Plobsheim	0	0	0	0	0	0
389	Reichstett	1	0	0	1	0	1
447	Schiltigheim	1	1	1	1	1	1
471	Souffelweyersheim	1	1	1	1	1	1
482	Strasbourg	1	1	1	1	1	1
506	Vendenheim	0	1	0	1	1	1
519	Wantzenau	0	0	0	0	0	0
551	Wolfisheim	0	1	0	1	1	1

* Critère

1 Commune ayant plus de 50 % de surface bâtie
2 Commune intégrée dans la ZMU
3 Commune ayant au moins 50 % de surface totale occupée par la ZMU
4 Commune contiguë administrativement
5 Commune ayant plus de 50 % de surface bâtie inclue dans la ZMU
6 Commune contiguë administrativement et ayant plus de 2 000 habitants

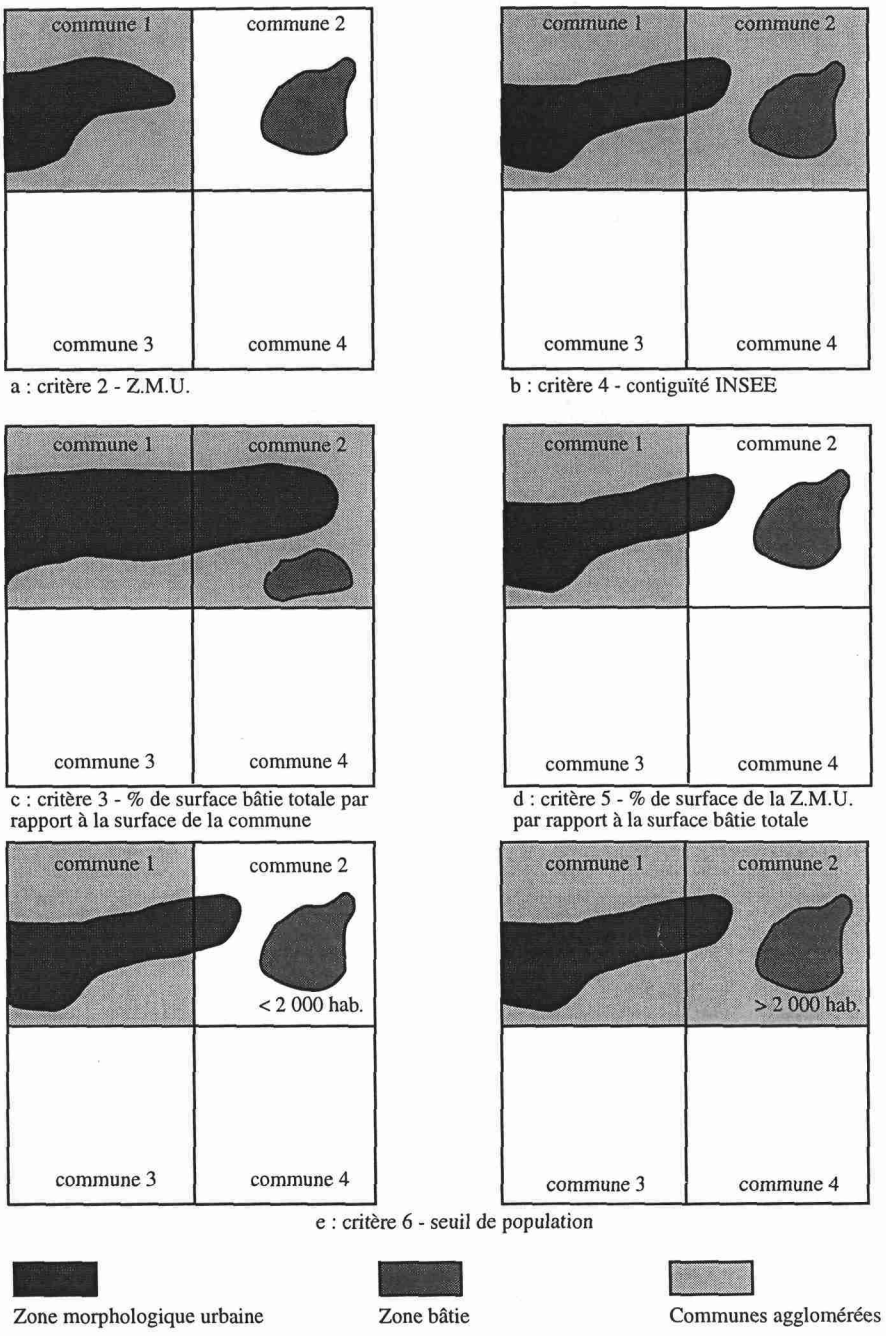


Figure 5. Schéma des variantes d'agglomération de communes selon les critères choisis

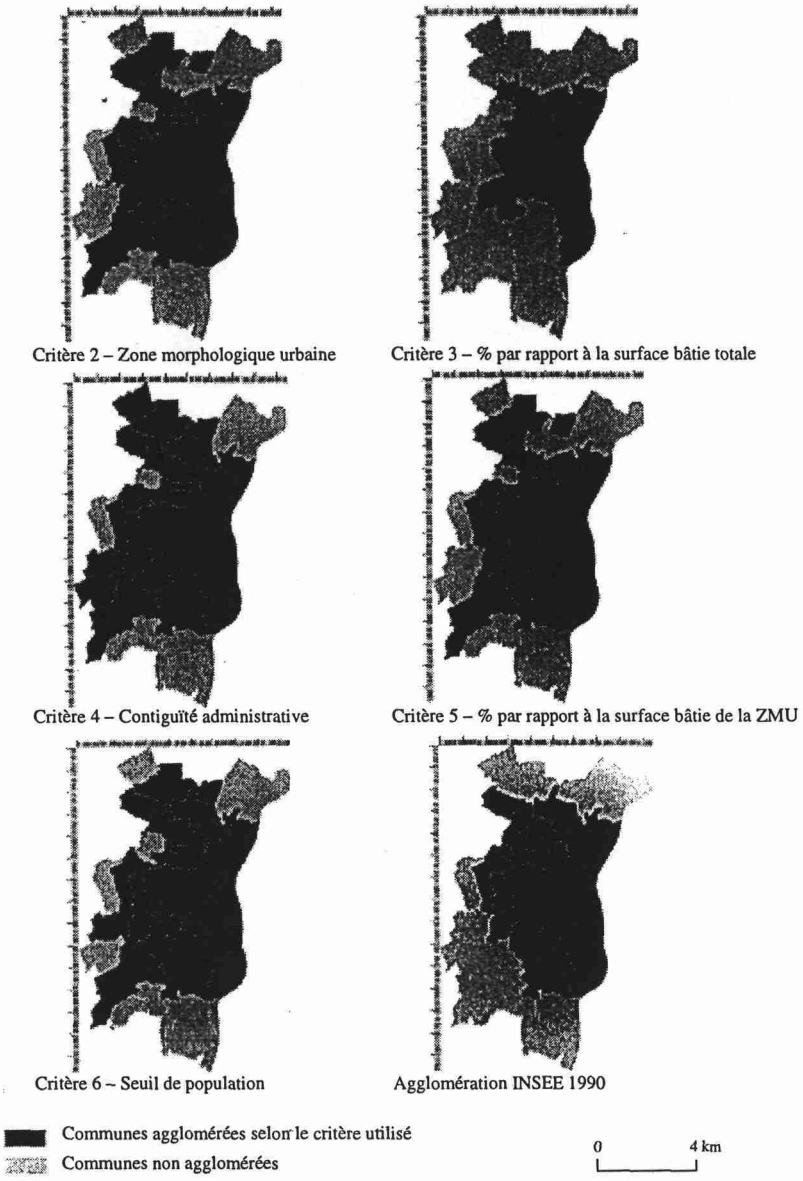


Figure 6. Images de l'agglomération avec plusieurs variantes

points litigieux de jonction proviennent essentiellement de zones où se mêlent quelques zones d'habitat à des aires commerciales et industrielles, ainsi que des surfaces d'infrastructure intégrées dans la tache urbaine (autoroute urbaine, voie de contournement) qu'il n'est pas possible d'isoler par traitements. Les continuums ainsi identifiés permettent la prévision de futures aires de développement par densification et extension.

La promotion de nouveaux outils d'aide à la détermination de l'entité urbaine statistique correspond à l'adéquation entre dynamisme urbain et rigueur de collecte d'informations. Déjà utilisée comme base de sondage stratifiée (DUREAU, 1990), la zone urbaine peut aussi être intégrée dans les modèles de densité. Surface de référence pour des représentations densimétriques, elle offre des possibilités de développements ultérieurs dans la modélisation et l'analyse urbaine (WEBER, 1992, 1995a; DONNAY, 1994).

La comparaison avec les résultats dus à l'approche utilisant des données multibandes s'avère intéressante car il est clair qu'il n'y a pas similarité totale des résultats pour la détermination de la ZMU (WEBER, 1995b). L'enveloppe urbaine ainsi dessinée présente là aussi selon les critères retenus des disparités importantes qu'il semble nécessaire d'analyser avant de pouvoir proposer telle ou telle approche aux organismes statistiques. Peut-être que la complémentarité d'une image radar (ERS-1) apporterait une information supplémentaire, notamment en ce qui concerne les zones de transition pavillonnaires, comme cela semble être le cas dans une expérimentation en cours.

5. Références

ASHER, F. 1995. Métapolis ou l'avenir des villes. Ed. Odile Jacob, 345 p.

DONNAY, J.-P. 1994. Agglomérations morphologiques et fonctionnelles, l'apport de la télédétection urbaine. Acta Geographica Lovaniensia, vol. 34, p. 191-199.

DUREAU, F. 1990. Sondages Aérolaires sur Image Satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain. Collection DIDACTIQUES, ORSTOM, 15 fiches.

EUROSTAT. 1993. Télédétection et statistiques urbaines. Programme Télédétection, Luxembourg.

PUMAIN, D., SAINT-JULIEN T., CATTAN, N. et ROSENBLAT, C. 1991. Le concept statistique de la ville en Europe. EUROSTAT, Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg, thème 3, série E, 89 p.

WEBER, C. 1992. Traitement de l'information satellitaire et modélisation urbaine : contraintes de discrimination et reproductivité. Programme national de télédétection spatiale - 90N50/0074 CNES/CNRS, 102 p. + annexes.

WEBER, C. 1995a. Limites urbaines et processus d'urbanisation. Programme national de télédétection spatiale - 94N50/0158 CNES/CNRS, 30 p. + figures.

WEBER, C. 1995b. Télédétection des milieux urbains et périurbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. Rapport d'activité de l'action de recherche partagée de l'AUPELF-UREF, X/1.20.04/01/94.18.0, 55 p. + 16 figures.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 239-246

23

Détermination des limites d'agglomération par télédétection : discussion méthodologique et application au cas de Huy (Belgique)

JEAN-PAUL DONNAY et MICHEL LAMBINON

Laboratoire SURFACES, Université de Liège, Place du 20-Août, 7, 4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (4) 366-54-24; télécopieur : +32 (4) 366-56-93; CÉ : surfaces@geo.ulg.ac.be

Résumé

Un souci majeur de divers pays européens, et de l'Union européenne elle-même, est de mieux appréhender l'agglomération urbaine et de définir des unités de recensement comparables (PUMAIN *et al.*, 1992). L'étude qui est illustrée ici propose une méthode qui délimite l'agglomération sous ses diverses formes et qui permet d'en évaluer l'importance selon divers critères, tels que l'emprise bâtie ou la population résidante. Elle se base sur la recherche de l'emprise du bâti et de sa continuité, trait physionomique majeur de l'urbanisation. Pour ce faire, plusieurs traitements de morphologie mathématique sont appliqués à une image satellitaire classée selon les modes d'occupation du sol. L'image résultante est ensuite adaptée aux limites administratives, mais aussi aux limites de recensement, pour répondre aux différentes définitions de l'agglomération. Par conséquent, dans le cadre d'une seule démarche, il est possible, non seulement de délimiter les agglomérations urbaines, mais aussi de vérifier la cohérence du découpage en entités de recensement et de poser les conditions de sa tenue à jour. Cette démarche a été mise au point à l'occasion d'une étude méthodologique préliminaire, réalisée pour l'agence européenne de statistique (DONNAY, 1993) et elle a été appliquée dans le cadre d'une étude de faisabilité, réalisée à la demande de l'Institut belge de statistique (I.N.S.) et financée par les Services fédéraux scientifiques, techniques et culturels (S.S.T.C.) de l'État belge (LAMBINON, 1995). Plusieurs agglomérations urbaines, réparties sur l'ensemble du territoire national et relevant des différents niveaux de la hiérarchie urbaine (de la métropole, à la petite ville), ont fait l'objet d'une telle analyse.

1. Concepts et données

1.1. Préambule

L'étude se propose de répondre simultanément à deux interrogations. D'une part, la question est de savoir si la télédétection satellitaire, et en particulier le traitement des données enregistrées par les satellites de seconde génération, est en mesure de délimiter l'agglomération urbaine et ses diverses formes d'expression. Une telle potentialité intéresse tout spécialement les agences et bureaux d'études amenés à comparer l'information urbaine au niveau supranational, le plus souvent en l'absence de définitions, de critères et de mises à jour communs. En outre, vis-à-vis des distributeurs de données satellitaires, une telle application peut offrir une opportunité nouvelle de marché. D'autre part, il s'agit de vérifier s'il est possible, au moyen des mêmes informations initiales, de proposer un découpage du territoire en unités de recensement, ou une mise à jour d'un découpage existant, capable de traduire la réalité des milieux urbanisés. Une telle possibilité intéresse au plus haut point les agences nationales, voire locales, ayant soit la statistique, soit l'urbanisme et l'aménagement du territoire dans leurs attributions.

Il semble opportun de définir *a priori* ce qu'est l'agglomération urbaine. En Europe, PUMAIN *et al.* (1992) ont montré combien ces définitions varient et combien les critères manquent d'uniformisation. Parmi ceux-ci, le nombre d'habitants et la distance maximale entre les éléments bâtis, soit l'idée de continuité bâtie, apparaissent systématiquement comme des facteurs décisionnels de la délimitation d'agglomération, mais avec des seuils divers.

La présente étude étant limitée à la Belgique, ce sont tout naturellement les critères belges qui sont retenus. Leur application est illustrée ici par les résultats obtenus sur une des zones-témoins sélectionnées dans l'étude de faisabilité réalisée à la demande de l'I.N.S. belge. Néanmoins, l'étude cherche à favoriser une méthodologie limitant le recours à des contraintes locales, et susceptible d'être appliquée indifféremment à plusieurs États.

1.2. Choix de la zone-témoin

La zone-témoin de la ville de Huy a été jugée significative des différents problèmes rencontrés dans l'application de la méthodologie, pour illustrer cette communication. Son agglomération doit son plan particulier à la présence de la vallée de la Meuse. Au nord comme au sud, la plaine alluviale est bordée par des versants relativement pentus, devenant par endroits des abrupts. L'orohydrographie joue ici un rôle essentiel pour limiter, favoriser ou orienter la diffusion de l'urbanisation. La commune compte un peu moins de 20 000 habitants, mais il convient de tenir compte du voisinage des communes d'Amay, en aval, et de Wanze, en amont, qui, chacune, avec plus de 10 000 habitants, encadrent Huy le long de l'axe mosan (fig. 1).

1.3. Données et sources

Sur base de scènes HRV (XS) de SPOT datant de juin 1992, la zone-témoin est localisée de telle sorte qu'elle englobe tout élément susceptible d'appartenir à l'agglomération du site urbain considéré.

Une fois définie la zone de travail, une classification non dirigée est exécutée. Elle n'a pour but que de dégrossir le travail et d'isoler les différents éléments du paysage clairement identifiables. Le tri opéré par la classification automatique, assez efficace dans son ensemble, permet de concentrer les efforts de recherche sur les cas de confusion entre les modes d'occupation urbains et agricoles apparaissant dans les zones périurbaines. Une classification dirigée est alors appliquée, en créant de nouvelles classes d'affectation pour lesquelles des zones d'entraînement sont soigneusement sélectionnées et ajoutées à celles obtenues par le processus automatique. Par contre, il est inutile de solutionner les autres confusions, relevant du seul domaine agricole et limitées aux marges de la zone de travail.

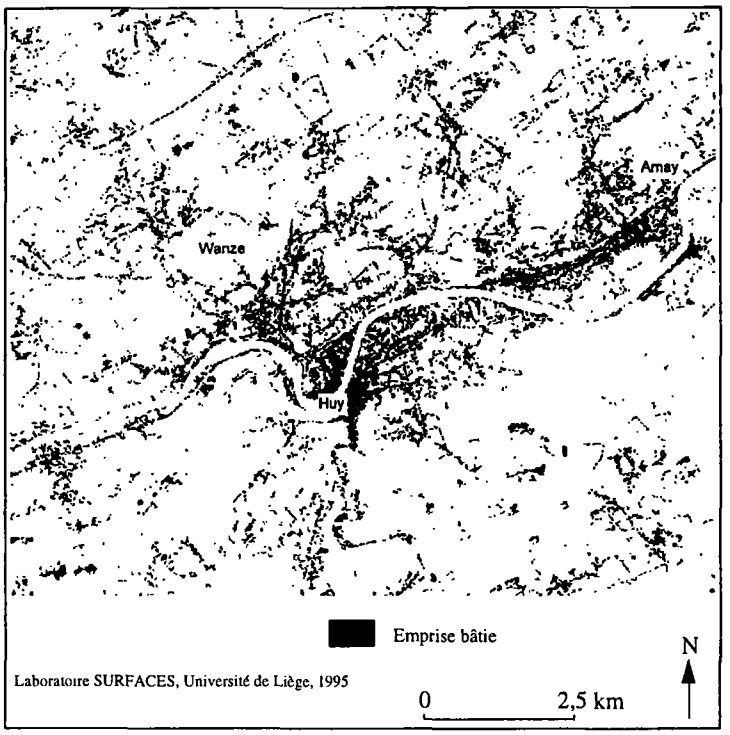


Figure 1. Masque binaire de l'espace bâti de la région de Huy

2. Développement de la méthode

2.1. Principes

Les affectations liées au phénomène urbain étant seules prises en compte, l'opération suivante consiste en la création d'un masque binaire définissant l'emprise bâtie de l'agglomération (fig. 1). Ce masque procède d'une simple reclassification des catégories d'affectation allouées aux pixels lors de l'opération précédente.

Immanquablement, cette image binaire présente une sorte de mitage de l'espace. Selon la définition de l'agglomération urbaine valable en Belgique (mais le même critère est partout d'application), les noyaux d'urbanisation séparés de l'agglomération par une distance inférieure à un seuil fixé *a priori*, font partie de cette même agglomération. Pour assurer la suppression des petites solutions de continuité autour de l'agglomération, une procédure de morphologie mathématique, intitulée « fermeture » (BINARD et COLLETTE, 1993), est mise en œuvre. Le choix de la taille de la fenêtre de convolution utilisée par cette fonction, résulte de la distance-seuil précisée dans la définition de l'agglomération.

Les contours de l'agglomération ainsi lissés font apparaître une masse plus compacte, tandis que les noyaux urbains les plus proches lui sont désormais rattachés. Il reste, en périphérie, une série d'îlots urbanisés isolés qu'il convient d'éliminer de l'image. Cette exclusion implique une identification préalable de chaque amas de pixels et, ensuite, une élimination des îlots isolés par une reclassification de l'image. Il en résulte une image binaire où les pixels non nuls et tous connectés, au moins par un coin, forment l'agglomération morphologique, au sens strict, de la ville étudiée (fig. 2).

L'inconvénient de l'agglomération morphologique stricte est qu'elle ne s'appuie sur aucun découpage administratif. Les règles permettant de passer de la continuité bâtie, aux divers niveaux administratifs belges, ont fait l'objet d'études antérieures (VAN DER HÆGEN et PATTYN, 1979; LEEMANS *et al.*, 1990). Le cadre territorial le plus précis, en Belgique, auquel il est possible de rattacher l'agglomération morphologique, est constitué par le découpage en secteurs statistiques, soit les unités de recensement intra-communales définies par l'I.N.S. Ainsi, sont considérés comme appartenant à

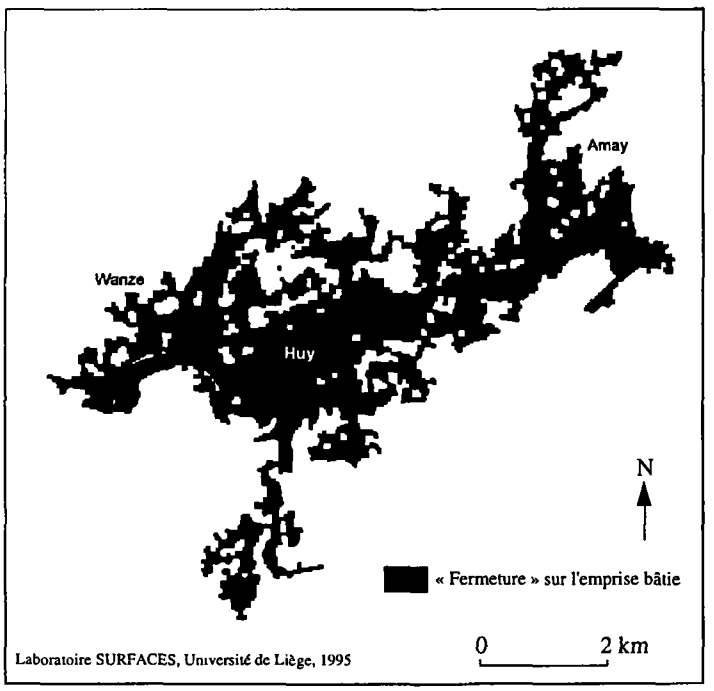


Figure 2. Agglomération morphologique au sens strict de la ville de Huy

l'agglomération, tous les secteurs dont 50 % de la superficie font partie de l'agglomération morphologique au sens strict. L'ensemble des secteurs jointifs répondant à ce critère forme l'agglomération morphologique adaptée aux limites de secteurs statistiques. Le secteur statistique constituant l'unité de recensement de base, il est désormais possible d'attacher une collection de chiffres socio-démographiques à la notion d'agglomération.

C'est précisément sur base de statistiques de population qu'est défini le niveau ultime de l'agglomération urbaine. Il s'agit, cette fois, d'étendre la notion d'agglomération aux limites de communes, pour former ce qu'il est convenu d'appeler l'agglomération opérationnelle. Le critère utilisé consiste à affecter une commune à l'agglomération opérationnelle si la moitié de sa population, au moins, réside dans des secteurs statistiques classés au sein de l'agglomération morphologique.

2.2. Mise en pratique

La mise en pratique des différentes phases de la méthodologie a été réalisée au moyen d'un programme spécifique (DONNAY, 1994) dont les principales étapes sont mentionnées ci-dessous.

La création du masque binaire est triviale, mais sa fermeture est plus problématique. Elle suppose, en effet, que soit définie la distance-seuil entre les éléments urbains assurant la continuité bâtie. La définition utilisée en Belgique autorise une certaine latitude, oscillant entre 50 et 100 m., selon l'appréciation de l'expert. *A contrario*, le seuil choisi dans d'autres pays est souvent fixé de manière non équivoque à 200 m. Il faut, en outre, se souvenir que la taille du pixel de l'image dans notre application est de 20 m. Pour conserver une fenêtre de convolution cohérente, eu égard à la taille du pixel, nous avons opté pour une taille de fenêtre de 140 m, soit une distance-seuil de 60 m de part et d'autre du pixel situé au centre de la fenêtre. Différents essais ont néanmoins été réalisés avec des fenêtres légèrement différentes, mais les images résultantes montrent, dans le cas de l'agglomération considérée, une assez grande stabilité.

Une fois le processus de fermeture accompli, tous les noyaux non connectés à l'agglomération sont éliminés pour ne plus laisser subsister dans l'image que l'agglomération morphologique. Une exception à cette règle est tolérée, à savoir celle de noyaux séparés de l'agglomération par un cours d'eau. Dans ce cas, les îlots sont considérés comme relevant de l'agglomération s'il existe un lien organique, tel un pont, qui crée une connexion entre les deux éléments urbanisés.

L'opération suivante consiste à caler l'agglomération morphologique sur le découpage en secteurs statistiques. Ce dernier est disponible sous format vectoriel, mais est aisément converti en une image des secteurs statistiques. Le programme appliqué permet, en chaque pixel de l'image des secteurs statistiques, de savoir si le pixel homologue dans l'image de l'agglomération morphologique est inclus, ou non, dans la masse urbanisée. Le comptage ainsi effectué permet de déterminer la superficie de chaque secteur appartenant à la continuité bâtie et de décider, *in fine*, de l'appartenance du secteur à l'agglomération morphologique.

La dernière étape consiste à déterminer les communes formant l'agglomération opérationnelle. L'application du seuil de population est réalisée en confrontant deux images : d'une part, une image de l'agglomération morphologique adaptée aux limites de secteurs, et d'autre part, une image des communes préparée préalablement par conversion du fichier vectoriel contenant les limites de communes. Dans ces deux images, les attributs des pixels sont les identifiants des unités spatiales (secteurs et communes) et ils agissent comme des pointeurs vers les tables reprenant les chiffres de population. Le balayage

parallèle des deux images permet, pour chaque commune, de calculer le total de population résidant au sein des secteurs de l'agglomération morphologique qui, rapporté au chiffre de population de la commune, décide de l'appartenance de celle-ci à l'agglomération opérationnelle.

2.3. Résultats

L'application de la méthodologie à la ville de Huy s'est avérée plus délicate que celles réalisées sur d'autres grandes agglomérations. En particulier, on a regretté l'absence d'étude antérieure sur le site et l'impossibilité d'une analyse diachronique par manque d'images satellitaires adéquates. Comme annoncé précédemment, Huy possède un site encaissé dans la vallée de la Meuse, et la forme de son agglomération est contrainte par la morphologie de la plaine alluviale, occupant tantôt la rive gauche, tantôt la rive droite, parfois les deux à la fois. Ainsi, la forme de l'agglomération morphologique adaptée aux limites de secteurs statistiques est très digitée (fig. 3). Elle voit certains de ses secteurs constitutifs se détacher de sa masse et laisse, par contre, de nombreux secteurs non urbains s'insinuer en son sein (par exemple, les secteurs couverts de forêts sur les versants).

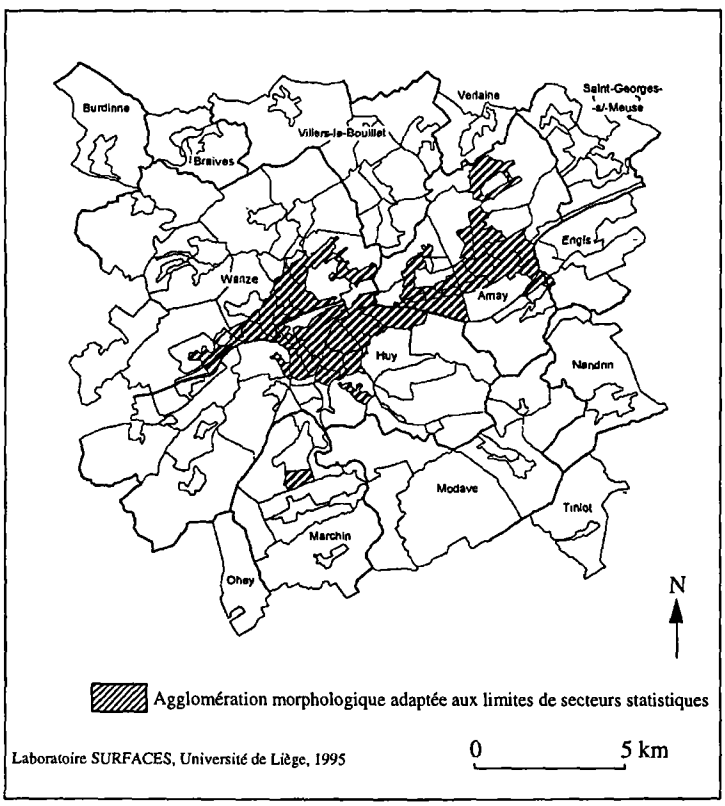


Figure 3. Agglomération morphologique de la ville de Huy adaptée aux limites des secteurs statistiques; l'agglomération opérationnelle correspondante est formée des communes de Amay, Huy et Wanze

Au total, trois communes forment l'agglomération opérationnelle de Huy : Amay, Huy et Wanze (fig. 3). Elle compte ainsi 42 572 habitants, tandis que l'agglomération morphologique ne totalise que 28 461 habitants. Cette faible proportion (67 %) de la population résidant dans l'agglomération morphologique, vis-à-vis de l'agglomération opérationnelle, mérite d'être soulignée. Elle est nettement inférieure aux pourcentages obtenus pour les autres sites-témoin de l'étude (par exemple, 82 % à Bruges), et résulte largement de l'effet de site mentionné plus haut.

En outre, 58 % seulement de la population de la commune de Huy appartient à l'agglomération morphologique adaptée aux limites de secteurs, de sorte que Huy ne contribue à la population totale de l'agglomération morphologique qu'à raison de 37 %. Il en va de même pour la commune de Wanze, voisine, dont seuls 54 % des habitants résident dans l'agglomération morphologique, et qui ne contribue que pour 22 % à la population totale de cette agglomération. La troisième commune importante, Amay, compte les 41 % restant des habitants de l'agglomération morphologique, c'est-à-dire que 91 % de sa population y réside. Si l'on veut bien se souvenir du seuil de population requis pour classer une commune dans l'agglomération opérationnelle (50 %), on s'aperçoit qu'il s'en faut de très peu pour que Wanze et même Huy, commune éponyme, ne soient pas intégrées à l'agglomération opérationnelle.

Ces deux communes présentent de nombreux noyaux d'habitat nettement distincts du noyau central de l'agglomération, séparés qu'ils sont par la morphologie tourmentée du site. Il s'agit, pour la plupart, d'anciens villages urbanisés et de lotissements résidentiels, appartenant incontestablement à l'agglomération, mais que des critères de délimitation trop stricts, ou plus exactement incomplets, ont failli exclure, à l'encontre de toute logique géographique.

3. Discussion et conclusion

L'étude, que la présente communication illustre partiellement, a montré que la télédétection satellitaire pouvait se targuer de résoudre la délimitation des agglomérations urbaines, et ce, dans des cas de figure très différents, de la métropole, à la petite ville, avec une précision acceptable. En termes relatifs, cette précision est d'autant meilleure que l'agglomération est grande. Il est clair, en effet, que les limites de la télédétection satellitaire sont atteintes lorsque l'étude porte sur les petites villes et les villages-centres. Néanmoins, comme on a commencé à le constater avec le cas de Huy, ville moyenne, ce sont plus les critères de définition de l'agglomération, ambigus ou incomplets, que les caractéristiques de l'image satellitaire qui risquent d'altérer la qualité des résultats.

Les limites de la télédétection dans cette application, sont celles de la télédétection urbaine en général : la disponibilité des données (actualité, absence de couverture nuageuse, coût, etc.), la potentialité de discrimination des affectations urbaines (généralement faible dans le cas des images HRV (XS) de SPOT), la résolution géométrique. Toute amélioration dans la définition des critères de délimitation de l'agglomération risque, en outre, de renforcer les limites de la télédétection.

Ainsi, la distance-seuil utilisée pour fixer la continuité du bâti s'avère trop contraignante telle qu'elle a été appliquée dans le cas de Huy. Il serait souhaitable de différencier le seuil selon la nature de l'affectation séparant deux ensembles urbanisés. Ceci impliquerait cependant une classification plus poussée des modes d'occupation du sol, qui grèverait le temps d'application et qui pourrait s'avérer délicate eu égard à l'hétérogénéité des milieux

périurbains. Dans le même ordre d'idées, la prise en compte de l'existence/absence, de la densité et de la capacité du réseau de voirie, dans la différenciation de la distance-seuil, s'avérerait vraisemblablement un avantage déterminant pour exprimer la continuité du bâti. Ces différentes caractéristiques ne sont pourtant que très partiellement rendues par la télédétection et nécessiteraient, en pratique, l'intégration de données exogènes.

Une autre ambition du travail consistait à évaluer les possibilités de mise à jour des unités de recensement, parallèlement à la mise en évidence des limites d'agglomération. L'analyse des images montre aisément qu'un habitat récent s'est développé en prenant pour élément d'ancrage le réseau routier particulièrement dense en périphérie des agglomérations. Cette forme de croissance, souvent linéaire, parfois zonale dans le cas de nouveaux lotissements, se développe dans des secteurs statistiques à vocation agricole ou forestière, au sein desquels le nouvel espace urbanisé se trouve minorisé en termes de superficie. Par conséquent, bien qu'il participe à la délimitation de l'agglomération morphologique au sens strict, cet habitat récent est exclu de l'agglomération urbaine lorsque sont appliqués les critères d'adaptation aux limites administratives. Il importe donc de mettre à jour les limites de secteurs, avant d'envisager toute délimitation de l'agglomération. Cependant, si l'image satellitaire peut identifier les secteurs candidats à une mise à jour, la nouvelle délimitation relève d'une analyse inaccessible à la télédétection (étude fonctionnelle, administrative, etc.).

4. 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 scientifique, Editions AUPELF-UREF et Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, p. 285-295.

DONNAY, J.-P. 1993. Télédétection urbaine et environnement résidentiel. Programme télédétection : télédétection et statistiques urbaines. EUROSTAT, Paris, 12 p. + 22 annexes.

DONNAY, J.-P. 1994. Agglomérations morphologiques et fonctionnelles, l'apport de la télédétection urbaine. Acta Geographica Lovaniensia, vol. 34, p. 191-199

LAMBINON, M. 1995. Délimitation des limites d'agglomérations par télédétection. Rapport d'étude de faisabilité pour le compte des Services fédéraux scientifiques, techniques et culturels, laboratoire SURFACES, Université de Liège, Liège, 38 p.

LEEMANS, S., PATTYN, M., ROUSSEAU, S. et VAN DER HÆGEN, H. 1990. Les régions urbaines belges en 1981. Études statistiques, Institut national de statistique, Bruxelles, n° 89, p. 5-25.

PUMAIN, D., SAINT-JULIEN, T., CATTAN, N. et ROZENBLAT, C. 1992. Le concept statistique de la ville en Europe. Eurostat, Office des publications officielles des Communautés Européennes, Luxembourg, thème 3, série E, 89 p.

VAN DER HÆGEN, H. et PATTYN, M. 1979. Les régions urbaines belges. Bulletin de statistique, Institut national de statistique, Bruxelles, n° 3, p. 235-249.

PARTIE IV

Cartographie urbaine

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 249-257

24

Apport d'une simple composition colorée à l'étude de l'espace urbain : cas de Mexicali (Mexique)

ANNE COLLIN DELAVAUD et DJAMEL TOUDERT

Institut des hautes études de l'Amérique latine de l'Université de Paris III, 28, rue Saint-Guillaume, 75007 Paris, France et CNRS (URA 111- CREDAL); téléphone : +33 (1) 44-39-86-70; télécopieur : +33 (1) 45-48-79-58

Résumé

L'objectif de ce travail est de montrer comment, avec très peu de moyens, il est devenu possible, grâce à l'imagerie satellitaire, d'analyser l'évolution générale d'une ville, quelle que soit sa taille. Cette connaissance, préalable à tout décideur urbain, n'était plus possible étant donné la vitesse de croissance des espaces urbains, le coût et le temps nécessaires pour établir une cartographie de base actualisée chaque année. Avec une simple composition colorée, il est possible de cartographier l'occupation du sol et avec des documents anciens classiques (cartes, photographies aériennes) de montrer les tendances de la dynamique urbaine. Cette approche géographique de la ville de Mexicali (438 000 hab. en 1990) a permis de mettre en évidence, d'une part, les zones de fortes densités, en particulier en dehors de l'espace central et, d'autre part, le rôle très structurant des réseaux à la fois routiers et d'irrigation dans le développement urbain. Les contraintes (vallée, voie ferrée et terres agricoles irriguées) sont dépassées peu à peu pour aboutir à un tissu urbain compact après remplissage des espaces ruraux situés entre les antennes urbaines (axes et villages). Cette étude rapide a permis de poser des questions qui seront approfondies ensuite sur le terrain et par des enquêtes forcément longues.

1. Introduction

L'analyse d'une ville, sans connaissance du terrain, est-elle possible à partir de données satellitaires de premier niveau d'exploitation ? Cette question n'est pas seulement pédagogique, mais aussi méthodologique pour le chercheur, et en particulier les acteurs de la planification et de l'aménagement. En effet, une première approche visuelle du fait urbain à partir d'une simple composition colorée permet de soulever des questions de base qui feront gagner du temps sur le terrain, d'autant plus que celui-ci est vaste. Le choix de l'étude porte sur la ville de Mexicali, située à la frontière nord-ouest du Mexique avec les États-Unis, dans l'État de Basse Californie, en pleine zone aride. Avec plus de 438 000 habitants en 1990, cette ville enregistre une croissance très forte liée à l'attraction des activités développées dans l'oasis et dans la ville même. Lieu de passage pour gagner l'Amérique anglo-saxonne, elle connaît de ce fait une population migrante « flottante » qui réside plus ou moins dans la ville pendant quelques semaines voire quelques mois. La ville s'étend en 1994 sur environ 8 km de ligne frontalière et sur 5 km de largeur vers le sud. Elle est la seule ville importante de l'oasis qui regroupe près de 300 localités et devra accueillir 100 000 personnes entre 1990 et 2000 (fig. 1).

Les objectifs sont d'établir, au 1: 50 000 et à partir des données de la composition colorée de l'image HRV (XS) de SPOT de 1994 et de l'image HRV (P) de 1991 (les données de cette dernière sont partielles et ne couvrent que la partie occidentale de la ville) :

- une carte de l'occupation du sol de la ville et de sa zone périurbaine en 1994 à partir d'une composition colorée HRV (XS) de 1994;
- une carte de l'occupation du sol de la partie occidentale à partir de données partielles de HRV (P) sur papier de 1991;
- une carte de l'évolution de la ville établie à partir d'une carte topographique de 1972, de quelques photographies aériennes de 1982 et de l'image HRV (XS) de 1994.

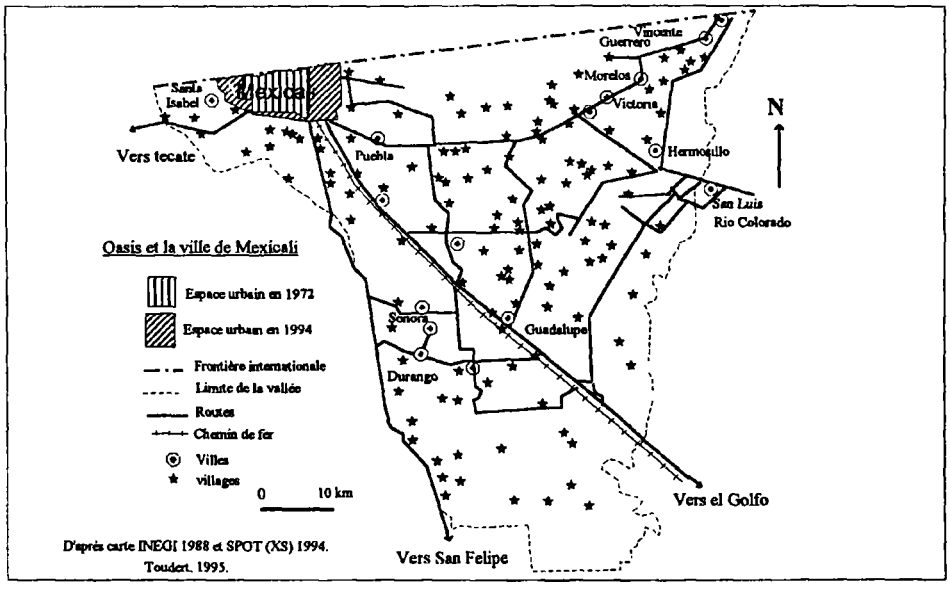


Figure 1. Carte de localisation de l'oasis et de la ville de Mexicali

2. Occupation du sol et organisation de l'espace

L'analyse de l'espace de Mexicali est facilitée par les contrastes relativement nets entre l'espace bâti et l'espace agricole, même si certaines franges urbaines de type pionnier offrent quelques doutes dans certains secteurs périurbains où le sol nu et les maisons trop petites se confondent dans un espace qualifié d'intermédiaire n'étant plus rural ni vraiment urbain (fig. 24-2, voir cahier couleur).

L'image offre trois grands ensembles aux contours très tranchés les uns des autres : le désert, l'oasis et la ville. Dans ces deux derniers dominent les formes géométriques. Grandes parcelles et îlots urbains suivent un découpage imposé par les réseaux routier, d'irrigation et de drainage. Ces réseaux sont toutefois difficiles à identifier car souvent parallèles.

L'espace urbain est au cœur de l'oasis, de forme rectangulaire assez massive avec un axe vers le nord, qui est en fait la ville américaine de Calexico, et une antenne le long d'un axe routier vers le SE. Dans la ville, de grandes avenues forment les éléments de structure d'un tissu urbain très découpé en îlots réguliers de formes rectangulaires assez répétitives et regroupées selon des ensembles de surface homogène.

Trois éléments perturbent l'agencement urbain et rural :

- la frontière Mexique/États-Unis, une ligne droiteimpose brutalement une division de l'oasis en deux secteurs organisés régulièrement mais différemment. La frontière bloque au nord l'extension de la ville de Mexicali;
- la rivière en provenance du NO traverse l'oasis et la ville en direction du SE; cette diagonale rompt, sur son passage, la structure organisée en introduisant des formes perturbatrices parce qu'inachevées et non structurées;
- l'interface entre la ville et l'oasis révèle des irrégularités caractéristiques des zones périurbaines où des changements d'usage sont en cours. Chaque année, la ville gagne sur les terrains agricoles qui peuvent être soit contigus, soit espacés. La croissance très rapide de la demande en terrain à bâtir trouve sa réponse dans l'achat de terrain agricole de manière individuelle ou par l'intermédiaire de promoteurs qui organisent un lotissement (*colonia*). Le parcellaire urbain suit donc de très près le parcellaire agricole lui-même lié au réseau de canaux d'irrigation (courbe de niveau) et à celui des routes ou des pistes.

3. Densités de l'espace urbain

L'espace urbain bâti offre des densités relativement fortes aussi bien dans la zone centrale que dans certains secteurs de la zone située autour du centre (fig. 3) :

- la zone de forte densité centrale présente un tracé des avenues permettant de distinguer rapidement un rectangle central et non un éventail comme on aurait pu s'attendre étant donné le point de départ que représente le passage de la frontière; cette forme géométrique ne doit pas être considérée dans sa totalité comme le cœur de la ville, car dans la vallée, quelques secteurs moins denses et même des vides imposent une analyse plus fine; l'analyse de l'évolution depuis 20 ans montre bien la grande coupure de la vallée centrale et la croissance urbaine bien séparée entre l'est et l'ouest jusqu'à la construction de ponts et de grandes avenues;
- une première couronne (sauf au nord à cause de la frontière) est actuellement en cours de consolidation avec des secteurs plus ou moins denses et, un réseau de voiries asphaltées ou non;

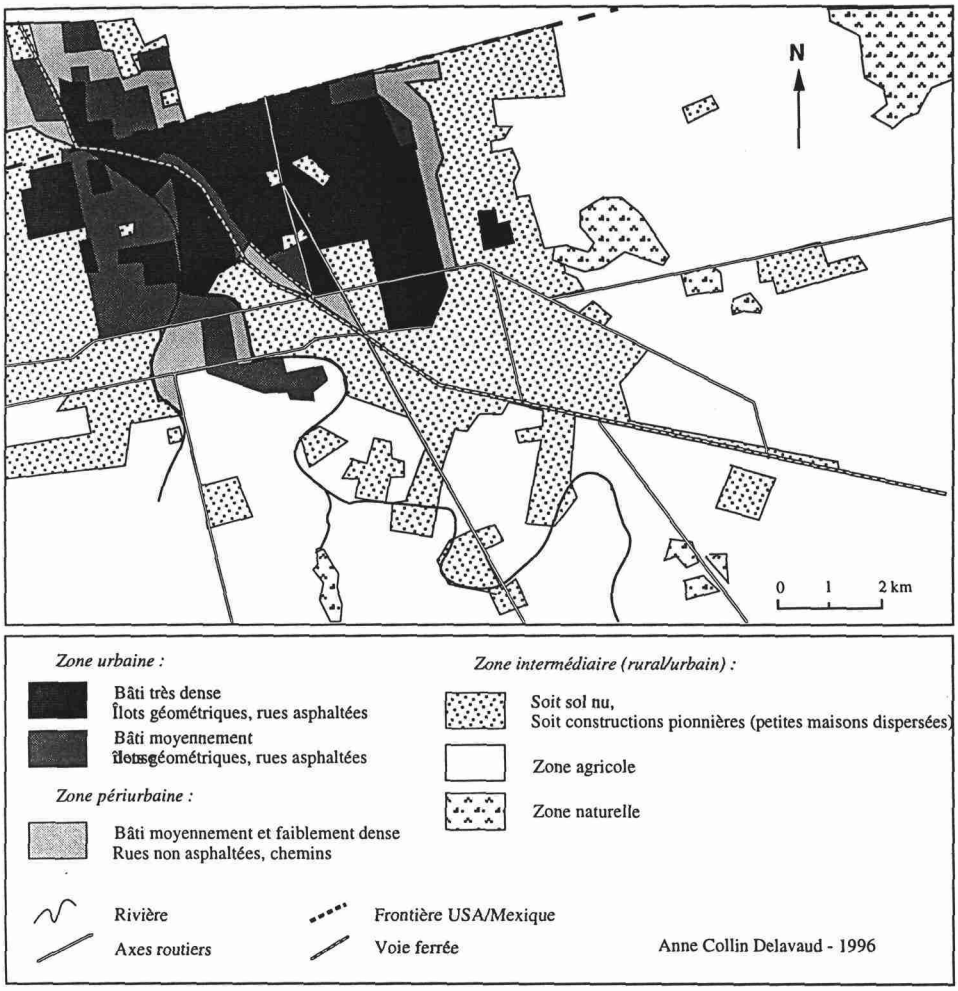


Figure 3. Occupation du sol de Mexicali en 1994, à partir de l'image HRV

- un espace périurbain est identifié au-delà des secteurs inclus dans les limites administratives, avec des secteurs proches de ceux de la zone précédente mais aussi des noyaux d'habitat isolé; ces derniers peuvent être relativement denses et consolidés; également, il faut noter des champs cultivés, jadis de grande taille mais aujourd'hui subdivisés en de nombreux lots et parfois occupés par des maisons.

La relative uniformité du tissu urbain est due à la prépondérance de l'habitat individuel, caractéristique dans les villes latino-américaines, mais renforcée ici par le caractère sismique de la zone californienne (faille de San Andreas). Les constructions en hauteur sont relativement rares. De toute façon, l'habitat collectif locatif n'est guère apprécié et demeure pratiquement inexistant. Dans le cas présent, l'objet bâti visible, la maison, est donc de taille réduite et difficilement identifiable. Le lotissement, forme prépondérante de production de l'espace urbain implique une urbanisation par plaques de taille variable, contiguës ou non.

4. Structure urbaine et maillage

La structure est ici très aisée à lire tant le quadrillage des voies est simple avec un tracé orthogonal prépondérant. De rares diagonales traversent la ville. Ce sont trois ou quatre grandes avenues et le chemin de fer, même si ce dernier n'est plus guère utilisé qu'une fois par semaine. La voirie est ici très visible grâce à de bons contrastes sur l'image, laquelle ne nécessite pas le recours aux filtres traditionnels (ex. laplacien).

Les systèmes linéaires sont bien individualisés grâce à un bon réseau routier hiérarchisé et le plus souvent asphalté donc bien visible. Les avenues plus larges servent d'ossature aux différents secteurs urbains et en particulier orientent les secteurs en cours d'urbanisation. Parfois, elles indiquent les ruptures dans le bâti ou le changement d'usage (rural). Les échangeurs sont bien individualisés.

Les rues dessinent la trame des îlots (*manzanas*) et définissent parfois des zones homogènes où les îlots sont de même densité et les parcelles de même taille. Certains *manzanas* sont entrecoupés de ruelles.

Une partie de la structure urbaine mise en place est dépendante du parcellaire rural sur lequel la ville s'est bâtie. Le tracé géométrique des champs irrigués a donné naissance à des lotissements de même taille. Le tracé des canaux et des pistes rurales a laissé place aux rues. Les grands axes urbains se prolongent tous par des chemins ruraux. L'adaptation de l'ancien réseau rural au nouveau réseau urbain est ici facile à observer.

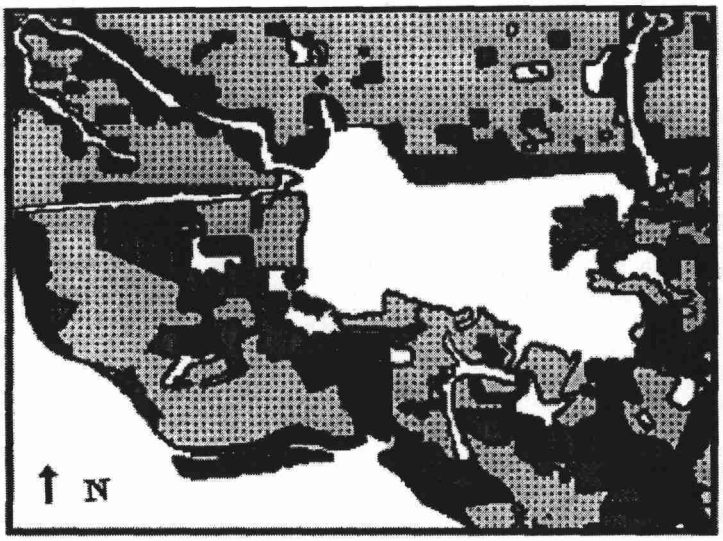
Cette ordonnance n'est pas respectée dans le secteur de la vallée où la rivière, relativement encaissée, joue le rôle d'élément perturbateur par son mouvement diagonal par rapport à la structure générale de l'oasis, mais aussi par le fait que sa largeur, ses pentes et sa zone inondable, empêchent le prolongement des rues d'une rive à l'autre. Également, certains secteurs récents du sud de la ville offrent une apparence désordonnée où la trame viaire apparaît très faiblement.

Les formes carrées et rectangulaires dominent le tissu urbain avec une légère prépondérance des dernières en raison du recoupement des îlots par des voies secondaires. Le maillage est fait d'ensembles homogènes représentant souvent plusieurs îlots (*manzanas*). Le maillage de bandes rectangulaires étroites prend appui sur des axes routiers et correspond soit à des sols nus en voie de lotissement soit à des ensembles collectifs ou à des habitats individuels.

Lorsque le maillage devient irrégulier, le bâti est discontinu, sauf, dans les parcelles agricoles de l'oasis. La figure 4 met en évidence les regroupements de parcelles autour de la ville selon leurs formes et l'adaptation de l'espace urbain à cette variété. L'extension de l'ouest de la ville (fig. 5) est en effet très facilitée par le parcellaire rural préexistant qui est en damier. Il ne reste plus qu'à la subdiviser en îlots urbains (fig. 6).

5. Etapes de développement

Cette approche de l'évolution d'une ville sur 22 ans confirme que, dans un espace plat et sans accident topographique majeur formant une barrière à la croissance urbaine, l'espace urbain a tendance à croître du centre vers la périphérie immédiate laissant à la ville une forme massive et compacte. Le poste frontalier a donné naissance au centre-ville situé à proximité du passage entre la ligne frontalière, le chemin de fer et la vallée. Le schéma classique du développement en éventail ne s'est pas présenté ici tant la force du plan en damier, lui-même tributaire d'un quadrillage lié au réseau d'irrigation, a réussi à imposer presque partout un tracé orthogonal des rues et des avenues principales.



Parcelles cellulaires
Les parcelles polygonales sans orientation apparente, les zones de passages, ayant un côté courbe le long des limites agricoles et non agricoles

Parcelles en lanières perpendiculaires
Petites et grandes lanières regroupées

Parcelles en damier
Damiers réguliers et non réguliers, petits et grands regroupés

Figure 4. Parcellaire autour de la ville de Mexicali en 1991 à partir de l'image HRV (P)

Le franchissement de la vallée s'est effectué très vite près du centre historique mais récemment plus au SO. La tendance de la ville à glisser vers le SE est bien réelle en raison de la prépondérance de l'axe routier et de la voie de chemin de fer qui ont favorisé l'essor de véritables axes urbains. La route vers le nouvel aéroport situé dans le désert a ouvert également une zone de croissance vers le NE. Néanmoins, l'expansion vers l'ouest s'est également imposée après les aménagements routiers qui ont facilité le remplissage des zones demeurées vides entre 1972 et 1982 (fig. 7).

La progression de la ville avance donc sur les terres cultivées et irriguées de l'oasis de trois façons :

- soit progressivement selon le parcellaire agricole qui sert de base à un lotissement urbain;
- soit le long des axes avec un remplissage ultérieur; cette forme linéaire de l'habitat sert de démarrage à une urbanisation en profondeur;
- soit par transformation des hameaux ruraux ou gros noyaux villageois situés à faible distance; les plus importants sont les *ejidos*, c'est-à-dire les regroupements d'exploitations de paysans sur des terres collectives à la suite de la Réforme agraire du début du siècle; les ex-*ejidos* Gonzalez Ortega, Coahuila, Zacatecas ont été absorbés dans la décennie 1960.

Figure 5. Image HRV (P) de SPOT de 1991 de la ville de Mexicali

Tout naturellement, la ville s'est étendue en direction de l'est et du SE, tendance qui se poursuit depuis un siècle même si l'espace bâti a récemment gagné l'ouest.

Comme le montre cette première approche de l'évolution depuis 20 ans, le remplissage vers le sud va se poursuivre pour combler le mitage en place. L'extension sur les parcelles agricoles continuera modestement en raison du caractère productif de ces terrains alors qu'il est possible de passer à la phase de densification pour cette immense zone périurbaine mise en place pendant les années 1980. Mais, la loi récente de 1992 permettant la vente officielle des terres des *ejidos* pourrait faire évoluer autrement l'urbanisation actuelle en jouant contre le phénomène de remplissage. Les paysans peuvent désormais vendre leurs petits terrains ruraux qui seront d'autant meilleur marché qu'ils seront éloignés de la ville. La ville peut donc continuer son extension par la création de morceaux de ville éloignés de la zone urbaine continue. N'est-ce pas déjà le cas à l'*ejido* Santa Isabel à l'ouest ?

Pour quelles raisons certains secteurs accessibles ne sont-ils pas urbanisés aujourd'hui ? L'activité industrielle et d'entrepôt est-elle le fait de petites activités dispersées peu repérables sur le document ? Le centre commercial, par contre, est bien visible avec son extension de stationnement démesurée.

6. Conclusion

L'étude de la composition colorée a montré non seulement les fortes densités des espaces centraux mais aussi celles des secteurs périphériques. La structure est très dépendante des systèmes d'irrigation et de drainage. Si les avenues créées entre 1982 et 1994 pour desservir le sud sont bien visibles, il reste parfois difficile d'identifier les canaux d'irrigation des pistes, parfois parallèles.

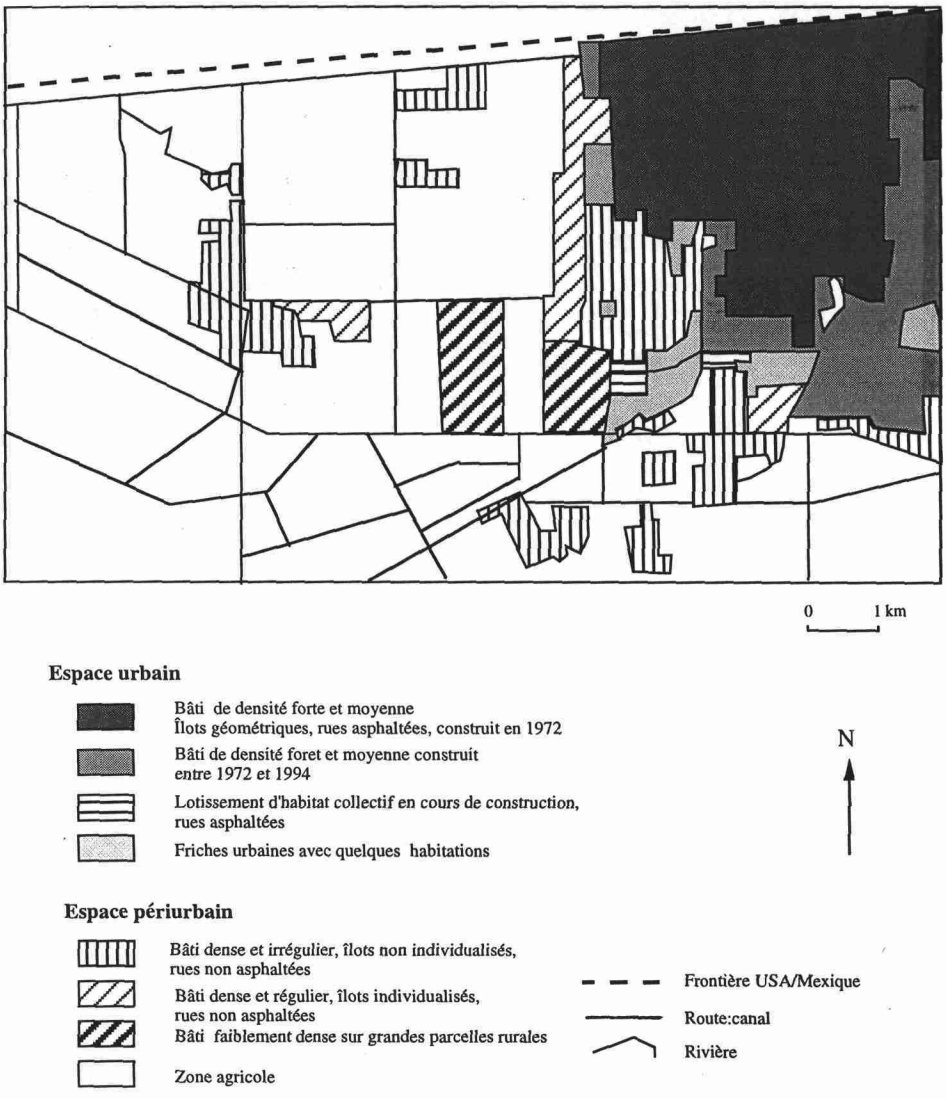


Figure 6. Occupation du sol à l'ouest de la ville de Mexicali en 1991 à partir de l'image HRV

Cette interprétation visuelle souligne parfaitement les limites de la ville dans la zone rurale où les lotissements avancent en fonction du parcellaire agricole, c'est le cas de l'ouest et dans la première périphérie du NE. La situation est moins certaine à l'est et au SE où des friches rurales semblent avoir facilité le passage à l'urbanisation. Ici, il peut y avoir confusion entre sol nu (sable) et champs abandonnés sur lesquels quelques maisons ont commencé à s'édifier.

La vérification sur le terrain, les enquêtes et le traitement des données satellitaires devraient compléter ces remarques préliminaires d'interprétation. Avant de partir sur le

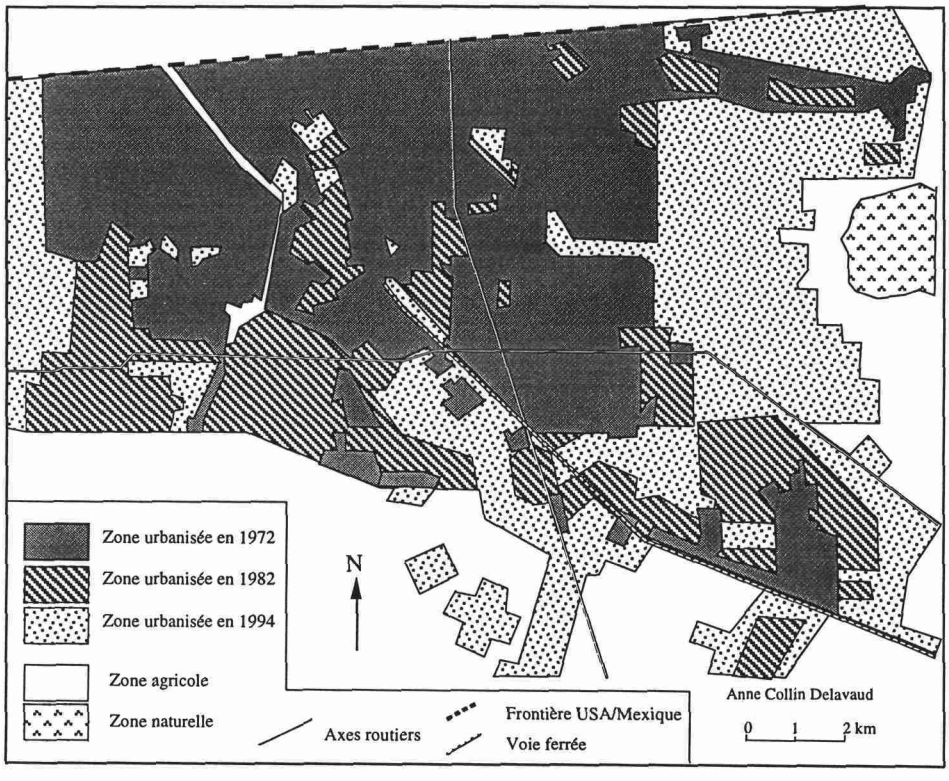


Figure 7. Évolution de l'espace urbain à partir de la carte de 1972, des photographies aériennes de 1982 et de l'image HRV de 1994

terrain, ces outils très simples ont permis de dégager une vue d'ensemble de la ville et de poser quelques questions à travailler sur place. Ils ont fait gagner beaucoup de temps et faciliter la connaissance globale de la ville. Sans recourir à des traitements, l'information géographique obtenue est souvent suffisante pour le décideur. Cette interprétation nécessite un apprentissage simple et rapide. La résolution proposée (20 m et 10 m) facilite l'analyse urbaine. Il reste que l'interprétation visuelle a des limites dans certaines zones où la confusion est possible entre les matériaux de construction et les sols nus. Les différentes densités n'apparaissent pas clairement dans un paysage urbain caractérisé par une grande majorité de maisons entourées de petits jardins.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 259-265

25

Identification des acteurs de la production de l'espace en milieu urbain africain à partir de l'imagerie satellitaire : exemples de Bamako (Mali) et de Maroua (Cameroun)

MICHEL SIMEU KAMDEM

Département de recherches géographiques, Institut national de cartographie, B.P. 157, Yaoundé, Cameroun; téléphone : +237 22-29-21; télécopieur : +237 20-18-54

Résumé

Produire l'espace en milieu urbain peut se définir comme l'ensemble des activités qui concourent à la fois à construire, à équiper et à aménager une ville. À l'heure où, crise économique oblige, l'État se désengage des villes en Afrique, il paraît difficile d'aborder les problèmes de prise en charge de la production de l'espace sans tenir compte des acteurs en présence. Dans des pays comme le Mali et le Cameroun, il n'existe pas de couverture photographique aérienne à jour et les fichiers des services techniques de l'urbanisme et de l'habitat sont fragmentaires. Le thématicien n'est pas entièrement satisfait devant les difficultés d'obtenir, avec les données actuelles, une stratification fine de l'espace urbain, d'où les très nombreux espoirs que suscite le développement des performances de l'outil télédétection et des techniques connexes. À partir d'images HRV de SPOT des villes de Bamako et de Maroua, nous voulions identifier les principaux acteurs de la production de l'espace urbain. Le traitement de ces images a été réalisé sur le logiciel *Planètes* au Laboratoire de l'ORSTOM à la Maison de la télédétection du Languedoc-Roussillon. La démarche utilisée qui a consisté, après avoir déterminé des points d'appui et procédé au recalage du panchromatique sur le XS, d'une part à effectuer une classification dirigée et, d'autre part, à chercher à en améliorer la qualité en faisant intervenir des techniques qui mettent en évidence la structure et la texture du bâti. La démarche a donné des résultats appréciables pour les villes de Bamako et de Maroua. Ainsi, il a été possible de distinguer le bâti de l'environnement rural, de même que quelques strates du bâti permettant d'identifier les acteurs de la production de l'espace urbain. Les images présentent l'avantage de fournir une vision globale et à jour de ces villes.

1. Introduction

En général, la construction et l'équipement des villes incombent, où que l'on se trouve, aussi bien à l'État qu'aux capitaux privés. Si l'investissement privé est important dans les pays d'économie libérale, il est, pour des raisons financières, très faible en Afrique. Dans bien des pays de ce continent, bien que son emprise sur l'espace soit considérable, il reflète des moyens plutôt limités qualitativement. Avec la crise économique qui s'aggrave dès la fin des années 1980 et le désengagement des pouvoirs publics de la production de l'espace urbain, les regards se tournent naturellement vers les acteurs locaux. L'Afrique semble désormais obligée de compter sur ces derniers pour produire ses villes. Mais qui sont-ils ? De quels moyens disposent-ils ? Ont-ils suffisamment de ressources pour produire de manière satisfaisante la ville ? Avant de répondre à ces interrogations, objet de nos préoccupations ces dernières années, une question fondamentale, celle de l'identification des acteurs, mérite d'être clarifiée et c'est l'objet de la présente étude.

Pour identifier les acteurs de la production de l'espace en milieu urbain africain, de nombreuses méthodes existent. L'enquête directe, si elle est irréprochable lorsqu'elle est exhaustive, se heurte dans ces pays au problème de moyens financiers. L'exploitation des fichiers des municipalités, des services techniques du cadastre et de l'urbanisme et de l'habitat aurait pu renseigner utilement sur les détenteurs des titres de propriété ou les demandeurs des permis de bâtir, des bornages de terrain et des certificats d'urbanisme, mais les informations y apparaissent fragmentaires. L'interprétation des photographies aériennes enfin, ultime recours pourrait-on dire, présente, elle aussi, des handicaps. Non seulement les couvertures aériennes ne sont pas disponibles pour l'ensemble des villes mais, en plus, elles sont, pour la plupart, assez anciennes. En somme, de nombreuses contraintes pèsent sur l'utilisation des outils d'investigation usuels pour la présente thématique, d'où le recours à la télédétection qui a l'avantage d'offrir des images plus actuelles et qui, *a priori*, se présente comme un outil susceptible de pallier les insuffisances des méthodes déjà expérimentées. Quelles possibilités offre-t-elle concrètement à l'identification, à travers leurs différentes emprises, des acteurs de la production de l'espace ? Mais peut-être conviendrait-il d'abord de rappeler succinctement la démarche utilisée ? Cette étude réalisée pendant un stage effectué à la Maison de la télédétection du Languedoc-Roussillon en présente quelques résultats. Signalons cependant que la relative brièveté du séjour et l'absence de structure adéquate pour continuer les investigations au Cameroun ont quelque peu limité la portée des recherches.

2. Images et traitement

2.1. Images satellitaires

Les données HRV de SPOT K/J 40-325, en mode XS du 29-11-1986 et en mode panchromatique du 30-11-1986, et K/J 87-329, en mode XS du 11-11-1988 ont été utilisées respectivement pour Bamako et Maroua. Le mode panchromatique, de 10 m de résolution au sol, n'a pas été disponible pour cette dernière image dont une fenêtre de 636 x 904 a été extraite. Pour la capitale du Mali, des extractions de 1 600 x 1 600 et de 3 001 x 3 001 ont été réalisées sur les images XS et panchromatique respectivement. Ces images qui ont en commun l'appartenance à la même zone sahélo-soudanienne présentent l'avantage d'être

sans couverture nuageuse. Leur traitement a été réalisé grâce au logiciel *Planètes* au laboratoire de l'ORSTOM à la Maison de la télédétection du Languedoc-Roussillon.

2.2. Traitement de l'image de Bamako

Les deux scènes HRV (XS et P) de SPOT disponibles sont intéressantes à plusieurs égards et chacune de manière spécifique. Le mode multispectral (XS) a l'avantage de fournir un éventail varié d'informations alors que le mode panchromatique (P) présente plus finement les objets au sol. Il fallait donc d'abord superposer entre elles ces deux images, non seulement pour les ramener à la même échelle, mais aussi pour disposer de leurs avantages combinés.

2.2.1. Production de l'image XS-P

La première démarche a consisté à faire une homothétie d'un facteur deux pour ramener l'image XS à la même échelle que la panchromatique. Ensuite, en utilisant un double écran présentant l'un la XS et l'autre la P, des amers ont été déterminés le plus possible aux angles et aux intersections. Vingt-neuf points d'appui ont ainsi été repérés. Une fois le fichier amers créé, nous avons entrepris, grâce au programme de transformation polynomiale de degré 3, avec l'option de prendre la radiométrie du pixel le plus proche, de lancer le recalage. Plusieurs tentatives impliquant des reprises de points d'appui et des corrections statistiques ont été nécessaires pour aboutir à une superposition acceptable avec une variance par amer de 5,8 m. En fait, avant ces corrections, cette variance très élevée, avoisinait les 50 m, soit 48,8 m par amer. Ce qui témoigne de l'existence d'erreurs dans le repérage des points homologues et donc d'un recalage très approximatif.

L'image nouvelle est une image de la taille de la panchromatique de départ soit 3 001 x 3 001 et contenant quatre canaux (XS1, XS2, XS3 et P). Elle se prête mieux, avec la finesse de résolution du panchromatique et la richesse radiométrique de l'image multispectrale, aux analyses de type urbain. Cependant, elle reste à parfaire pour obtenir des informations de qualité. Des traitements complémentaires sont donc indispensables.

2.2.2. Composition colorée

Pour obtenir une composition colorée de la nouvelle image faite, comme on l'a vu, de deux images au départ bien distinctes, il a fallu harmoniser l'appellation des canaux et donc convertir le dernier canal (P) en XS4. Deux formules étaient alors applicables :
1) P + XS2 + XS3 où le P représente le bleu, XS2 le vert et XS3 le rouge;
2) XS1 + P + XS3 où XS1 représente le bleu, P le vert et XS3 le rouge.

Après avoir expérimenté les deux formules, la qualité de l'image est apparue meilleure pour la seconde. L'image XS1-P-XS3 est celle qui est la plus fine sur le plan spatial. C'est donc elle qui a été retenue (fig. 25-1, voir cahier couleur).

2.2.3. Production de néo-canaux

Un certain nombre de programmes a ensuite été exécuté notamment l'indice de brillance (IB), l'indice de végétation (IV) et l'analyse en composantes principales (ANAFAC) et a abouti à la création de néo-canaux. Ils présentent chacun des particularités. L'indice de brillance fait apparaître de nettes différences entre l'habitat moderne et l'habitat populaire. L'indice de végétation quant à lui fait ressortir clairement les rues, le fleuve et le réseau des ravines. Le premier canal de l'analyse en composantes principales dont le mode de réétalement est 1, enfin, met en évidence des différences à la fois entre le bâti et le non bâti,

entre les zones exploitées et celles non mises en valeur et entre le cours d'eau et le reste. Il fallait ensuite passer à la classification.

2.2.4. *Classification*

Dans un premier temps, 60 parcelles d'entraînement pour huit classes correspondant à trois thèmes, notamment le bâti, le non bâti et les éléments naturels ont été choisies (fig. 25-2, voir cahier couleur).

Après avoir créé le canal zone et obtenu des statistiques afférentes, des corrections géométriques consistant notamment soit à recentrer certaines parcelles d'entraînement, soit à en revoir la taille, ont été nécessaires pour rendre ces statistiques fiables. En fait, pour diverses raisons dont l'absence d'homogénéité de certaines de ces parcelles, les écarts-types apparaissaient parfois très élevés. La classification qui en résulte, obtenue à partir de quatre canaux (respectivement avec « sebest » et « euclid ») n'est pas assez pertinente pour notre thématique. Le bâti, objet principal de nos investigations, apparaît encore comme un bloc monolithique difficilement discriminable. Il fallait donc utiliser d'autres méthodes ou recourir à d'autres programmes. Tout d'abord, nous avons refait une classification, non seulement avec les canaux bruts, mais aussi avec IB, IV et ANAFAC qui sont des néo-canaux. Le résultat obtenu n'a guère été réellement différent. Même en appliquant un filtre médian 3 x 3 aux canaux XS1, IB et P qui apparemment discriminent mieux que les autres canaux, il n'y a pas eu d'amélioration significative dans le sens de notre thématique.

2.2.5. *Amélioration de l'image*

Parallèlement à ces classifications successives faisant varier les canaux utilisés, nous avons extrait grâce à un masque, le bâti du reste de l'image. Sur ce bâti, une nouvelle classification a été effectuée avec des néo-canaux spéciaux notamment, *fenetpanchro*, *fenetib* et *fenetXS1*. Ces derniers avaient au préalable, sur diagrammes bidimensionnels, été purifiés des pixels isolés. Le résultat est nettement plus intéressant. Des différenciations significatives apparaissent par rapport au bloc monolithique précédent. On peut y distinguer l'habitat moderne loti sur une trame orthogonale régulière, de l'habitat populaire qui apparaît en grappe. De même, l'habitat moderne résidentiel de type pavillonnaire, s'identifie assez bien (fig. 25-2, voir cahier couleur). Certes, les trois teintes principales censées représenter différemment ces trois classes apparaissent ensemble et auraient pu créer des confusions, mais leurs textures sont différentes et par conséquent, n'affectent pas tant la discrimination visuelle. Une légende faite d'éléments prélevés dans chacune de ces trois classes illustre effectivement la stratification. Ayant réussi à stratifier les principales classes de bâti, il fallait étendre la classification à l'image entière. Le résultat fait apparaître un certain nombre d'irrégularités. Outre le fait que les palettes désignant les trois principaux types de bâti se retrouvent très souvent regroupées au sein d'une même classe, la zone d'habitat moderne de type pavillonnaire s'étend bien au-delà de la zone bâtie, dans des secteurs où on ne rencontrerait en aucun cas ce type d'habitat. De même, la couleur affectée à la classe représentant les équipements publics se retrouve dans les zones rurales. Tout ceci peut s'expliquer d'une part, par des valeurs radiométriques assez proches, d'une classe à l'autre. D'autre part, le substrat autour duquel sont implantés l'habitat moderne et les équipements n'étant rien d'autre que du terrain aéré, débarrassé de friches, des parcelles à vocation agricole bien entretenues, peuvent tout aussi bien avoir la même réflectance. La légende essaye dans la mesure du possible de prendre en compte tous ces biais de manière à les affecter dans des classes appropriées. Mais l'essentiel, c'est-à-dire le bâti dans le périmètre urbanisé, est peu affecté.

2.3. Traitement de l'image de Maroua

Contrairement à Bamako, Maroua ne disposait que d'une image multibande (XS). Les opérations préliminaires de recalage qui ont été indispensables pour les images de la capitale du Mali n'ont donc pas été nécessaires ici. Après avoir obtenu un zoom par duplication, une composition colorée et quelques néo-canaux ont été créés (fig. 25-3, voir cahier couleur). Vingt parcelles d'entraînement correspondant à sept classes réparties ainsi qu'il suit ont ensuite été retenues :

- bâti (3 classes) :
  - . habitat moderne
  - . habitat mixte
  - . habitat populaire;
- non bâti (4 classes) :
  - . zone verte
  - . lit de mayo (cours d'eau intermittent) et banc de sable
  - . relief résiduel, affleurement rocheux
  - . friches.

La classification dirigée qui en résulte, faite à partir des canaux bruts, laisse apparaître clairement pour le bâti, une classe d'habitat populaire hors trame qui contraste nettement avec le reste de l'habitat entièrement sur trame. Des différences radiométriques qui apparaissent dans ce bloc sur trame sont la preuve qu'il est constitué de deux composantes : l'habitat mixte et l'habitat moderne. Physiquement, il n'est pas facile de distinguer ce dernier habitat du substrat qui le porte. Il apparaît ainsi étalé sur de nombreux secteurs de l'image même au-delà de la zone bâtie; ce phénomène a été également observé à Bamako. Il en est de même des lambeaux d'habitat mixte qui se retrouvent dans des secteurs non bâtis. L'interprétation visuelle arrive néanmoins à bien distinguer les différents éléments du bâti. En prélevant des parcelles dans chaque classe, la légende arrive à s'adapter à la présentation qu'offre cette classification automatique et notamment à contourner le problème de regroupement de couleurs au sein d'une même classe, qui se pose ici, comme dans le traitement de l'image de Bamako.

3. Les résultats

Les informations extraites de ces images permettent de manière générale, de bien distinguer les principaux types de bâti en milieu urbain. Connaissant les caractéristiques des emprises des principaux acteurs de la production de l'espace urbain, on a ainsi l'occasion de mieux les cerner.

À Bamako, l'emprise des lotissements est considérable. Cela matérialise manifestement la présence des pouvoirs publics et de certains promoteurs fonciers et immobiliers. Ces lotissements occupent près des deux tiers de la superficie bâtie et s'étendent pratiquement sur la plus grande partie de la moitié nord de la ville sur la rive gauche du fleuve Niger et sur quelques îlots en rive droite. Au niveau des constructions d'immeubles, l'intervention des pouvoirs publics semble moins perceptible. Elle se limite à quelques modestes réalisations, laissant ainsi le champ, à la fois dans les quartiers lotis et dans les quartiers d'habitat pavillonnaire, aux acteurs locaux de catégorie aisée et aux investisseurs étrangers. Ce dernier type d'habitat se localise essentiellement le long du fleuve sur la rive gauche. Les acteurs en sont des membres de la bourgeoisie locale à la recherche d'une plus value

locative, des entreprises privées soucieuses de limiter leurs frais locatifs par la construction des résidences pour leurs hauts cadres, et plus rarement l'État. Les acteurs locaux les plus modestes sont les principaux producteurs de l'espace dans les quartiers d'habitat populaire. Leurs constructions s'entassent dans trois poches principales : 1) sur la rive gauche, au sud de l'ancien aéroport et à l'extrémité NE de l'espace bâti, 2) sur la rive droite, au sud du premier pont et 3) plus à l'ouest, au-delà du quartier d'habitat sur trame. Cette vision globale de la production de l'espace urbain à Bamako que rend compte l'imagerie satellitaire permet de bien réaliser que si l'intervention de l'État est importante en amont, elle est, en général, assez limitée en aval où dominent largement les producteurs locaux. C'est dire que dans les développements futurs de la ville, étant donné que l'État intervient désormais très peu, du fait de la crise économique actuelle, le type d'habitat dominant portera fortement l'empreinte de l'initiative privée. Ce sera donc un habitat majoritairement populaire peu ou prou réhabilité.

À Maroua, l'emprise des pouvoirs publics apparaît également importante sur le plan des lotissements. La presque totalité de la ville est en effet quadrillée. Toutefois, au niveau des constructions d'habitat cette emprise est beaucoup plus limitée encore qu'à Bamako. Quelques bâtiments datant de la période coloniale notamment la résidence du gouverneur, la province, la préfecture, l'hôpital, etc. font office de parc immobilier de l'État. Certes, on compte aussi quelques rares bâtiments « neufs » comme le palais de justice ou l'hôtel des finances, mais dans l'ensemble, il n'y a pas eu ici, comme dans d'autres chefs-lieux de province camerounais, notamment Garoua, la multiplication de constructions de prestige destinées à abriter des services administratifs locaux ou à loger des hauts fonctionnaires. C'est ce qui explique l'importance de maisons conventionnées par l'État à des particuliers soit pour abriter certains de ses services, soit pour loger ses agents et qui sont disséminées dans les quartiers d'accès facile de la ville. Les quartiers résidentiels modernes apparaissent donc ici, probablement parce que l'État n'y a pas beaucoup contribué, très limités spatialement. Le plus important Dougoy, se localise pratiquement dans la périphérie NE de la ville, en direction de Bogo. Les producteurs ici sont des acteurs locaux de classe sociale aisée. Dans ces conditions, le cœur de la ville est occupé par l'habitat mixte - populaire-moderne. C'est d'ailleurs le type d'habitat le plus répandu. Il constitue au centre de la ville, de part et d'autre du lit du Mayo Kaliao, le type d'habitat dominant. Les promoteurs sont généralement des autochtones de toutes les classes sociales confondues. Les habitations des classes les plus aisées se localisent en bordure de rue, c'est ce que nous avions qualifié d'urbanisme de façade à Garoua. À l'arrière-plan, l'habitat est de type populaire et les acteurs se recrutent essentiellement dans les classes pauvres. La case du lamido, principal dignitaire traditionnel de la ville, illustre bien cette dualité. La façade principale a une allure normale, c'est-à-dire qu'elle s'intègre harmonieusement dans le style des constructions longeant l'avenue bitumée. Au-delà se retrouve intacte toute l'architecture traditionnelle d'une chefferie séculaire. Quatre poches d'habitat populaire constituent la zone exclusive des plus petits acteurs, généralement auto-producteurs. Elles se localisent à l'extrémité nord de la ville pour la plus importante, au SO, à l'est et au SE pour les autres. Dans le contexte de crise économique actuelle, le développement spatial de la ville revêt des caractéristiques proches de celui de Bamako, avec une extension considérable de la sphère d'influence de l'habitat hors trame.

4. Discussion

Ces deux exemples montrent qu'avec les traitements effectués, il n'est pas facile d'obtenir une stratification satisfaisante du bâti en milieu urbain. Non seulement sur le plan radiométrique, il n'y a pas de différence entre les toitures des cases dans les quartiers populaires et dans les quartiers modernes. En outre, dans ces milieux soudano-sahéliens où le rayonnement solaire est intense, les valeurs radiométriques des bancs de sable et des toitures des habitations sont très proches. C'est ce qui explique la présence d'« erreurs » dans l'image classée. De nombreuses taches d'habitat se rencontrent en effet parfois à des endroits où on ne s'attendrait pas à les retrouver. Il faut donc faire appel à d'autres techniques qui font notamment intervenir les notions de texture et de structure. Nous n'avons pas, pour certaines raisons, suffisamment creusé dans ces deux directions. Néanmoins, des différences apparaissent effectivement et l'on peut distinguer les bancs de sable des toits de bâtiment. De même, si au niveau des habitations la texture varie peu, on constate bien que l'habitat populaire apparaît très souvent en grappes, l'habitat sur trame dans un quadrillage plus ou moins régulier, et l'habitat pavillonnaire dans un espace beaucoup plus aéré. En fait, tout ceci est bien visible sur les deux images et les différents éléments qui constituent une même classe sont aisément identifiables d'un bout à l'autre des villes. Toutefois, des irrégularités et pas les moindre, subsistent. Non seulement les trois couleurs représentant les principales classes de bâti continuent à se regrouper en proportion variable dans chacune d'elles, mais en plus, des pixels ou groupes de pixels isolés se retrouvent en dehors de cette zone.

5. Conclusion

Au terme de cet exercice, il apparaît clairement que, parce qu'elle présente l'avantage de fournir des images globales et à jour des villes, parce qu'elle arrive à discriminer aisément le bâti de l'environnement rural plus ou moins proche, parce qu'à l'intérieur de ce bâti, elle arrive à circonscrire les différentes strates du bâti, et par là même à permettre l'identification des acteurs de la production de l'espace urbain, la télédétection apporte certainement beaucoup à cette thématique. Cette vision globale des villes a permis, en effet, non seulement de bien cerner les emprises respectives des principaux acteurs de la production urbaine et leurs caractéristiques, mais aussi d'apprécier les développements actuels et leurs tendances dans un contexte profondément marqué par le désengagement de l'État, un acteur peu ordinaire dans les villes d'Afrique. On est certes encore loin de pouvoir chiffrer quantitativement ces emprises, tant sont parfois importantes les imbrications qui existent entre des éléments de classes différentes. Il faudrait pour cela procéder à un tri et à un décompte de ces éléments en fonction des classes auxquelles elles appartiennent, solution tout aussi réalisable dans le cadre d'une enquête complémentaire de terrain. En attendant, les quelques insuffisances de la classification automatique n'altèrent, dans l'ensemble, que très peu la qualité des informations fournies par l'imagerie satellitaire qui restent évidemment de premier ordre. Le développement des performances de l'outil télédétection ne pourra qu'en améliorer davantage la qualité.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 267-273

26

Technique d'élaboration d'une spatiocarte de la région de Rosso (Mauritanie)

CHEIKH SOW

Direction de la topographie et de la cartographie, Ministère de l'Équipement et des Transports, B.P. 237, Nouakchott, Mauritanie;
téléphone : +222 (2) 533-37 (poste 304); télécopieur : +222 (2) 535-78

Résumé

La présente étude vise à décrire un processus d'établissement et de révision de cartes topographiques de la région de Rosso par méthode interactive à partir d'une carte topographique ancienne numérisée et d'une image HRV (XS) de SPOT de 1991. L'objectif final de l'opération est d'obtenir une carte tout en gardant l'information contenue dans l'image. La réactualisation et l'élaboration des cartes de base sont une priorité pour notre pays. Dans cette étude plusieurs aspects sont abordés, notamment: 1) les problèmes rencontrés au niveau des corrections géométriques des images HRV à partir d'anciennes cartes; 2) la méthode interactive de révision des cartes à l'aide des documents numérisés; 3) les processus d'élaboration de spatiocarte. La démarche utilisée a consisté à superposer une carte topographique numérisée à l'échelle 1: 200 000 et une image HRV (XS). Les résultats obtenus comparés avec ceux des méthodes classiques montrent que cette technique peut être un support pour la cartographie de base de notre pays en améliorant les cartes existantes. Mais, il faut signaler qu'une scène HRV (XS) du début de la saison sèche (octobre) ne suffit pas pour analyser en détail les différentes composantes du sol et de la végétation; une analyse multitemporelle est nécessaire. La précision du document final pourrait être affinée en utilisant une image panchromatique.

1. Introduction

Autrefois, objet rare et cher, la carte répondait à des besoins militaires; aujourd'hui, elle fait partie intégrante de notre vie et devient un corollaire de l'expansion économique. La révision et la réalisation des cartes topographiques sont devenues de plus en plus une nécessité, puisque le développement économique d'un pays ou d'une région n'est possible que s'il est basé sur une information à jour. Il est donc devenu urgent pour tous les pays de dresser un inventaire qualitatif exact des données naturelles et infrastructurelles existantes. Celles-ci sont utiles à l'étude des diverses possibilités d'utilisation du sol ainsi que d'aménagement. L'aménagement suppose l'existence et la mise à disposition aisée d'informations aussi complètes que possible sur le milieu concerné. Ainsi, la télédétection satellitaire fournit une source de données d'une très grande richesse.

Loin de périmer les techniques cartographiques traditionnelles (prises de vues aériennes), l'importance de l'utilisation des données des capteurs satellitaires (HRV de SPOT, TM de Landsat) pour la révision et la réalisation des cartes topographiques dans les pays en développement n'est plus à démontrer. Parallèlement à l'essor de la télédétection, le développement de l'informatique appliquée à la cartographie et au traitement d'images permet d'accélérer et de diversifier la mise en forme des données géographiques.

La République Islamique de Mauritanie, avec une superficie de 1 032 000 km^2, est entièrement couverte de photographies aériennes à l'échelle du 1: 50 000 datant des années 1950. Des zones localisées le long du fleuve Sénégal sont couvertes par des photographies aériennes à différentes échelles :

- au 1: 50 000 sur l'ensemble du bassin du fleuve Sénégal soit 300 000 km^2 en noir et blanc et en infrarouge;
- au 1: 20 000 sur 6 000 km^2;
- au 1: 10 000 sur 3 000 km^2 dans les zones d'aménagement.

Elle est également couverte de cartes topographiques anciennes et partiellement périmées, réalisées en 1954 par l'Institut géographique national de France. Une cartographie de base à l'échelle 1: 200 000 en 104 feuilles couvre l'ensemble du territoire national à partir d'un réseau de points astronomiques et de couvertures aériennes à l'échelle du1: 50 000. De cette cartographie de base sont issues des cartes dérivées :

- carte à l'échelle du 1: 2 500 000 en une seule feuille;
- carte à l'échelle du 1: 1 000 000 en 11 feuilles avec surcharge routière.

Des cartes à l'échelle du 1: 50 000 couvrant une partie de la vallée du fleuve Sénégal (périmées) ont été réalisées. Dans le cadre du projet conduit par l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS), d'importants travaux cartographiques et géodésiques ont été réalisés dans cette région.

L'étude que nous avons menée dans la région du Trarza au sud de la Mauritanie, à partir d'une image HRV (XS) de SPOT, vise essentiellement deux objectifs. Le premier objectif vise à décrire un processus de révision de cartes topographiques à l'échelle du 1: 100 000 et à établir une spatiocarte à l'échelle du 1: 50 000 en montrant l'intérêt de l'utilisation des images satellitaires. La méthodologie adoptée peut à l'avenir servir de support à la recherche de financement pour un projet de réactualisation de la cartographie de base en Mauritanie. Le second objectif consiste à élaborer une carte d'occupation du sol par classification radiométrique d'image en vue de faire ressortir les différents types de sol et de végétation.

La spatiocarte est un document dont le fond est une image satellitaire améliorée radiométriquement et corrigée géométriquement, sur laquelle on superpose des informations géographiques. L'image obtenue est habillée par des informations cartographiques : thèmes zonaux (végétation, etc), réseau routier, toponymie, carroyage cartographique, titre et légende.

2. Zone d'étude

La zone d'étude est située au sud de la Mauritanie dans la région du Trarza au nord du fleuve Sénégal, soit Rosso (fig. 1). C'est une région plate et elle est caractérisée par une forte emprise humaine avec d'importants aménagements hydro-agricoles. Elle regroupe deux ensembles écologiques particuliers :

- le « walo » au sud de la zone où se développent des cultures irriguées (riz) et de décrues (sorgho, mil);
- le « dierri » au nord de la zone où se pratiquent des cultures hivernales (saison des pluies : 3 mois).

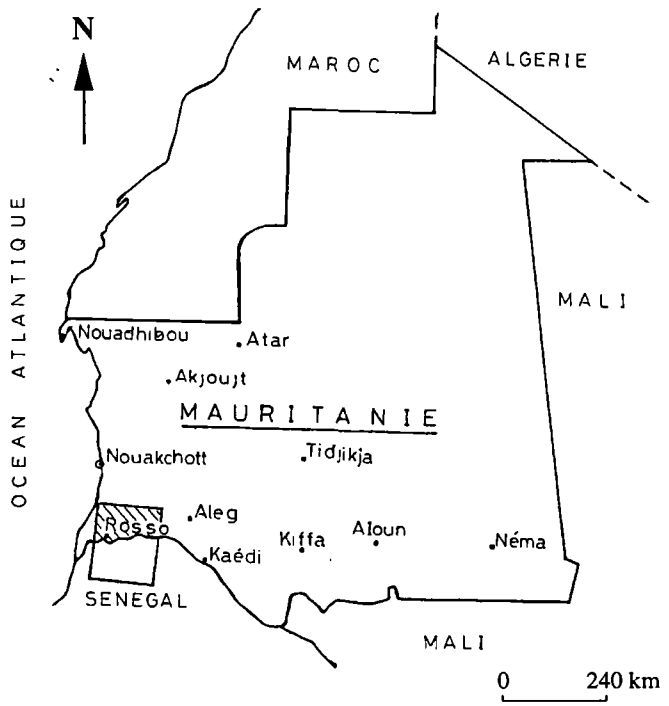


Figure 1. Localisation de la scène d'étude

3. Matériel

Les documents suivants ont été utilisés : 1) image HRV (XS) de SPOT de 1991 (tab. 1); 2) carte topographique à l'échelle du 1: 200 000 de 1954 numérisée en noir et blanc à l'Institut géographique national (IGN) à Paris au pas de 100 microns sur une zone de 5 800 x 5 500 pixels; 3) carte de Dagana (ND 28 III) à l'échelle du 1: 200 000 de 1954; 4) cartes à l'échelle du 1: 50 000 de1964 de la zone (ND 28 III, 3a, 3b); 5) photographies aériennes à émulsion noir et blanc à l'échelle du 1: 60 000 de 1978.

Le système de traitement utilisé est le logiciel *Calyope/Trydin.*

4. Méthodologie

La méthodologie consiste à élaborer un document tout en gardant l'information contenue dans l'image. Le fond de l'image inclus dans la carte a comme objectif essentiel de transmettre une information relative à des thèmes de surface. Cette opération impliquera donc le remplacement de toutes ou d'une partie des trames traditionnelles, soit les estompages, la végétation, l'hydrographie et la nature des sols.

4.1. Mise en correspondance géométrique des données

La correction radiométrique été effectuée par SPOT Image.

La lecture des données (carte numérisée, image HRV) consiste à charger sur l'ordinateur les données numériques afin d'extraire la zone de travail. À partir des « quick-looks » de l'image et de la carte que nous avons créés, une zone d'étude approximative de 1305 x 1362 pixels a été extraite.

L'image est du niveau 1B, donc non superposable à une carte. Pour la rendre superposable à la carte, nous l'avons corrigée géométriquement par prise de points d'appui sur le système *Trydin.* Il s'agit de déterminer une loi qui permet d'associer les coordonnées de la carte (X,Y) et celles de l'image (x,y). Le principe est de saisir des points qui soient facilement identifiables sur la carte et sur l'image. La saisie des points d'appui s'effectue

Tableau 1. Caractéristiques de l'image HRV utilisée

Satellite	SPOT 2
Mode	Multibande
K/J	23-317
Date de prise de vue	04-10-1991
Heure	11 h 34 min 31 s
Nom du capteur	HRV1
Niveau de prétraitement	1B
Résolution	20 m
Angle de prise de vue	R 17,9°

directement à l'écran en pointant successivement sur la carte et sur l'image. Elle est facilitée par l'utilisation des outils du système *Trydin* (curseur avec loupe, adaptation dynamique).

Notre souci a été de choisir des points d'appui sur des éléments ayant *a priori* peu varié; les photographies aériennes (1978) ont été utilisées en renfort. Ceci pose un problème quand on dispose d'une carte ancienne (1954 dans notre cas) et d'une image récente (1991), et que le paysage présente peu d'invariants (buttes, piste d'aéroport, routes principales). Nous avons donc choisi des intersections de cours d'eau et du réseau routier en s'appuyant d'une part, sur les photographies aériennes de 1978 et, d'autre part, sur les valeurs des résidus de la modélisation. En effet, le logiciel *Calyope* permet de calculer les résidus sur des points de contrôle avant même de procéder à la correction géométrique.

L'hypothèse que nous avons faite est que, s'il y a eu des modifications des éléments du paysage du type de ceux retenus comme points d'appui, les décalages résultants présenteront un certain caractère aléatoire. Ainsi, nous avons éliminé tous les points d'appui présentant des résidus supérieurs à un pixel, ce qui réduit les risques de prise en compte pour la modélisation d'éléments qui ont changé. Auparavant, nous avions choisi 13 points d'appui, mais n'en avons retenu que 11 qui avaient des résidus inférieurs au pixel (tab. 2). Après saisie des points d'appui, une fonction polynomiale du 2^e degré est appliquée à l'ensemble de l'image. Pour cette correction géométrique, l'interpolation a été du type bicubique. L'image résultante est compatible au système de référence cartographique choisi (projection UTM).

4.2. Amélioration de la lisibilité de l'image

Pour améliorer la lisibilité de l'image, nous avons effectué, sur chaque canal, un étalement de dynamique pour augmenter le contraste.

Tableau 2. Valeurs des résidus de la correction géométrique

Référence	X	Y	Origine	x	y	Résidus	
						dx	dy
1	176	548	1	189	507	0,1	0,0
2	355	890	2	404	822	-0,1	0,0
3	248	906	3	300	853	0,1	0,0
4	163	959	4	223	919	-0,1	0,1
5	296	1106	5	226	1074	-0,1	0,2
6	296	1091	6	377	1038	0,1	-0,4
7	800	1004	7	874	881	0,0	0,0
8	1047	807	8	1093	640	0,1	-0,1
9	649	480	9	646	368	-0,1	0,1
10	721	1028	10	797	917	-0,4	0,2
11	561	1032	11	635	942	0,4	0,0

4.3. Transformation en couleurs naturelles

Pour obtenir une composition colorée en couleurs naturelles, c'est-à-dire des couleurs qui s'apparentent au paysage naturel, nous avons effectué une conversion RVB-ITS. L'opération consiste à affecter le faisceau bleu au canal vert (XS1), le rouge au canal rouge (XS2) et le vert au canal infrarouge (XS3). Ainsi, dans l'image résultante, la végétation apparaît en vert, l'eau en bleu et les sols nus sont proches de leur couleur naturelle (fig. 26-2, voir cahier couleur).

4.4. Superposition des informations cartographiques

Pour l'insertion des thèmes cartographiques, l'opération a consisté à incruster des thèmes extraits de la carte, au fond de l'image. Pour éviter de rendre illisible notre document, nous n'avons inséré que des thèmes à caractère linéaire (routes). Les photographies aériennes acquises dans le cadre du projet conduit par l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal, ont été d'une grande utilité car, dans l'image HRV, il est difficile d'identifier certaines routes, pistes et sentiers.

L'habillage cartographique consiste à créer un fichier « *overlay* ». Dans le système de traitement utilisé, le module « Habille » prévoit la rédaction d'un cadre et le tracé et la numérotation automatique des méridiens, des parallèles et du carroyage cartographique de la projection choisie. Tous les fichiers créés ont été combinés en une carte mémoire pour la sortie du document final.

5. Analyse et interprétation des résultats

La zone d'étude a subi de grands changements qui apparaissent en comparant l'ancienne carte et le document final (fig. 26-3, voir cahier couleur). Nous remarquons au niveau des éléments linéaires que le tronçon de la route Rosso-Nouakchott a été modifié au PK 5 et que le marigot de garack, qui est alimenté par le fleuve Sénégal a changé de lit à côté du pont de Tounguen. Pour ce qui est des éléments zonaux, nous constatons que les cultures irriguées (riz, maraîchage) se développent au détriment de celles de décrues (mil, niébé) et, au niveau environnement, qu'une forte dégradation de la végétation naturelle (bois, gommeraie) confirme l'avancée du désert.

L'élaboration d'un tel processus demande de procéder avec prudence car dans ce genre de zone où l'information géographique n'est pas suffisante, le choix des points d'appui doit être basé sur des documents cartographiques fiables (les plus récents possibles) pour les corrections géométriques. Pour éviter toute confusion, il est souhaitable d'utiliser des images du niveau de prétraitement 2B (corrigé géométriquement). De plus, il est nécessaire de disposer d'un maximum de données images à savoir : en plus d'une image HRV de SPOT multibande, avoir une autre image en mode panchromatique de la même date pour faire des mixages. Pour assurer une meilleure précision et une bonne qualité graphique, faire un rééchantillonnage avant l'extraction des thèmes à cartographier.

Il y a lieu de prévoir dans le système de traitement utilisé, la possibilité de corriger géométriquement les images à partir de points GPS (*Global Positionning System*) sans avoir recours aux anciennes cartes dont la précision des détails sur le terrain n'est pas fiable surtout quand il s'agit de zones menacées par l'avancée du désert.

L'échelle choisie (1: 100 000), semble être la limite, car la précision du document final est tributaire de celle des anciennes cartes sur lesquelles nous nous sommes appuyés.

6. Conclusion

La télédétection n'est pas la panacée pour tous les problèmes de développement et de gestion des ressources. Néanmoins, elle peut apporter une contribution bien réelle et immédiate à l'établissement de spatiocartes, en améliorant de façon significative la cartographie existante de notre pays, grâce à la fourniture des données de capteurs satellitaires (HRV et TM). Un tel processus est bien adapté aux régions peu transformées par l'Homme où l'information géographique est faible, mais il reste à trouver une solution pour corriger géométriquement les images. Il est souhaitable d'avoir recours aux techniques de positionnement géodésique par le système GPS.

La synthèse des résultats conduit à une réflexion qui montre un intérêt très particulier à développer un tel processus dans les pays en développement compte tenu de leur situation financière et des gains sensibles au niveau des coûts et des délais, en sachant que les méthodes traditionnelles sont coûteuses. Ainsi, pour une zone de 60 x 60 km, nous avons estimé le coût à 192 000 FF avec notre méthode alors que, par la méthode classique, nous l'évaluons à 280 000 FF. La méthode utilisée nous permet donc de faire un gain de 31 % par rapport à la méthode classique.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 275-282

27

Utilisation des images HRV de SPOT pour la détection du changement périurbain à Casablanca (Maroc)

MALIKA AZERZAQ [1], MARIEM ASSAFI [2] et AHMED FAHSI [3]

[1] *Agence foncière, avenue My Youssef, Rabat, Maroc; téléphone : +212 (7) 70-16-67*

[2] *Service topographique de Safi, Safi, Maroc; téléphone : +212 (4) 62-49-36*

[3] *Section de topographie, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc; téléphone : +212 (7) 77-17-58; télécopieur : +212 (7) 77-58-38*

Résumé

La télédétection spatiale devient de plus en plus utile pour le suivi régulier de l'évolution rapide des grandes agglomérations des pays en développement. Casablanca, grande métropole du Maroc, connaît une mutation continuelle et rapide de l'espace agricole en espace bâti. Elle est ainsi un site adéquat pour étudier l'apport des images HRV de SPOT dans la détection du changement. Dans cette étude, nous proposons une méthodologie visant à détecter les changements spatio-temporels, imputables à l'urbanisation, au niveau de la périphérie casablancaise entre 1986 et 1993. Pour cela, nous avons utilisé quatre images multibandes datant de 1986, 1988, 1991 et 1993. La comparaison postclassification a été effectuée sur les deux premières composantes principales et le néo-canal d'indice de végétation en utilisant la méthode de classification hybride pour chaque image. Les images résultantes ont été soustraites l'une de l'autre dans le but d'identifier les changements du non bâti au bâti. Les résultats de cette opération ont montré une extension urbaine maximale de 17 % pour la période 1986-1988 avec une précision de l'ordre de 78 %. Bien que cette valeur soit acceptable, les changements détectés n'ont pas été tous dus à l'urbanisation. Les différentes confusions peuvent être réduites en effectuant une classification hybride plus fine et en testant plusieurs valeurs seuils pour le filtre modal.

1. Introduction

Le Maroc est parmi les pays en développement qui connaissent actuellement une vague d'urbanisation très intense. La mise en œuvre de politiques urbaines pour le suivi régulier de ce phénomène d'urbanisation nécessite l'acquisition d'informations fiables et actualisées sur toutes les formes d'évolution. La comparaison visuelle des photographies aériennes, méthode traditionnelle pour l'acquisition de l'information, a toujours été lente, laborieuse et sujette à des erreurs d'omission. C'est ainsi que les techniques numériques ont connu des développements considérables.

Diverses techniques de détection du changement ont été proposées et testées par différents chercheurs. La comparaison postclassification (WEISMILLER *et al.*, 1977a et 1977b) est la méthode la plus évidente qui compare deux images classées indépendamment. La supposition fondamentale de l'utilisation de la télédétection spatiale pour la détection du changement se résume à ce que tout changement dans la couverture du sol résulte en un changement dans les valeurs spectrales. La différence d'image (GRIFFITS, 1988; JENSEN, 1986), l'analyse en composantes principales (FUNG and LeDREW, 1987a; SINGH, 1989) et la transformation *tasseled cap* (FUNG and LeDREW, 1987b) sont, généralement, les méthodes les plus utilisées dans la détection du changement.

D'autres méthodes plus récentes utilisent des images de hautes résolutions spatiales et spectrales, en l'occurrence la composition P+XS et les techniques SIG (EHLERS, 1990; WESTMORELAND *et al.*, 1992). Ces méthodes sont basées, essentiellement, sur l'interprétation visuelle de l'image, la classification et l'incorporation des données auxiliaires en vue de mieux quantifier l'évolution urbaine. Notre étude vise à mettre en évidence l'évolution de l'espace bâti au niveau des zones périphériques de Casablanca (tab. 1) et à produire ainsi une carte montrant l'expansion urbaine entre 1986 et 1993.

2. Méthodologie

La méthode proposée dans cette étude concerne les traitements préliminaires des images multidates, la comparaison postclassification pour la détection du changement sur les images multidates, l'évaluation de la précision de la méthode de détection du changement et l'interprétation du changement.

2.1. Zone d'étude

Casablanca, capitale économique et industrielle du Maroc, abrite plus du quart des ménages urbains du pays. À cause de son pouvoir d'attraction sur la population rurale, les zones de la périphérie casablancaise connaissent une mutation continuelle de l'espace

Tableau 1. Pourcentages du bâti et du non bâti relatant l'expansion urbaine de la ville de Casablanca durant la période 1986-1993

	1986	1988	1991	1993
Bâti (%)	30	47	57	72
Non bâti (%)	70	53	43	28

agricole en d'autres formes d'occupation du sol. Ces dernières sont la prolifération du logement, l'implantation des équipements, la dissémination des formes d'activités purement urbaines et l'émergence des lieux de loisir. Ainsi, la rapidité de l'expansion urbaine de Casablanca au détriment des zones périurbaines fait de cette ville un site adéquat pour étudier l'apport des images satellitaires pour la détection du changement au niveau de l'espace bâti.

2.2. Sources des données et prétraitement

L'une des importantes considérations temporelles pour la détection du changement est le mois d'acquisition des images. JENSEN (1983) a rapporté que les images prises pendant les périodes ensoleillées présentent un très bon contraste entre les différents détails, en particulier entre ceux de l'urbain et du non urbain. Il a aussi suggéré d'utiliser des images acquises dans la même période de l'année pour la détection du changement et ce, afin de réduire les problèmes dus aux différences des angles solaires, aux changements phénologiques de la végétation et aux différences dans l'humidité des sols. Dans cette étude, quatre images multidates HRV de SPOT, datant du 6 juillet 1986, du 8 août 1988, du 2 juillet 1991 et du 15 février 1993, ont été analysées pour la détection du changement du non bâti au bâti. Des photographies aériennes (noir et blanc) à l'échelle du 1: 20 000, datant du 7 janvier 1987 et une image composée P+XS datant de 1993 ont servi comme réalité de terrain pour évaluer la précision de la détection du changement. Enfin, les cartes topographiques au 1: 50 000 de 1973 ont été utilisées pour la rectification géométrique des images.

2.3. Corrections radiométriques et géométriques des images

Concernant la rectification radiométrique, nous avons utilisé la technique développée par HALL *et al.* (1991). L'image de 1986 a été prise comme référence car ses valeurs minimales étaient les plus faibles. Cette méthode vise à standardiser toutes les images par rapport à l'image de référence et à compenser les erreurs de calibration du capteur ainsi que les effets des différences atmosphériques et d'illumination entre les images. Pour cela, nous avons sélectionné douze pixels dans chacune des zones les plus sombres (voisines de zéro) et les plus brillantes (voisines de 255) dans l'image de référence et celle à corriger. La transformation linéaire reliant les deux valeurs radiométriques dans les deux images est de la forme :

$$Y_i = a_i + b_i X_i$$

où Y_i est la valeur radiométrique d'un pixel dans l'image de référence et X_i la valeur radiométrique du même pixel dans l'image à rectifier. Les constantes a_i et b_i sont, respectivement, la translation et la pente de la droite joignant l'ensemble radiométrique le plus sombre à celui le plus brillant dans chaque bande i. Les relations entre les moyennes radiométriques des ensembles de contrôle dans les deux images (HALL *et al.*, 1991) peuvent donc être exprimées par :

$$a_i + b_i D_{si} = D_{ri}$$

$$a_i + b_i B_{si} = B_{ri}$$

où D_{ri}, D_{si}, B_{ri} et B_{si} sont les moyennes des valeurs radiométriques les plus sombres (D) et les plus brillantes (B) pour l'image de référence (r) et l'image rectifiée (s) dans la ième bande.

Suite à cette correction radiométrique, nous avons procédé à la rectification géométrique des images. La précision de cette rectification influe sur la précision de la détection du changement. Ainsi, l'image de 1993 a été rectifiée par rapport à la carte avec une erreur moyenne quadratique de l'ordre de 0,25 pixel en utilisant 16 points de contrôle. Les autres images ont été rectifiées par rapport à celle de 1993 avec des erreurs résiduelles qui n'ont pas dépassé 0,17 pixel. Le rééchantillonnage des images a été réalisé à l'aide de la méthode du plus proche voisin car celle-ci n'altère pas la valeur radiométrique des pixels (JENSEN, 1986).

2.4. Création des images composées

Comme la détection du changement n'a concerné que les zones périphériques de Casablanca, nous avons extrait, à partir des quatre images, des sous-images représentant les zones d'expansion urbaine et la zone côtière. L'analyse en composantes principales de chaque sous-image nous a permis de retenir la première composante principale représentant en moyenne 78 % de la variance des données initiales et la deuxième composante représentant 21 % de la variance.

À ces deux composantes, pour chaque sous-image, nous avons ajouté l'indice de végétation normalisé (((XS3 - XS2) / (XS3 + XS2) +1) · 128). Ce dernier a permis de rehausser préférentiellement les zones à couvert végétal par rapport à celles bâties. De ce fait, ce néo-canal a été avantageux dans la séparation entre les structures urbaines très fines et minimes, localisées au niveau des zones d'extension urbaine, et la végétation abondante caractérisant ces zones. Les images composées ont été utilisées dans le processus de la comparaison postclassification.

2.5. Comparaison postclassification et détection du changement

L'utilisation de la méthode de comparaison postclassification convenait à cette étude, puisque les données des différentes dates ont été classées séparément. Cette méthode permet de minimiser les effets des conditions atmosphériques différentes et de l'utilisation de capteurs différents lors de l'acquisition des images multidates (SINGH, 1989). Par ailleurs, des études récentes ont montré que la combinaison du filtrage de type modal avec les procédés de classification permet d'améliorer la précision de la détection du changement (JENSEN *et al.*, 1993). Le filtre modal, appliqué dans un voisinage 3 x 3, avec une certaine valeur seuil, généralement égale à trois, permet de supprimer les pixels isolés ou mal classés, ou les pixels du bruit (STOW *et al.*, 1980; JENSEN *et al.*, 1993). Il remplace la valeur du pixel central par une valeur majoritaire. Le seuil de majorité correspond au seuil à partir duquel la valeur majoritaire remplace la valeur du pixel central.

Dans notre étude, nous avons adopté le processus de la classification hybride qui combine la classification non dirigée et celle dirigée et, de ce fait,est généralement plus précise. L'approche de cette classification utilise la notion de groupement (*cluster*) pour améliorer la définition des classes d'échantillonnage qui seront utilisées dans le processus de la classification dirigée. CHUVEICO et CONGALTON (1988) ont rapporté une précision de 60,5 % pour une classification hybride contre 48,1 % seulement pour une classification dirigée. Ainsi, dans une première étape, nous avons utilisé une méthode de

groupement (*Isodata*) pour avoir le fichier des signatures. Ensuite, nous avons utilisé ce fichier pour la classification dirigée. Cette dernière a été réalisée par la combinaison de deux méthodes de classification : parallélépipède et maximum de vraisemblance afin de parer au problème de la distribution non normalisée des images utilisées.

La classification des images de 1986, 1988, 1991 et 1993 a été réalisée en fonction de deux classes : bâti et non bâti. La technique de filtrage de type modal a été appliquée aux quatre images classées, et ce, dans un voisinage de 3 x 3. Dans le but d'identifier les changements du non bâti au bâti, nous avons comparé les images classées et filtrées en les soustrayant l'une de l'autre. Les images des différences résultant de cette opération ont été ensuite transformées en images binaires en codifiant leurs pixels par des valeurs un et zéro correspondant respectivement au changement et non-changement.

2.6. Évaluation de la précision de la méthode de détection du changement

Pour évaluer la précision de notre méthode de détection du changement, nous avons élaboré un schéma d'échantillonnage pour la sélection d'un nombre d'échantillons idéal pour cette évaluation. Ainsi, pour ne pas fixer une valeur arbitraire pour le seuil de précision attendue, nous avons procédé au moyen d'un échantillonnage pilote orientatif. Pour cela, en utilisant une grille régulière superposable à l'image binaire 1986-1993, nous avons localisé 100 échantillons à l'aide d'une table de nombres aléatoires. Ces échantillons nous ont permis d'estimer la précision attendue à 84 %. Par la suite, en utilisant la formule de la théorie de probabilité binômiale, le nombre idéal N d'échantillons à tester pour évaluer les différents types de précision de détection du changement peut être déterminé, d'après SNEDECOR et COCHRAN (1967) comme suit :

$$N = \frac{4 \cdot p \cdot q}{E^2}$$

où p est le pourcentage de précision attendue, q est égal à 100-p et E est l'erreur permise (5 %). Les 215 échantillons résultants ont été localisés à l'aide d'une grille superposable à l'image des différences en utilisant le mode d'échantillonnage systématique stratifié à un élément par strate (SNEDECOR and COCHRAN, 1967). La réalité de terrain pour ces échantillons a été extraite à partir des photographies aériennes au 1: 20 000 et l'image composée P+XS filtrée de 1993.

Une matrice de confusion a été établie entre chaque image binaire et les données de référence (échantillons). À partir de cette matrice, nous avons évalué la précision totale, la précision du producteur et la précision de l'utilisateur concernant le changement du non bâti au bâti. Une dernière méthode d'évaluation de la précision concerne l'utilisation du cœfficient Kappa. Ce cœfficient incorpore tous les éléments de la matrice de confusion, et pas seulement les termes diagonaux, pour sa détermination. Ainsi, il est largement utilisé dans l'évaluation de la précision de la classification et dans les méthodes de détection du changement (FOODY, 1992).

3. Résultats et discussions

Les images de différences (binaires), obtenues à l'issue des classifications individuelles des quatre images multidates composées ont montré des expansions urbaines, respectivement, de 17 %, 10 % et 15 % pour les périodes de 1986-1988, de 1988-1991 et de 1991-1993. Ces données ont été combinées pour créer une carte montrant l'expansion du changement en bâti entre 1986 et 1993 (fig. 27-1, voir cahier couleur). La fiabilité des informations contenues sur cette carte se reflète par les différents indices de précision dérivés à partir des matrices de confusion formées pour les images de différences de 1986-1993 et de 1988-1991 (tab. 2). Sur ce tableau, on montre des précisions totales de l'ordre de 76 % et de 78 % avec des pourcentages d'agrément Kappa, respectivement, de l'ordre de 53 % et 54 % pour les images de différences de 1986-1993 et de 1988-1991.

Bien que ces valeurs reflètent une précision acceptable, les changements détectés ne sont pas tous dus à l'urbanisation. L'analyse visuelle des classifications relatives aux différentes dates a détecté certaines indications du changement du bâti au non bâti qui ne correspondaient pas à la réalité de la ville de Casablanca. De même, nous avons noté des confusions entre le bâti et les sols nus dues au rapprochement des valeurs radiométriques entre ces deux classes. Certains changements apparents ont été produits par le recouvrement spectral entre les classes ou les pixels frontières. Dans ce sens, le réseau routier, en particulier les voies routières ayant des dimensions assez importantes et qui séparent les îlots d'extension urbaine, a créé un grand nombre de confusions. Par exemple, dans la classification de l'image de 1991, ces voies routières ont été affectées à la classe du bâti alors que, dans l'image de 1988, elles ont été omises de cette même classe. D'autres changements ont été produits par les modifications significatives du couvert végétal, en l'occurrence les différences de stades phénologiques entre les dates. Tenant compte de ces confusions, toutes les indications du changement de l'espace bâti devraient être bien interprétées afin de s'assurer de leur validité.

Tableau 2. Matrice de contingence et indices de précision pour les images binaires de 1986-1993 et 1988-1991; classe 1 = aucun changement et classe 2 = changement

		Données de référence (réalité de terrain)		
		classe 1	classe 2	Total
		(1986-1993 / 1988-1991)		1986-1993 / 1988-1991
Données classées	Classe 1	110 / 95	12 / 28	122 / 123
	Classe 2	39 / 12	54 / 44	93 / 56
	Total	149 / 107	66 / 72	215 / 179
Précision du producteur		73,82 / 88,8	81,81 / 61	
Précision de l'utilisateur		90,16 / 77,2	58,06 / 78,6	
Précision totale		.		76,3 / 77,6
Cœfficient Kappa				52,6 / 53,7

4. Conclusions et recommandations

Au terme de cette étude, il apparaît clairement qu'il est possible de localiser les modifications de l'espace périurbain et d'en estimer l'ampleur à partir des images satellitaires à haute résolution spatiale (HRV). La fiabilité des résultats est étroitement liée à la méthode adoptée. La comparaison postclassification, bien que coûteuse, est largement utilisée pour remédier au problème de non coïncidence des périodes d'acquisition des images multidates. Elle conduit à de bons résultats quand les classifications individuelles des images multidates sont précises et comparables pour les différentes dates. C'est pourquoi l'utilisation de la technique de filtrage de type modal pour améliorer la précision de ces classifications individuelles s'est avérée profitable.

La méthodologie utilisée dans cette étude a permis de cerner les transformations spatio-temporelles de l'espace bâti au niveau des zones d'expansion urbaine à un niveau de précision acceptable de 78 %. Toutefois, une amélioration de cette méthodologie aurait permis de produire des documents cartographiques montrant l'évolution du bâti non seulement au niveau des zones périphériques mais aussi à l'intérieur de l'espace urbain . En conséquence, nous recommandons l'utilisation d'un processus de classification hybride guidée qui tiendrait compte des données auxiliaires (cartes d'évolution ou d'occupation et d'utilisation du sol, statistiques disponibles, photographies aériennes et données de terrain) pour que les classifications indépendantes soient aussi précises que possible. Nous suggérons aussi que la valeur seuil pour le filtre modal soit choisie de façon à supprimer le maximum de pixels de bruit ou mal classés. Ce type de classification serait d'autant plus utile pour les zones urbaines présentant une forte hétérogénéité et pourrait améliorer la précision de la détection du changement.

5. Références

CHUVEICO, E. and CONGALTON, R.G. 1988. Using cluster analysis to improve the selection of training statistics in classifying remotely sensed data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, n° 9, p. 1275-1281.

EHLERS, M. 1990. Application of Spot data for regional growth analysis and local planning. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 56, n° 2, p. 175-180.

FOODY, G.-M. 1992. On the compensation for change agreement in image classification accuracy assessment. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 58, n° 10, p. 1459-1460.

FUNG, T. and LeDREW, E. 1987a. Application of principal components analysis to change detection. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 53, n° 12, p. 1649-1658.

FUNG, T. and LEDREW, E. 1987b. Land cover change detection with Landsat MSS and TM data in the Kitchener - Waterloo area, Canada. Technical Papers of the ASPRS-ACSM Annual Convention. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing and American Congress on Surveying and Mapping, Falls Church, Virginia, vol. 6, p. 81-89.

GRIFFITS, G.-H. 1988. Monitoring urban change from Landsat TM and Spot satellite imagery by image differencing. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, European Space Agency, Paris, vol. 1, p. 493-497.

HALL, F.-G., STREBEL, D.-E., NICKSON, J.-E. and GŒTZ, S.-J. 1991. Radiometric rectification: towards a common radiometric response among multidate, multisensor images. Remote Sensing of Environment, vol. 35, n° 1, p. 11-27.

JENSEN, J. R. 1983. Chapter 30 - Urban/suburban land use analysis. *in* Colwell, R.N. (ed.), Manual of Remote Sensing 2ed., American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, Virginia, vol. 2, p. 1571-1666.

JENSEN, J. R. 1986. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Prentice - Hall, Englwood Cliffs, New Jersey, 379 p.

JENSEN, J. R., COWEN, D. J., ALTHAUSEN, J. D., NARUMALANI, S. AND WEATHERBEE, O. 1993. An evaluation of coastwatch change detection protocol in South Carolina. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 59, n° 6, p. 1039-1046.

SINGH, A. 1989. Review article: Digital change detection techniques using remotely sensed data. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, n° 6, p. 989-1003.

SNEDECOR, G.-W. and COCHRAN, W.-F. 1967. Statistical methods. Iowa State University Press, Ames, p. 202-211 et p. 516-517.

STOW, D.A., TINNEY, L.R. and ESTES, J.E. 1980. Deriving land use/land cover change statistics from Landsat : a study of prime agricultural land. Proceedings of the 14th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Environmental Research Institue of Michigan, Ann Arbor, Michigan, vol. 2, p. 1227-1237.

WEISMILLER, R.-A., KRISTOF, S.-J., SCHOLZ, D.-K., ANUTA, P.-E. and MOMIN, S.-A. 1977a. An evaluation of change detection techniques for monitoring coastal zone environments. Proceedings of the 11th International Symposium on Remote Sensing of Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, vol. 2, p. 1229-1238.

WEISMILLER, R.-A., KRISTOF, S.-J., SCHOLZ, D.-K., ANUTA, P.-E. and MOMIN, S.-A. 1977b. Change detection in coastal technique zone environments. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 43, n° 12, p. 1533-1539.

WESTMORELAND, S. DOUGLAS, R. and STOW, M. 1992. Category identification of changed land use polygons in integrated image processing/geographic information system. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 58, n° 11, p. 1593-1599.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 283-290

28

Fusion d'images HRV (P et XS) de SPOT à l'aide de la méthode ARSIS : apports à la cartographie urbaine

THIERRY RANCHIN et LUCIEN WALD

Groupe télédétection et modélisation, Centre d'énergétique, École des mines de Paris, B.P. 207, F-06904 Sophia Antipolis cedex, France; téléphone : +33 (4) 93-95-75-75; télécopieur : +33 (4) 93-95-75-35; CÉ : *ranchin@cenerg.cma.fr; wald@cenerg.cma.fr*

Résumé

L'objectif de cette communication est de présenter une nouvelle méthode permettant la production d'images à haute résolution spatiale, réunissant les qualités de la haute résolution spatiale et spectrale des satellites d'observation de la Terre et plus particulièrement du capteur HRV de SPOT pour la cartographie urbaine. Les techniques de cartographie urbaine s'appuient sur des algorithmes de classification, dirigée ou non. La haute résolution spatiale ayant, pour cette application, un intérêt prépondérant, des méthodes permettant d'améliorer la résolution spatiale des images multibandes XS ont été développées. Une analyse de ces méthodes a montré qu'elles ne respectaient pas le contenu spectral original des images. La méthode ARSIS (amélioration de la résolution spectrale par injection de structures) a été développée pour fournir des images multibandes à haute résolution spatiale. Elle permet la préservation de l'information originale de ces images et, par conséquent, d'améliorer l'efficacité des classificateurs. Elle s'appuie sur la transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution, qui sont brièvement présentées. Une démonstration de cette méthode est présentée. Une évaluation quantitative a montré que la méthode ARSIS fournit de meilleurs résultats que les autres méthodes en termes de préservation de la qualité spectrale des images. Des classifications réalisées sur les données originales et sur les images résultant de la fusion sont comparées.

1. Introduction

Avec l'apparition des satellites d'observation de la Terre à très haute résolution spatiale (de l'ordre du mètre), la cartographie urbaine est l'une des applications les plus prometteuses de la télédétection. La plupart des satellites d'observation de la Terre fournissent ou fourniront une image à haute résolution spatiale et plusieurs images à moins bonne résolution spatiale, mais à haute résolution spectrale. Les techniques de cartographie urbaine s'appuient sur la photo-interprétation et sur des classifications dirigées ou non, permettant de faciliter la tâche du photo-interprète. Les techniques actuelles d'amélioration de la résolution spatiale des images ont été analysées par MANGOLINI *et al.* (1995). La plupart ont en commun le non-respect du contenu spectral des images originales. Seule la duplication de pixels respecte l'information originale de ces images, mais ne tire aucun avantage de la présence de l'image panchromatique.

La méthode ARSIS développée conjointement par l'Aérospatiale et l'École des mines de Paris (RANCHIN, 1993; RANCHIN *et al.*, 1994; MANGOLINI, 1994) permet, dans un ensemble d'images de résolutions spatiale et spectrale différentes, d'amener les images ayant une moins bonne résolution spatiale à la meilleure résolution spatiale disponible dans l'ensemble de données. Cependant, la qualité spectrale des images dont on améliore la résolution spatiale est préservée. Les images obtenues peuvent être utilisées à d'autres fins que la simple visualisation et ainsi améliorer, par exemple, la précision des classifications réalisées sur les images multibandes originales. Cette méthode s'appuie sur la transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution décrites brièvement à la section 2. La méthode ARSIS est présentée à la section 3. Un exemple d'application de cette méthode sur un extrait d'une scène HRV de SPOT de la ville de Barcelone (Espagne) est présenté et évalué à la section 4. Des classifications binaires réalisées sur les images originales et sur les images résultant du processus de fusion sont comparées. En conclusion, les autres cas déjà étudiés sont présentés et les perspectives d'utilisation de cette méthode évoquées.

2. Transformée en ondelettes et analyse multirésolution

L'analyse multirésolution a été introduite par MALLAT (1989). Cet outil mathématique permet de calculer des approximations successives d'une même image à des résolutions spatiales de plus en plus grossières. Elle peut être représentée par une pyramide (fig. 1) dont la base est l'image originale et dont les différentes approximations sont les différents étages de la pyramide. La limite théorique de cette analyse est une image d'un pixel qui représenterait la moyenne de l'image de départ.

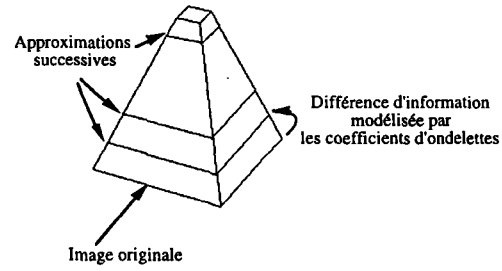


Figure 1. Pyramide représentant une analyse multirésolution

La différence d'information existant entre deux approximations successives est modélisée par des cœfficients d'ondelettes calculés à partir de la transformée en ondelettes. Les bases d'ondelettes sont construites par dilatations et translations d'une fonction unique, appelée ondelette-mère. Le signal, ou l'image, est décomposé dans cette base et une représentation temps-fréquence (pour un signal) ou espace-échelle (pour une image) est obtenue.

Cette opération d'analyse faisant appel à la transformée en ondelettes est inversible et à reconstruction exacte. Ainsi, à partir d'une approximation de l'image d'origine (un étage de la pyramide) et des images de cœfficients d'ondelettes (représentant la différence d'information entre deux approximations successives), il est possible de reconstruire exactement l'image d'origine. RANCHIN et WALD (1993) ont présenté quelques possibilités d'utilisation de ces outils dans le cadre de la télédétection; pour une introduction plus mathématique, on peut consulter par exemple MALLAT (1989), RIOUL et VETTERLI (1991), DAUBECHIES (1992) et MEYER (1992).

3. Méthode ARSIS

Dans cette section, la méthode ARSIS est présentée pour le cas du capteur HRV de SPOT. Ce capteur fournit une image panchromatique P (résolution spatiale : 10 m) et trois images XS_i (résolution spatiale : 20 m). La méthode ARSIS permet de synthétiser des images XS_i-HR (i = 1 à 3; HR = haute résolution) à la résolution spatiale de 10 m tout en préservant la qualité spectrale des images XS_i originales. Le schéma de cette méthode est présenté à la figure 2.

Une analyse multirésolution utilisant la transformée en ondelettes est appliquée à l'image P. Des approximations de cette image à 20 m, 40 m, 80 m, etc, sont calculées (opération 1). Les différences d'information entre les approximations successives de l'image originale sont modélisées par les cœfficients d'ondelettes. De manière similaire, l'image XS_i est décomposée et des approximations à 40 m, 80 m, etc, sont calculées

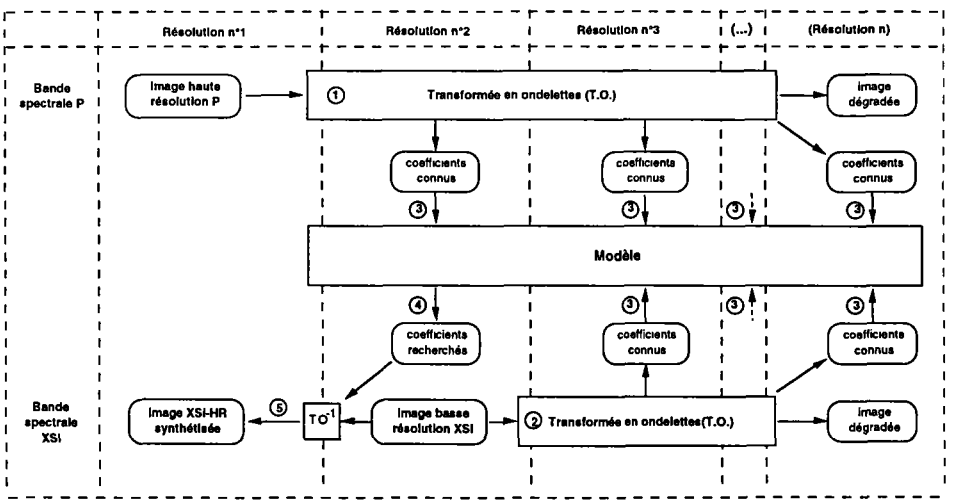


Figure 2. Méthode ARSIS

(opération 2). Un modèle de transformation des cœfficients d'ondelettes de l'image P vers les cœfficients d'ondelettes de l'image XS_i pour une résolution spatiale donnée est calculé (opération 3). Ce modèle est alors inféré et appliqué à l'image de cœfficients d'ondelettes P représentant la différence d'information entre l'image P à la résolution spatiale de 10 m et son approximation à la résolution spatiale de 20 m (opération 4). Cette opération permet de calculer les cœfficients d'ondelettes nécessaires à la synthèse de l'image XS_i-HR. Cette synthèse s'effectue par reconstruction (opération 5, inverse de l'analyse) à partir des cœfficients d'ondelettes synthétisés et de l'image originale XS_i.

Cette méthode est applicable à d'autres résolutions spatiales et à d'autres bandes spectrales d'après le même principe.

4. Exemple : extrait d'une scène HRV sur Barcelone (Espagne)

La scène HRV traitée a été acquise sur la ville de Barcelone (Espagne) le 11 septembre 1990. Barcelone est une cité située au nord-est de l'Espagne sur la côte méditerranéenne. Cette scène a un contenu thématique très riche. Elle comprend un port, un aéroport, des zones urbaines avec des infrastructures routières et autoroutières ainsi qu'un réseau hydrologique, des champs cultivés, des zones montagneuses et une végétation de type méditerranéen. Elle est composée de l'image P et des images multibandes XS_i, géométriquement superposables.

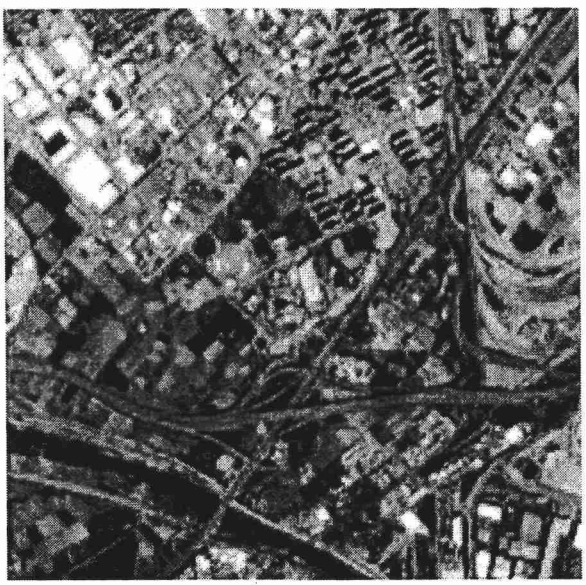
La méthode ARSIS a été appliquée à cet ensemble d'images. La figure 3a présente un extrait de l'image XS1 originale. Elle comprend des champs cultivés de petite taille (de l'ordre de quelques centaines de mètres carrés) situés dans sa partie inférieure gauche, une zone urbaine dans sa partie supérieure gauche, ainsi que des routes et autoroutes visibles de manière distincte. Cependant, les échangeurs sont difficilement discernables sur cette image. La figure 3b présente l'image XS1-HR résultant du processus de fusion. La qualité visuelle de cette image est due à l'introduction de l'information extraite dans l'image P et modélisée afin de préserver la qualité spectrale de cette image. Ainsi, on distingue nettement sur cet extrait les différents échangeurs, le réseau routier dans la partie supérieure gauche ainsi que les grands bâtiments.

L'apport quantitatif de la méthode ARSIS ne peut s'évaluer qu'en confrontant le résultat du processus de fusion à une référence. Cependant, il n'est pas possible de disposer actuellement d'images XS_i à la résolution spatiale de 10 m. Afin de contourner ce problème, on simule un ensemble d'images en décalant les résolutions spatiales d'un facteur 2. Ainsi, l'ensemble d'images est composé d'une image P à 20 m et d'images XS_i à 40 m. En appliquant la méthode ARSIS, on obtient des images XS_i* à la résolution spatiale de 20 m que l'on peut comparer aux images XS_i originales. Bien qu'on ne puisse déduire de cette comparaison que la qualité des images XS_i-HR soit similaire à celle des images XS_i* (MANGOLINI, 1994), cette opération permet de se faire une idée de la qualité des résultats obtenus. Cette méthodologie a été appliquée par MANGOLINI *et al.* (1995) et a permis de montrer que la méthode ARSIS fournit de meilleurs résultats que les autres méthodes en termes de préservation de la qualité spectrale des images.

Étant donné le respect de la qualité spectrale amené par cette méthode, il est pertinent de comparer des classifications réalisées sur les images XS_i et XS_i-HR. La figure 4a présente une classification non dirigée, réalisée à partir d'une trichromie des images XS_i, dont l'objet est la mise en évidence d'une classe « réseau routier ». L'algorithme utilisé est une classification ascendante hiérarchique (ALBUISSON, 1993). La classe « réseau routier » est présentée en blanc.

(a)

(b)



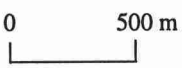


Figure 3. Section de la ville de Barcelone (Espagne) : a) bande XS1 du capteur HRV de SPOT; b) image XS1-HR synthétisée à l'aide de la méthode ARSIS sur la même zone

La figure 4b présente la même démarche appliquée aux images synthétisées XS_i-HR. La précision apportée dans cette classification par la haute résolution spatiale, permet de montrer de manière significative son apport à la cartographie urbaine. La partie supérieure gauche de cette figure permet de distinguer nettement le réseau routier dans cette zone urbanisée. Il ne nous est cependant pas possible d'attester que les pixels de cette classe dans les deux images sont effectivement des pixels « réseau routier » par manque de réalité de terrain.

5. Conclusions et perspectives

Nous avons présenté dans cet article une méthode permettant de synthétiser à partir d'un ensemble d'images de différentes résolutions spatiales et spectrales, des images multibandes à la plus haute résolution spatiale disponible. La qualité spectrale des images synthétisées est préservée de par l'utilisation d'outils mathématiques puissants : la transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution. Cette qualité spectrale nous a permis d'améliorer la qualité de classifications en zone urbaine et d'obtenir une meilleure définition des classes.

Bien que présentée dans le cas du capteur HRV, la méthode ARSIS est applicable à d'autres cas. Elle fait actuellement l'objet d'autres études et a été appliquée notamment à la fusion d'images P du capteur HRV (10 m) et TM de Landsat (30 m et 120 m pour la bande 6) et à la fusion d'images TM (bande 6 : 120 m, autres bandes : 30 m) pour l'étude des pollutions de l'air en ville. Le cas du futur satellite SPOT 4 a aussi été exploré (RANCHIN and WALD, 1995). Une étude est actuellement en cours sur des simulations des futurs satellites SPOT 5 et 6. Elle permettra de valider la démarche appliquée pour l'évaluation quantitative de la méthode ARSIS et d'attester son apport à la cartographie urbaine. La méthode ARSIS a aussi été appliquée à la fusion d'images multibandes XS du capteur HRV de SPOT (20 m) et du satellite d'origine russe KVR-1000 (résolution spatiale 2 m, bande spectrale 0,51 - 0,76 µm) pour la cartographie urbaine fine (discrimination des différents types de routes, de bâtiments, des zones de végétation) et fera l'objet d'une publication future.

6. Références

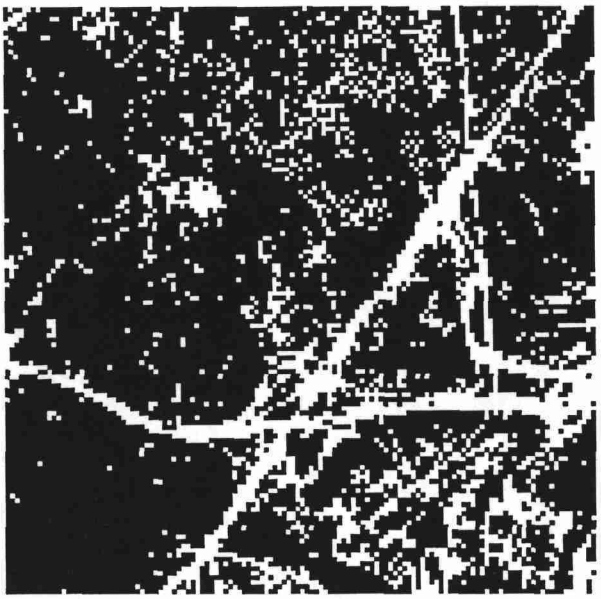
ALBUISSON, M. 1993. Codage trichrome et classification. *in* J.-M. Dubois et F. Blasco (réd.). Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Troisièmes journées scientifiques du réseau de télédétection de l'UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990, Presses de l'Université du Québec et AUPELF-UREF, Sainte-Foy (Québec), p. 167-173.

DAUBECHIES, I. 1992. Ten lectures on wavelets. CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics 61, Society for industrial and applieds mathematics (SIAM), Philadelphia, USA, 357 p.

MALLAT, S.G. 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 11, p. 674-693.

MANGOLINI, M. 1994. Apport de la fusion d'images satellitaires multicapteurs au niveau pixel en télédétection et photo-interprétation. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 174 p.

(a)



(b)

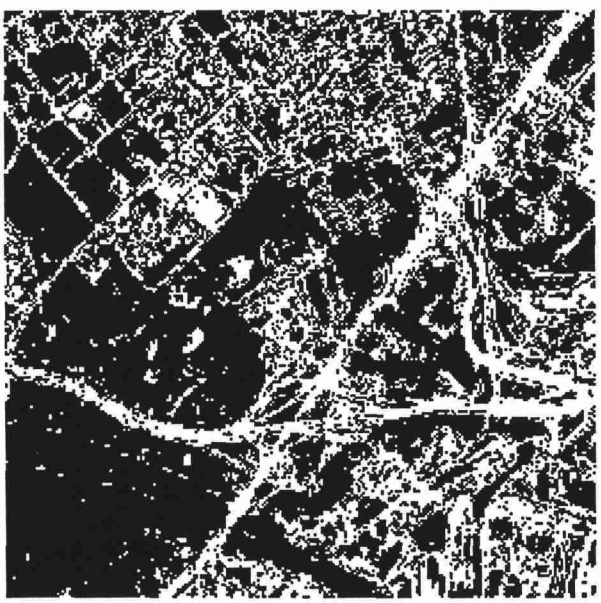


Figure 4. Classification : a) à partir d'une combinaison colorée des images XS_i originales; b) à partir d'une combinaison colorée des images XS_i-HR; la classe blanche représente dans les deux cas le réseau routier

MANGOLINI, M., RANCHIN, T. et WALD, L. 1995. Évaluation de la qualité des images multispectrales à haute résolution spatiale dérivées de SPOT. *in* Comptes rendus du colloque « Qualité de l'interprétation des images de télédétection pour la cartographie », Grignon, 1-3 septembre 1994, Société française de photogrammétrie et télédétection (SFPT), Bulletin n° 137, p. 24-29.

MEYER, Y. 1992. Les ondelettes: algorithmes et applications. Armand Colin éditeurs, Paris, 172 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.

RANCHIN, T. and WALD, L. 1993. The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, n° 3, p. 615-619.

RANCHIN, T. and WALD, L. 1995. Preparation of SPOT 4 mission: production of high resolution (10 m) multispectral images using the ARSIS method. *in* Proceedings of 15th symposium of EARSeL, Progress in Environmental Research and Applications, Basel, Switzerland, 4-6 septembre 1995 (sous presse).

RANCHIN, T., WALD, L. and MANGOLINI, M. 1994. Efficient data fusion using wavelet transform: the case of SPOT satellite images. Proceedings of the SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation, vol. 2034, p 171-178.

RIOUL, O. and VETTERLI, M. 1991. Wavelets and signal processing. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 8, p. 14-38.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p.291-298

29

Restitution de photographies satellitaires pour la création d'une banque de données topographiques

FABRICE MULLER [1] et PASCAL BRACKMAN [2]

[1] *Laboratoire SURFACES, Université de Liège, 7 place du 20 Août, B4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (4) 366-57-45; télécopieur : +32 (4) 366-56-93; CÉ : surfaces@geo.ulg.ac.be*

[2] *TELE ATLAS, 92 Moutstraat, B9000 Gent, Belgique; téléphone : +32 (9) 222-56-58; télécopieur : +32 (9) 222-74-12; CÉ : pbr@teleatlas.be*

Résumé

Avec le développement des systèmes d'information géographique (SIG), l'intérêt suscité par les banques de données vectorielles est de plus en plus grand. Il est donc important de s'intéresser à la création et à la mise à jour de ces banques de données. Les photographies satellitaires russes de type KVR-1000 semblent adéquates pour réaliser ce travail au vu de leur haute résolution spatiale de l'ordre de 2 m. Après numérisation à l'aide d'un scanneur, les photographies sont exploitables par des méthodes numériques. Étant donné le caractère panchromatique et la pauvre résolution spectrale de KVR-1000, l'usage conjoint d'une image HRV (XS) de SPOT de la même zone s'avère très utile. À la demande de TELE ATLAS, un test de création d'une banque de données vectorielles du réseau routier, a été effectué par le Laboratoire SURFACES, à partir de quatre zones choisies dans la région de Bruxelles. Après correction géométrique et mise en concordance spatiale des deux images, les quatre zones de 2 x 2 km ont été extraites. Ensuite, sur base de KVR-1000 seule ou d'une image colorée intégrant KVR-1000 et HRV (XS) de SPOT, la saisie manuelle du réseau routier a pu être menée à bien. La haute résolution offerte rend cette opération aisée ainsi que la détermination et la délimitation des objets au sol. Les résultats obtenus présentent une erreur planimétrique moyenne de 11,84 m et ils peuvent donc être introduits dans la base de données.

1. Introduction

Depuis quelques années, le développement des systèmes d'information géographique (SIG) suscite un intérêt sans cesse croissant pour les banques de données géographiques vectorielles. La création et la mise à jour de ces banques de données doivent être réalisées à partir de cartes existantes ou de relevés de terrain. Parallèlement, l'ouverture récente des pays de l'Europe de l'Est a engendré l'apparition, sur le marché international, de photographies satellitaires russes à haute résolution. Ces photographies, à usage strictement militaire du temps de l'U.R.S.S., sont maintenant commercialisées par diverses firmes, aussi bien à l'est qu'à l'ouest. Il semblait, par conséquent, très intéressant d'étudier les potentialités de ces photographies dans le cadre de la création et de la mise à jour des banques de données vectorielles. Ceci explique pourquoi, suite à la demande de la firme TELE ATLAS qui réalise des banques de données du réseau routier de plusieurs pays européens, des tests de substitution des cartes topographiques habituelles par des photographies satellitaires à haute résolution, ont été réalisés par le Laboratoire SURFACES de l'Université de Liège. Ces tests consistent à saisir l'information planimétrique souhaitée, directement à partir des photographies préalablement numérisées, en lieu et place des cartes topographiques parfois vieilles de quelques décennies.

2. Matériel et produits utilisés

Les diverses opérations de traitement d'images ont été réalisées sur un PC équipé d'un processeur 80486 cadencé à 33 MHz avec le logiciel *PhotoStyler*, ainsi que sur une station INTERGRAPH avec les logiciels *MicroStation* et *ISI-2*. En ce qui concerne les produits satellitaires, le choix s'est porté sur une photographie numérisée de type KVR-1000 de mai 1992 et sur une image HRV (XS) de juin 1992. La région choisie pour l'étude est la banlieue sud-est de Bruxelles. L'image HRV (XS) a été choisie pour son caractère multibande, alors que le choix de KVR-1000 panchromatique a été dicté par la nécessité d'une très haute résolution spatiale, environ 2 m après numérisation. Le film KVR-1000 a une taille de 18 x 18 cm et couvre une surface au sol de 40 x 40 km. La photographie est prise à une altitude d'environ 220 km, ce qui représente une échelle de 1: 220 000 sur le film. Les photographies sont commercialisées sous forme de copies des films originaux, ou bien sous forme digitale après numérisation à l'aide d'un scanneur. Dans le cadre de cette étude, on a opté pour le format numérique afin de pouvoir traiter l'image de manière digitale et l'intégrer à HRV (XS). Le film a été numérisé avec une ouverture de 8 mm, ce qui a engendré des pixels couvrant chacun une surface au sol de 2,2 x 2,2 m. L'image résultante est ainsi formée de 22 500 lignes sur 22 500 colonnes et constitue un fichier d'environ 500 mégaoctets.

3. Corrections géométriques

Quatre zones de 2 x 2 km ont été choisies pour représenter divers types d'occupation urbaine : 1) échangeur autoroutier : région de Zaventem; 2) urbaine à forte densité : région d'Etterbeek; 3) urbaine à densité moyenne : région d'Overijse; 4) rurale : région de Neerijse.

Une correction géométrique a été réalisée sur un extrait de l'image KVR-1000, englobant les quatre zones-témoins. Pour cela, une cinquantaine de points de contrôle ont été collectés entre, d'une part, l'image brute, et, d'autre part, des cartes topographiques au 1: 25 000. Le système de coordonnées utilisé est le *Lambert belge*.

La résolution originale de KVR-1000 a été conservée et l'image rectifiée a ainsi des pixels de 2,2 x 2,2 m. Ensuite, l'image HRV (XS) a été rectifiée sur base de la nouvelle image KVR-1000 obtenue à l'étape précédente. Cette rectification s'est accompagnée d'un changement de la taille des pixels qui est passée de 20 à 2,2 m, c'est-à-dire que le nombre total de pixels a été multiplié par un facteur approximatif de 80. Les valeurs obtenues pour les nouveaux pixels ont été engendrées par interpolation bilinéaire.

Si on considère, par exemple, une erreur planimétrique de 10 m, l'amplitude du relief acceptée peut être calculée par la formule suivante (CARRÉ, 1972) :

$$Z = \frac{E \cdot f}{d}$$

où Z : amplitude du relief maximum acceptable;
E : erreur planimétrique tolérée;
f : focale de la chambre de prise de vue;
d : distance du centre au bord du film photographique.

Ainsi, pour une photographie KVR-1000 de format 18 x 18 cm, avec f = 1000 mm et d = 90 mm, on reste au-dessous des 10 m d'erreur planimétrique pour un relief dont l'amplitude ne dépasse pas 111 m. Si tel n'est pas le cas, on peut toujours augmenter la valeur de Z en réduisant d, ce qui consiste à ne faire usage que d'une partie plus restreinte du film photographique.

4. Intégration de HRV (XS) et KVR-1000

La combinaison des images HRV (XS) et KVR-1000 permet la création d'images hybrides en couleurs à haute résolution spatiale. Cette intégration est réalisée par la transformation RVB (rouge, vert, bleu) vers LTS (luminance, teinte, saturation) et son inverse. Un choix judicieux de l'ordre des canaux en entrée lors de ces deux transformations donne également la possibilité d'obtenir une image en couleurs naturelles. Considérons une composition colorée dans laquelle on attribue respectivement XS3, XS2 et XS1 aux couleurs R, V et B. La conversion de cette image RVB vers le système LTS fournit trois nouveaux canaux pour lesquels on remplace L par l'unique bande de l'image KVR-1000, avant de procéder à la transformation inverse qui permet de recouvrer une image dans le système RVB. Une simple permutation des canaux R et V permet alors, dans la plupart des cas, d'obtenir une image colorée à haute résolution qui présente des couleurs dites naturelles.

5. Éléments planimétriques recherchés

Le but de cette étude est d'extraire des éléments planimétriques, avec éventuellement certains attributs, pour les inclure dans la base de données vectorielles du réseau routier. L'extraction automatique repose actuellement sur des méthodes qui donnent des résultats non suffisamment fiables pour une application de ce type. C'est pourquoi, les tests ont été

basés sur une extraction manuelle par interprétation visuelle de KVR-1000 seule ou faisant appel à une image hybride en couleurs naturelles.

Avec cette technique, il s'est avéré possible d'extraire les éléments constitutifs de la banque de données de TELE ATLAS (tab. 1).

6. Résultats

Les éléments précédemment cités sont reconnaissables avec des degrés de facilité divers. Ainsi, il est beaucoup plus facile de suivre le tracé d'une autoroute que celui d'une simple route en zone rurale. Pour les rues, le cas le plus simple est celui des zones à forte densité d'urbanisation car les rues sont bien délimitées par les quartiers, alors qu'en zone rurale, les habitations en bordure de route engendrent parfois des problèmes pour la délimitation. Le recours à l'usage de filtres (principalement des filtres passe-haut qui font ressortir les hautes fréquences) peut très souvent augmenter le contraste des éléments linéaires dans les images. Une image en couleurs naturelles aide aussi à la délimitation de certaines zones. Il est donc souvent préférable, dans la mesure du possible, de travailler simultanément à partir de KVR-1000, KVR-1000 filtrée et KVR-1000 + HRV (XS).

Des mesures ont été effectuées entre les résultats de la numérisation et les données existantes dans la banque de données de TELE ATLAS pour les quatre zones-témoins. Pour chaque zone, dix points ont été choisis dont les coordonnées ont été collectées. Sur le tableau 2, on synthétise ces mesures et présente les différences obtenues : S_X et S_Y sont les coordonnées en X et en Y des points obtenus par numérisation, TA_X et TA_Y sont les

Tableau 1. Éléments constituant la banque de données TELE ATLAS

1.	Routes	- autoroutes - routes à plusieurs voies - bretelles d'autoroutes - ronds-points - routes parallèles - routes d'accès aux aires de repos, stations d'essence, restaurants, hôtels, etc. - autres routes
2.	Ponts et tunnels	
3.	Croisements à niveaux	- supérieur - inférieur
4.	Occupation des sols	- zones urbaines (contours) - parcs (superficie > 50 000 m^2) - forêts - zones industrielles
5.	Chemins de fer	
6.	Cours d'eau	
7.	Services	- aéroport - stationnement - aire de repos

Tableau 2. Comparaison des résultats obtenus avec les résultats existants dans la banque de données; S_X et S_Y sont les coordonnées des points obtenus par numérisation; TA_X et TA_Y sont les coordonnées des mêmes points dans la banque de données; D_X et D_Y expriment les différences entre ces coordonnées

	S_X (m)	S_Y (m)	TA_X (m)	TA_Y (m)	D_X (m)	D_Y (m)	Δ (m)	Direction du déplacement par rapport au nord (degré)
Neerijse	168485	167885	168491	167900	-6	-15	16,16	21,80140
	168562	167539	168558	167559	4	-20	20,40	-11,30993
	168537	167423	168533	167447	4	-24	24,33	-9,46232
	168219	167545	168225	167570	-6	-25	25,71	13,49573
	168218	166759	168225	166766	-7	-7	9,90	45,00000
	167800	167297	167795	167314	5	-17	17,72	-16,38954
	167837	167438	167849	167449	-12	-11	16,28	47,48955
	167949	167466	167945	167477	4	-11	11,70	-19,98310
	168080	167479	168079	167486	1	-7	7,07	-8,13010
	167941	166852	167941	166879	0	-27	27,00	0
Overrijse	161758	163322	161766	163320	-8	2	8,25	-75,96375
	161902	163399	161914	163397	-12	2	12,17	-80,53767
	161725	163440	161737	163443	-12	-3	12,37	75,96375
	162021	163690	162034	163694	-13	-4	13,60	72,89727
	162488	162923	162496	162926	-8	-3	8,54	69,44395
	162349	162541	162348	162546	1	-5	5,10	-11,30993
	162688	161868	162705	161865	-17	3	17,26	-79,99202
	162439	161748	162451	161755	-12	-7	13,89	59,74356
	161880	161738	161882	161740	-2	-2	2,83	45,00000
	160955	163018	160976	163016	-21	2	21,10	-84,55966
Zaventem	156076	175558	156068	175562	8	-4	8,94	-63,43494
	156094	175563	156088	175573	6	-10	11,66	-30,96375
	156275	175944	156275	175944	0	0	0,00	0
	156155	175921	156157	175925	-2	-4	4,47	26,56505
	156309	176051	156319	176058	-10	-7	12,21	55,00797
	156416	175825	156412	175822	4	3	5,00	53,13010
	155876	176124	155881	176118	-5	6	7,81	-39,80557
	156056	176167	156057	176157	-1	10	10,05	-5,71059
	156128	176235	156132	176225	-4	10	10,77	-21,80140
	155959	176002	155949	176007	10	-5	11,18	-63,43494
Etterbeek	151796	168919	151806	168913	-10	6	11,66	-59,03624
	151809	168763	151819	168759	-10	4	10,77	-68,19859
	151864	168584	151877	168582	-13	2	13,15	-81,25383
	152015	168708	152028	168704	-13	4	13,60	-72,89727
	151214	168384	151226	168376	-12	8	14,42	-56,30993
	151175	168638	151185	168632	-10	6	11,66	-59,03624
	150978	168931	150985	168932	-7	-1	7,07	81,86989
	151075	168970	151081	168973	-6	-3	6,71	63,43494
	151160	169069	151166	169067	-6	2	6,32	-71,56505
	151176	169014	151181	169015	-5	-1	5,10	78,69006
Moyenne					-5,075	-3,825	11,848	
Écart-type							6,06	

coordonnées des mêmes points dans la banque de données, D_X et D_Y sont respectivement les différences (S_X - TA_X) et (S_Y - TA_Y), et Δ est donné par :

$$\Delta = \sqrt{D_X^2 + D_Y^2}$$

Les directions du déplacement existant entre les éléments vectoriels saisis et ceux de la banque de données sont présentées sous la forme d'un angle par rapport au nord. Souvent, ce déplacement existe suivant un axe de direction majoritaire, et est donc assez facile à corriger. Il s'explique par la présence d'ombres en zones urbaines sur l'image KVR-1000. Ainsi, les ombres des bâtiments projetées sur les rues rendent difficile la localisation exacte du centre des rues, et cela induit parfois un déplacement des éléments vectoriels par rapport à la réalité du terrain. Une analyse détaillée du tableau 1 montre que $\Delta_{min} = 0$ m, $\Delta_{max} = 27$ m, et que $\Delta_{moy} = 11{,}84$ m avec $\sigma = 6{,}06$ m. Cette erreur moyenne est jugée entièrement satisfaisante si on sait que les éléments de la banque de données, considérée ici comme support de référence, ont été saisis sur base de cartes au 1: 10 000.

La figure 1a montre la situation visible sur l'image KVR-1000 pour une zone périurbaine. Le résultat obtenu par numérisation est présenté à la figure 1b. Les figures 2a et 2b illustrent le cas d'une zone à forte densité urbaine.

7. Conclusions

Il ressort de cette étude que l'exploitation des photographies satellitaires KVR-1000 à haute résolution spatiale, permet la création et la mise à jour de banques de données géographiques vectorielles, et ce avec une très bonne fiabilité. Le recours à ce type de photographies se justifie pour toutes les zones pour lesquelles la cartographie n'est pas récente. Par rapport à la photographie aérienne, elle présente l'avantage de couvrir une surface au sol de 40 x 40 km par scène, et réduit ainsi fortement les assemblages de scènes pour la réalisation de mosaïques qui font la lourdeur de l'utilisation des photographies aériennes.

À cela s'ajoute l'apparition, dans un avenir annoncé comme proche, d'images numériques captées depuis des satellites de la nouvelle génération, et offrant des résolutions allant jusqu'à 1 m (*Space Imaging, Eyeglass, Earth Watch,* etc.).

Au vu des résultats obtenus au terme de la présente étude, TELE ATLAS demande au Laboratoire SURFACES de poursuivre la collaboration afin d'assister TELE ATLAS dans la modification de son logiciel pour permettre la numérisation à partir de ce type d'images directement sur écran.

8. Référence

CARRÉ, J., 1972. Lecture et exploitation des photographies aériennes (Tome 2). Collection technique de l'Institut géographique national. Eyrolles, Paris, 212 p.

a)

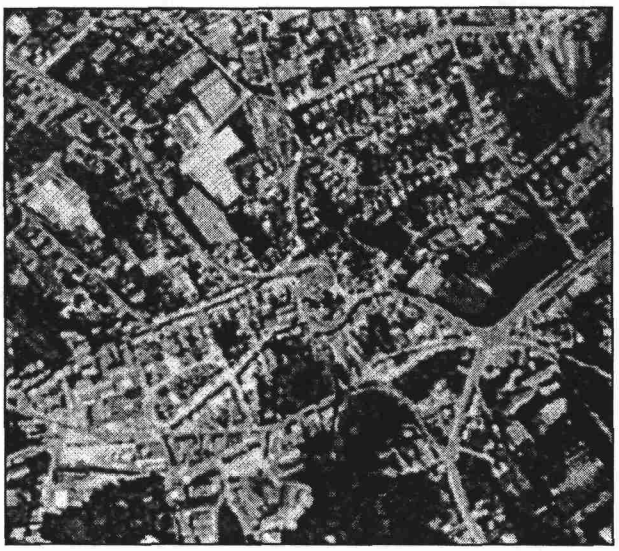


Fig. 1a. Image KVR-1000 pour une zone périurbaine.

b)

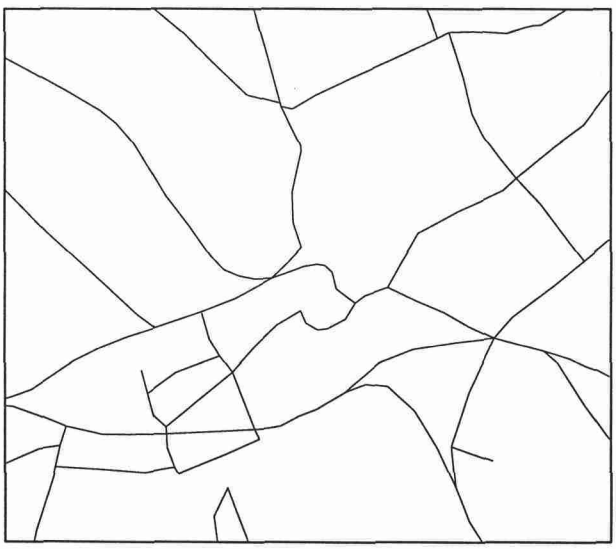


Figure 1. Image KVR-1000 pour une zone périurbaine (a) et résultat de la numérisation à partir de cette image (b)

a)

b)

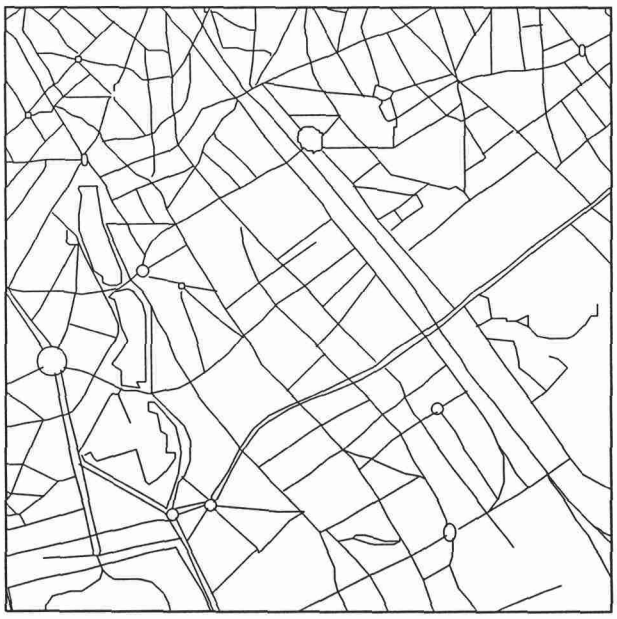


Figure 2. Image KVR-1000 pour une zone à forte densité urbaine (a) et résultat de la numérisation à partir de cette image (b)

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 299-306

30

Application de la télédétection à l'étude des changements urbains et des transformations du littoral à Cotonou (Bénin)

CLAUDE LUCIEN CODJIA

Unité de recherches associées (URA), Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), Université nationale du Bénin, 03 B.P. 2984, Cotonou, Bénin;
téléphone : +229 35-05-47; télécopieur : +229 30-09-38
CÉ : ccodjia@syfed.bj.refer.org

Résumé

Saisir la dynamique de l'habitat et comprendre la cinématique du littoral par un examen diachronique entre 1963 et 1987, tel est le but de cette étude basée sur la télédétection satellitaire. Capitale économique du Bénin et ville portuaire de l'Afrique occidentale, Cotonou a pris un essor économique à partir de 1963, année de la construction de son port. L'unique source de données cartographiques disponibles sur la ville était une carte topographique au 1: 50 000 datant de 1963. Celle-ci a été couplée à l'image multibande HRV de SPOT-1 du 22 décembre 1987. Après classification dirigée et superposition de l'image satellitaire à la carte de 1963, plusieurs constatations ont été faites. La cité a connu une croissance spatiale qui a multiplié sa taille initiale par 2,3; de même la densité de l'habitat décroît globalement du noyau central vers les périphéries. Enfin la construction du port a entraîné une mutation de la côte. Celle-ci présente deux sections opposées : l'est du port qui est rongé par une érosion côtière dont le front a régressé de 400 m avec une vitesse maximale de 16 m par an pour un total de 112,5 ha de terre perdus. Par contre l'ouest connaît un engraissement non moins significatif. La prise en compte de l'état de la marée au passage du satellite réduit la marge d'erreur. Les premiers résultats des travaux topographiques en cours, menés par une équipe de suivi du trait de côte, vus avec le recul du temps confirment ceux obtenus ici.

1. Introduction

Connue sous le nom de golfe du Bénin, cette partie de la côte ouest africaine, en raison de ses activités économiques, a été à l'origine de nombreuses villes. La plupart de ces villes sont aujourd'hui des capitales économiques ou politiques de leur État et elles ont subi des développements démographiques et des extensions spatiales très rapides (fig. 1). En effet, des installations portuaires ont favorisé l'essor de ces villes et créé une nouvelle dynamique au niveau du transit littoral et dès lors un remodelage de la ligne de côte.

Cotonou, la grande ville portuaire du Bénin, n'échappe pas à cette réalité. Cette cité, d'une population de 536 827 habitants d'après le recensement de 1992, en comptait 109 000 en 1963. Malgré le nombre important de travaux réalisés sur cette ville, très peu d'études ont sérieusement porté sur sa structure spatiale. À partir de l'image satellitaire HRV (XS) de SPOT-1 de 1987, une cartographie relativement détaillée de l'occupation a été mise au point et les statistiques correspondantes ont été analysées. L'évolution de la ville et les mutations de la côte ont été étudiées à partir du croisement des résultats du traitement de cette image et de la carte topographique de 1963.

2. Matériel et méthode

L'essentiel du matériel et les grandes lignes de la méthodologie sont exposés dans un schéma méthodologique qui suit. Les études ont été menées de manière diachronique.

2.1. Les données de base

Nous avons disposé de l'image HRV (XS) du 22 décembre 1987 (fig. 30-2, voir cahier couleur). De celle-ci a été tirée l'imagette de Cotonou, laquelle comporte 492 lignes et 950 colonnes. Une carte topographique au 1: 50 000 datant de 1963 et un plan de la ville de Cotonou au 1: 20 000 ont été utilisés.

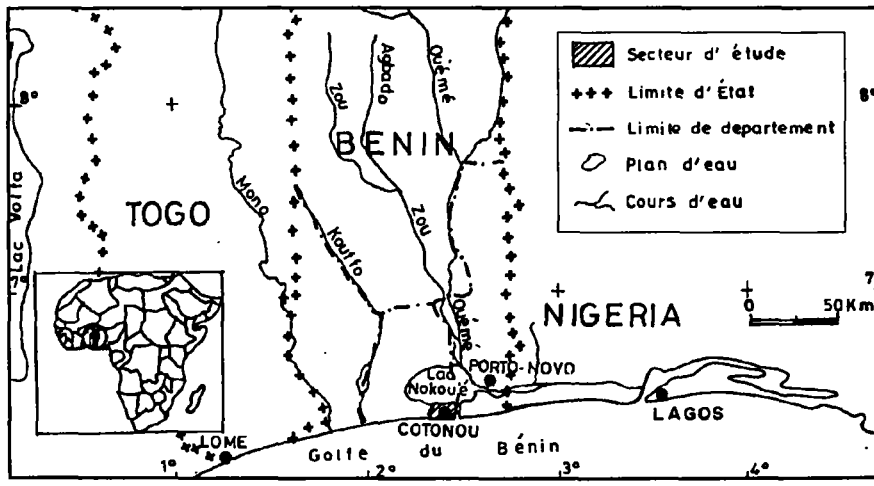


Figure 1. Carte de localisation de Cotonou

2.2. La démarche méthodologique

La démarche méthodologique a consisté, au traitement de l'image, à la numérisation des cartes et à l'analyse des résultats (fig. 3).

2.2.1. Traitement de l'image

Après étalement linéaire de la dynamique de l'image et calcul des composantes principales, nous avons procédé à la correction géométrique. Différents points de contrôle identifiables sans ambiguïté sur la carte ont servi à cette dernière opération. Cotonou étant dans un site de plaine, nous nous sommes limités à la fonction polynômiale de premier degré qui dans le cas d'espèce donne un bon résultat.

La délimitation administrative s'est faite par la représentation des limites administratives sur l'image, et le masquage des zones situées à l'extérieur des contours du périmètre. C'est sur cette dernière image que la classification dirigée a été faite avec un algorithme de maximum de vraisemblance.

Une interprétation visuelle de la composition colorée a permis la définition de la typologie. Les zones d'entraînement prenant en compte toutes les classes ont été tracées sur cette composition colorée. Lors des séances de terrain, chaque zone d'entraînement a été décrite du point de vue thématique.

L'hétérogénéité de l'occupation du sol de Cotonou, la présence du lac Nokoué, de la lagune et de l'océan Atlantique nous ont obligés à utiliser un plan masque. La précision totale de cette classification est de 88 %. Neuf classes ont été distinguées, dont six consacrées à l'habitat. Le taux d'occupation du sol des bâtiments au niveau de ces dernières classes se présente comme suit :

habitat de très forte densité	> 75 %
habitat dense	60 à 75 %
habitat de densité moyenne	40 à 60 %
habitat sur terrain hydromorphe	25 à 40 %
habitat lâche	15 à 25 %
habitat dispersé	< 15 %

2.2.2. Numérisation des cartes

Les contours du littoral, les limites administratives ainsi que l'espace occupé par l'habitat ont été numérisés à partir de la carte de référence au 1: 50 000. Cette opération a facilité les calculs de superficies, les changements d'échelle ainsi que les comparaisons entre la situation initiale, celle de 1963, avec l'état de la ville en 1987.

2.2.3. Analyse des résultats

L'analyse des résultats a été faite de manière diachronique. Les résultats obtenus par traitement de cette image satellitaire ont été comparés aux informations contenues sur la carte de 1963, sous forme numérique. Cette comparaison a été faite par des procédés de superposition automatique et de calcul de superficies.

Pour calculer la superficie, nous avons utilisé l'environnement statistique de *Multiscope*. Le programme attribue à chaque couleur utilisée pour la classification, une valeur radiométrique propre et unique. Aussi, à chaque valeur radiométrique, l'histogramme de la classification donne le nombre de pixels.

En multipliant ce nombre par la valeur 400 m^2 (surface d'un pixel), on trouve la superficie occupée par classe. La valeur radiométrique 255 correspond au domaine situé

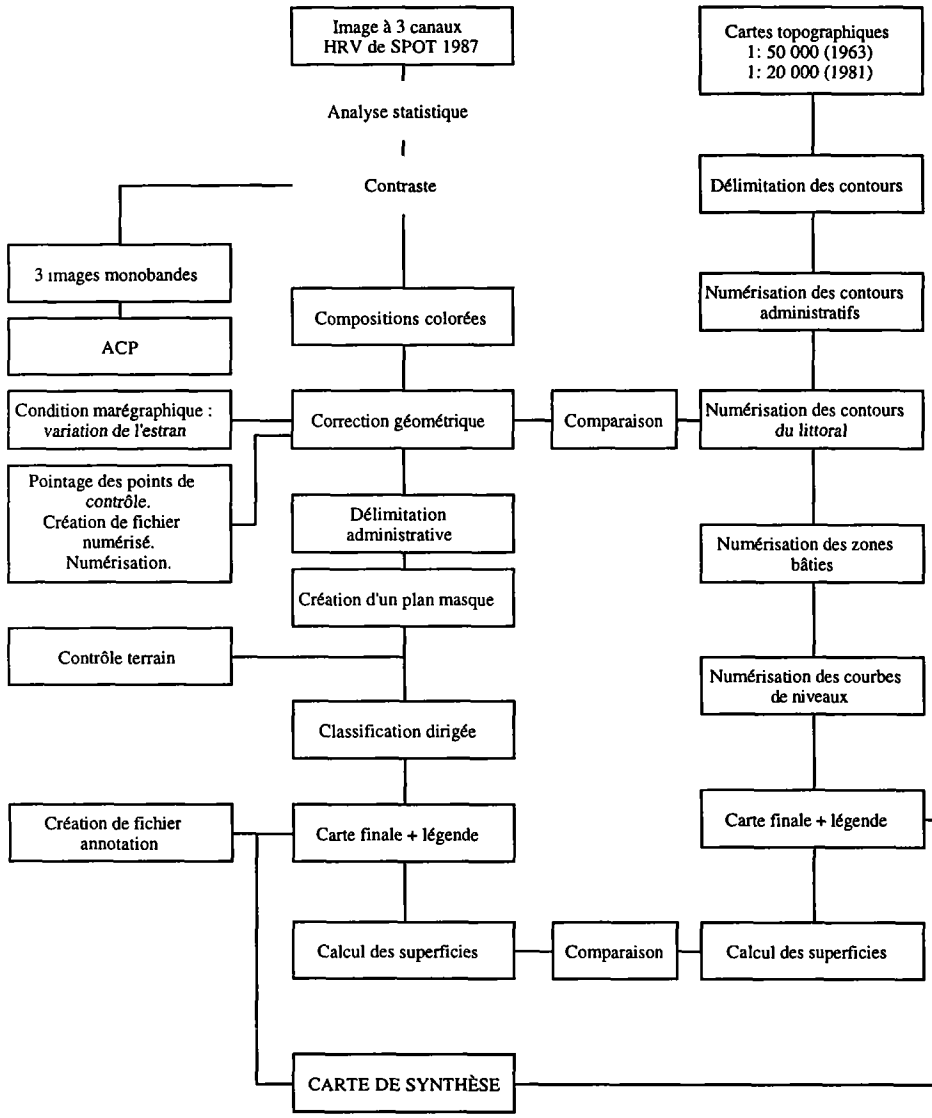


Figure 3. Démarche méthodologique

à l'extérieur du masque, elle n'est donc pas prise en compte. Les superficies occupées par chacune des classes sont contenues dans le tableau 1.

Tableau 1. Superficies relatives à l'occupation du sol à Cotonou

Classe	Superficie (ha)
Habitat de très forte densité	55,08
Habitat dense	498,40
Habitat de densité moyenne	929,70
Habitat sur terrain hydromorphe	248,10
Habitat lâche	754,40
Habitat dispersé	1414,00
Couverture végétale	1338,38
Sol nu ou presque	517,20
Bas-fond	442,66

3. Résultats

Il ressort de cette étude que, de 1963 à 1987, Cotonou a connu bien des changements dans son espace territorial et dans sa dynamique.

3.1. Extension de l'habitat

En général, Cotonou répond aux structures des grandes villes avec un noyau central très dense et une diminution de la concentration des bâtiments au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre-ville. Le développement de la ville est cependant plus accentué du côté ouest que du côté est (fig. 30-4, voir cahier couleur).

La superficie occupée par la zone bâtie, en 1987, selon la classification, est de 3 992,76 ha, alors qu'en 1963, la ville et les villages environnants faisaient 1 762 ha (fig. 5; tab. 1). Aujourd'hui les bas-fonds n'occupent qu'une faible portion de la superficie de la ville (CODJIA, 1995). Cette extension s'est faite dans de nombreux cas sans tenir compte de l'inadéquation des sites à l'habitat. Aussi ces bas-fonds, réceptacles naturels des eaux de pluie, ont-ils été comblés et occupés par des bâtiments.

3.2. Mutations de la côte

Le résultat de la superposition de la carte de 1963 à l'image satellitaire de 1987 montre deux sections littorales opposées : l'est et l'ouest du port (fig. 5). Un recul très perceptible de la côte se dégage à l'est du port. Cette avancée de la mer, varie de 0 à 400 m avec une vitesse maximale de 16 m par an; 112,5 ha de terre ont été engloutis sur cette portion de la côte. Par contre, un engraissement de la côte se manifeste à l'ouest. Du fait de nombreux travaux

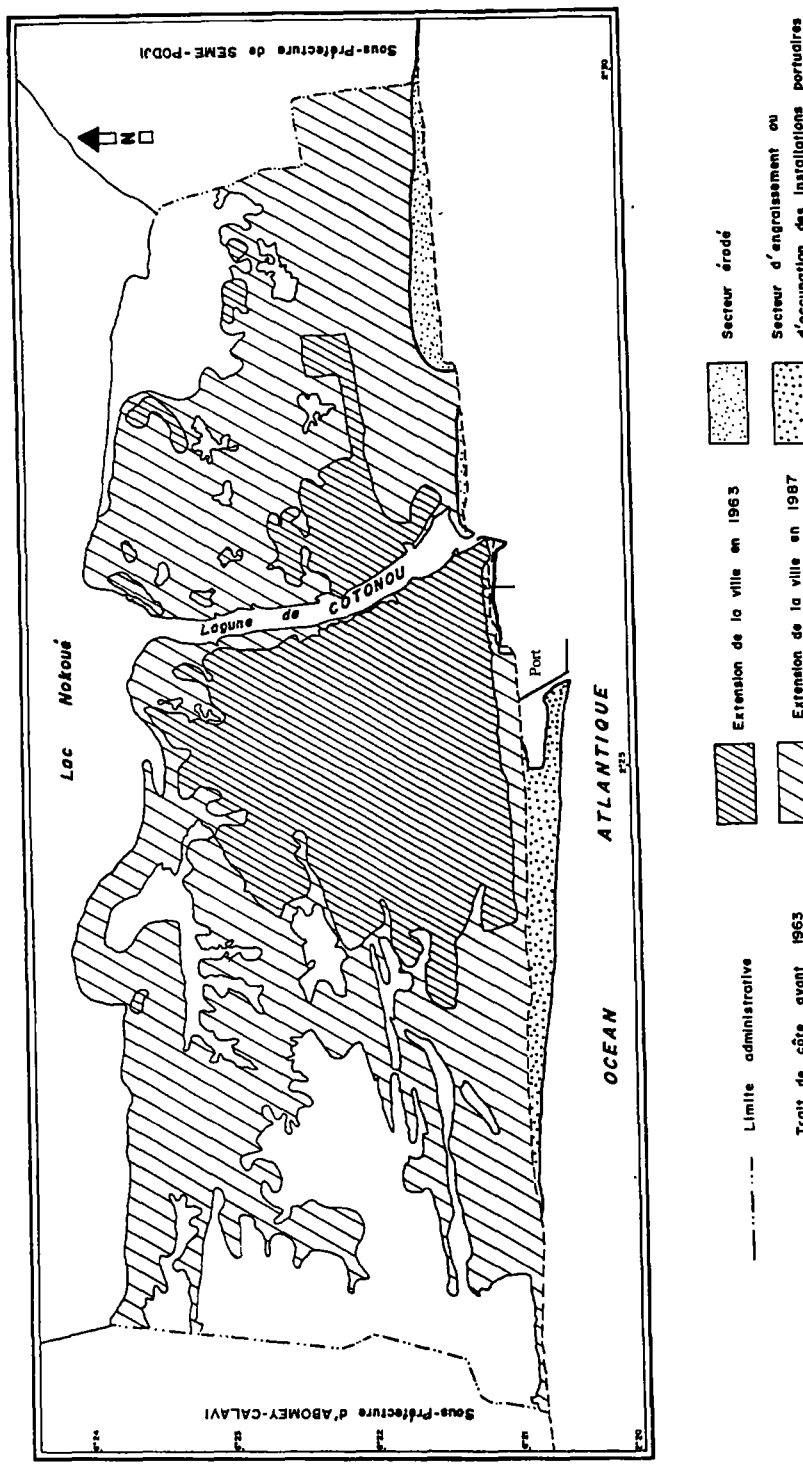


Figure 5. Carte de synthèse de l'évolution de la région de Cotonou de 1963 à 1987

d'aménagement et d'extension du port effectués sur cette partie de la côte et des ponctions de sable que l'on y fait, il est difficile d'évaluer le gain de territoire dû à cet engraissement. Plusieurs facteurs expliquent les changements rapides qui affectent ce littoral. Sa composition sableuse, la permanence de la houle et sa direction par rapport au littoral, sont à l'origine de la précarité de son équilibre. Avant la construction des ouvrages portuaires, il existait un déplacement libre des sédiments. Les digues et les jetées ont bloqué le transport du sable créant ainsi une accumulation à l'ouest. À l'est, sous l'effet de la houle, les départs de sédiments s'opèrent sans que la compensation qui devrait provenir de l'ouest, n'ait lieu. On assiste alors à l'érosion du littoral.

Le tableau 2 fait une comparaison entre les résultats de la présente étude et les conclusions auxquelles sont parvenues diverses équipes de suivi du trait de côte (GNONLONFIN, 1994; NEDECO et PAC, 1983).

Tableau 2. Comparaison entre les résultats obtenus par télédétection et ceux des relevés topographiques

Techniques d'étude	Avancée maximale de la mer (m)	Vitesse maximale d'avancement (m / an)	Superficie érodée (ha)	Trait de côte
Étude par télédétection (1987)	400	16	112,5	Semblables avec la projection dans le temps
Travaux topographiques (1994)	500	>15	non déclarée	

4. Discussion

Certaines difficultés liées à l'établissement de la cartographie urbaine sont dues à l'hétérogénéité qui résulte de l'occupation de l'espace urbain. Cette hétérogénéité est d'autant plus contraignante que la ville contient des enclaves rurales. À Cotonou, les aires de production maraîchère (pour ne citer que ce cas) se mêlent à l'habitat. À cette hétérogénéité de l'occupation de l'espace s'ajoute la complexité du site de la ville où, lac, lagune, terrain hydromorphe et mer se côtoient. L'objectif premier de cette étude étant de saisir la dynamique spatiale de l'habitat, nous avons procédé à un masquage des étendues d'eau, dont l'un des avantages est la réduction du nombre de classes. Le zinc, matériau de couverture des toits à Cotonou, est d'une réflectance qui varie selon l'âge du toit. Ainsi, la brillance est très forte (proche de celle d'un miroir) lorsque les feuilles métalliques sont neuves. On pourrait craindre qu'une diversité de réponses spectrales, *a priori* liée à l'âge du matériau, affecte autrement la classification et dès lors entache la précision des travaux. Heureusement cette variation liée à l'âge n'est sensiblement perçue que les deux premières années de l'installation des bâtiments. On peut noter que les constructions se réalisent par îlots de maisons, ce qui permet une homogénéité spectrale pour ces types d'habitation.

À propos du trait de côte, il est évident que les variations des marées entraînent des changements temporaires de la ligne de rivage. En tenant compte de l'heure exacte de la prise de l'image satellitaire qui est 10 h 21 min 55 s (temps universel), on retrouve le niveau de la marée correspondante (0,01 m). En faisant intervenir la pente moyenne de la côte, on détermine ainsi la longueur de l'estran qui est de 5 m. Cette marge a été prise en compte dans l'interprétation des résultats. Il n'a cependant pas été possible d'obtenir des données relatives à l'état de la marée au moment de la prise des photographies aériennes ayant servi à la confection de la carte de 1963 parce que les services s'occupant de l'étude des marées ont été créés en 1980.

5. Conclusion

Sans être une étude de plus, le présent travail sur les problèmes d'aménagement urbain et d'érosion côtière à Cotonou, reste la vision de ces mêmes phénomènes au travers de la télédétection satellitaire. Les travaux ont permis d'obtenir une structure complète et une cinématique de la ville. Malgré la simplicité des travaux et leur durée relativement courte, des résultats concrets, identiques à ceux des travaux de topographie, ont été obtenus. Le coût relativement bas et la durée des travaux dans ce domaine augurent d'un usage plus poussé de la télédétection satellitaire. Aussi, son intégration est-elle envisagée pour le suivi de l'ensemble du littoral de la république du Bénin.

6. Remerciements

Ce projet a été entièrement réalisé au Centre régional de formation aux techniques des levés aérospatiaux (RECTAS), à l'Unité des applications de la télédétection. Je remercie mon maître Georges Kozminski et Monsieur Amamoo Octchere les responsables de cette unité, pour leur contribution.

7. Références

CODJIA, C. 1995. Mutations urbaines et littorales à Cotonou : étude à partir de la télédétection. Thèse de DESS, Centre régional de formation aux techniques des levés aérospatiaux, Ile Ife, Nigeria, 30 p.

GNONLONFIN, L. 1994. Port et environnement côtier à Cotonou. Port info. n° 2, p. 18-22

NEDECO (ingénieurs conseils néerlandais) et PORT AUTONOME DE COTONOU (PAC). 1983. Étude du littoral – Tome I : synthèse de l'étude. Laboratoire d'hydrologique de Delft, 20 p.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 307-314

31

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)

FRANCISCO GUERRA [1,2], WUILIAN TORRES [2], JESÙS ARNALDO PÉREZ [3] et ANA MARIA MARTINEZ [2]

[1] *Institut de la carte internationale de la végétation (ICIV), 13, avenue du Colonel Roche, BP 4403-31045, Toulouse cedex, France; téléphone : +33 (5) 61-55-85-46; télécopieur : +33 (5) 61-55-84-44*

[2] *Centro de procesamiento digital de imágenes (CPDI), Instituto de Ingeniería, carretera nacional, apartado 40200, Caracas 1040-A, Venezuela; téléphone : +58 (2) 942-00-25; télécopieur : +58 962-10-25*

[3] *Station internationale de recherche contre la faim (SIRCOFAM), 39, allées Jules Guesde, 31000 Toulouse, France; télécopieur : +33 (5) 61-55-32-02*

Résumé

Des données satellitaires multidates sont utilisées pour le suivi cartographique des dynamiques spatiales urbaines dans le bassin du lac de Valencia au Venezuela. La méthode consiste à effectuer une classification préalable des images qui sont ensuite comparées pixel à pixel à l'aide de critères d'acceptation des changements. On constate une forte expansion des zones urbaines préexistantes au détriment des surfaces occupées par des formations végétales arbustives. Cependant, la validité des résultats est limitée par la qualité des classifications qui, dans cette étude, a été d'environ 75 %. L'objectif général de ce travail était la mise au point d'une méthode efficace pour l'évaluation de l'utilisation

du sol dans le bassin du lac entre 1975 et 1988 à l'aide d'images satellitaires. L'utilisation de ces images fortement appuyées par un travail d'enquête sur le terrain et des techniques de traitement numérique des données, s'avère efficace et rentable. Une assez bonne cartographie à l'échelle du 1: 100 000 a été obtenue pour le suivi des dynamiques spatiales dans une zone soumise à d'importantes pressions des activités urbano-industrielles au Venezuela. Les résultats de ce travail constitue un inventaire préliminaire pouvant servir à la prise de décisions dans le cadre de l'aménagement du territoire.

1. Introduction

Le bassin du lac de Valencia est une dépression tectonique située au nord du Venezuela (fig. 1). Sa superficie est d'environ 3 000 km^2, dont 375 km^2 correspondent à la surface du lac. Cette zone est nettement influencée par deux métropoles industrielles importantes au niveau national. La croissance accélérée des activités urbano-industrielles depuis les années soixante provoque des changements significatifs en ce qui concerne l'utilisation du sol dans ce bassin qui possède 38 % des meilleures terres du pays. Entre 1961 et 1981, sa population a été multipliée par trois (AMAYA, 1972; OCEI, 1985) si bien que l'État cherche à contrôler l'impact de ce phénomène sur l'espace par des mesures administratives. Cette zone a fait l'objet d'inventaires cartographiques consacrés à l'étude des systèmes agricoles (EDER and AVILAN, 1975) et de la végétation (MINISTERIO DEL AMBIENTE, 1983) réalisés à partir de photographies aériennes. Plus récemment, en 1988, les résultats d'une interprétation visuelle d'une image TM de Landsat ont été utilisés pour la mise en place d'une base de données environnementales (MINISTERIO DEL AMBIENTE *et al.*, 1991). Dans ces travaux, le thème « urbain » n'est abordé que partiellement et il n'y a pas d'analyse multidate. L'objectif de ce travail est la mise au point d'une méthode efficace pour le suivi cartographique des dynamiques spatiales urbaines du bassin du lac de Valencia à partir des données satellitaires MSS et TM de Landsat entre 1975 et 1988 (fig. 31-2, voir cahier couleur). L'application d'une méthode consistant à classer préalablement les images, permet de s'affranchir des perturbations introduites par la réponse des capteurs et les conditions atmosphériques (SINGH, 1989).

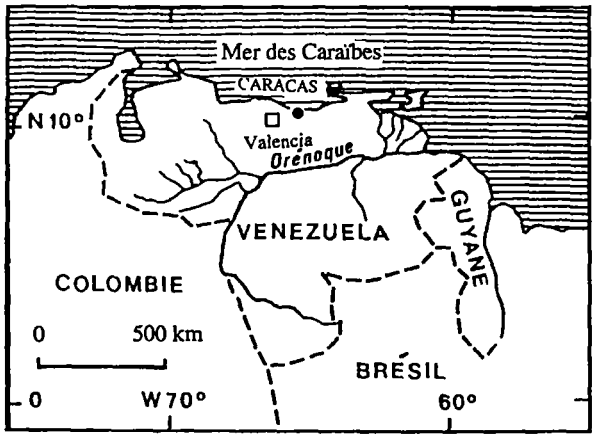


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

2. Matériel et méthode

2.1. Données

Les données ayant servi à la réalisation de ce travail (tab. 1) ont été traitées et mises en forme avec les logiciels *Erdas* (version 7.4), *Arc-Info* (version 5.01) et les programmes *Val-classif* et *Multi-temp* développés par le Centre de traitement d'images de Caracas (CPDI).

Tableau 1. Données aériennes, satellitaires et cartographiques utilisées

Type de données	Capteur/WRS	Date	Échelle
Image Landsat 2	MSS / 004-043	19-02-1975	
Image Landsat 5	TM / 004-053	26-03-1988	
Photographies aériennes	Panchromatique N/B	1975	1: 75 000
Photographies aériennes	Panchromatique N/B	1987	1: 25 000
Cartes topographiques			1: 100 000 1: 25 000
Carte de la végétation		1983	1: 100 000
Carte de l'utilisation du sol		1991	1: 100 000
Carte géomorphologique		1991	1: 100 000

2.2. Analyse des données

2.2.1. Mise en forme

La forte corrélation linéaire existante entre les canaux vert, rouge et infrarouge des capteurs MSS et TM de Landsat (ROYER et *al.*, 1987) a permis leur sélection car ils assurent une cohérence spectrale nécessaire à l'analyse multidate des données satellitaires. Par la suite, des corrections géométriques du premier degré ont été réalisées et les nouvelles valeurs radiométriques ont été obtenues après l'application d'une convolution bicubique sur les images MSS et TM de Landsat. Les erreurs moyennes quadratiques de 1,4 et de 1,2 pixels pour les images MSS et TM de Landsat respectivement n'ont pas pu être améliorées compte tenu de la qualité médiocre des documents cartographiques disponibles.

2.2.2. Classifications

La réalisation des classifications sur les images permet l'obtention des supports cartographiques sur lesquels les dynamiques spatiales entre les deux dates sont analysées. Les classes thématiques ont été définies dans le but d'évaluer les types d'utilisation du sol affectés par la croissance urbaine. Aussi, les parcelles d'entraînement ont été choisies à partir des documents cartographiques fortement appuyées par un travail sur le terrain et à l'aide d'une base de données géographiques. Ces parcelles d'entraînement servent à obtenir les signatures spectrales des classes dans chaque bande du capteur. La séparabilité spectrale des classes a été évaluée par la méthode *Transformed divergence* (SWAIN and DAVIS, 1978) qui tient compte de la distance statistique entre deux classes pour

l'ensemble des canaux utilisés dans la classification. Ainsi, 11 classes thématiques représentatives des milieux étudiés ont été retenues (tab. 2). Après le rejet des parcelles d'entraînement n'atteignant pas 80 % de pixels affectés, les matrices de confusion entre les classes dans chaque image présentent des pourcentages d'affectation acceptables, en particulier, pour le thème urbain où les valeurs supérieures à 95 % permettent d'envisager une bonne identification de cette classe. L'algorithme de classification utilisé est celui du maximum de vraisemblance qui a été appliqué séparément à chaque image (fig. 31-3, voir cahier couleur).

Tableau 2. Classes thématiques représentatives de l'utilisation du milieu

Classe	Observations sur le terrain
Urbain	Zone résidentielle, commerciale, de service et industrielle dans le périmètre urbain et périurbain
Forêt	Écosystème naturel
Fourré	Formation végétale arbustive d'origine anthropique
Pâturage naturel	Surface pastorale extensive
Pâturage cultivé	Surface pastorale semi-extensive
Culture annuelle	Cannes à sucre, maïs, haricots, coton, etc.
Culture permanente	Bananiers, arbres fruitiers
Sol nu	Carrières
Brûlis	Zone soumise aux feux sasonniers
Eau	Lacs et barrages
Nuages	

2.2.3. Validation des classifications

L'intérêt de cette étape est de mesurer la qualité des classifications compte tenu des erreurs de diverses natures qui altèrent les résultats (CAMPBELL, 1987). La méthode utilisée consiste à comparer l'information tirée des photographies aériennes avec les classifications suivant un échantillonnage aléatoire stratifié sur un dixième de la surface du bassin, opération réalisée grâce au programme *Val-classif.* Les matrices de validation montrent une fiabilité globale d'environ 70 % avec une marge d'erreur de ± 4 % pour l'image MSS de 1975 et de 75 % avec une marge d'erreur de ± 4 % pour l'image TM de 1988 en utilisant un niveau de signification de 0,05.

2.2.4. Analyse multidate

Les classifications préalablement obtenues ont été comparées afin de quantifier et de repérer les dynamiques spatiales qui ont eu lieu entre 1975 et 1988. Cette démarche a été possible à l'aide du programme *Multi-temp* suivant trois phases : 1) d'abord la création d'une matrice de changement qui permet de ne conserver que les types d'évolution plausibles selon les critères du thématicien (tab. 3); 2) l'obtention d'une nouvelle image de synthèse dans laquelle chaque pixel a une valeur qui correspond à un type de changement; 3) à partir de cette nouvelle image, il est possible d'avoir une estimation des changements spatiaux (fig. 4).

Tableau 3. Matrice d'acceptation de changements d'utilisation du sol de 1975 à 1988

Année 1988 ⇒ Année 1975 ⇓	Urbain	Forêt et fourré	Pâturage naturel et cultivé	Culture annuelle et permanente	Sol nu et brûlis	Eau	Nuages et non classifié
Urbain	POS	NPOS	NPOS	NPOS	NPOS	NPOS	NPOS
Fôret et fourré	POS	POS	POS	POS	POS	POS (*)	NPOS
Pâturage naturel et cultivé	POS	POS	POS	POS	POS	POS (*)	NPOS
Culture annuelle et permanente	POS	POS	POS	POS	POS	POS (*)	NPOS
Sol nu et brûlis	POS	POS	POS	POS	POS	POS (*)	NPOS
Eau	POS	POS	POS	POS	POS	POS	NPÖS
Nuages et non classifié	SIN	SIN	SIN	SIN	SIN	SIN	SIN

POS: changement possible
NPOS: changement non possible
SIN: changement sans intérêt
(*) : on peut admettre la construction de retenues d'eau entre les deux dates

3. Résultats et discussion

Parmi les changements spatiaux les plus significatifs, nous avons constaté l'augmentation des zones urbaines au détriment des surfaces occupées par les formations arbustives (fourrés) sur l'ensemble du bassin (fig. 5). Ces espaces pourraient être assimilés à la notion de « friches sociales ». En effet, ils auraient été multipliés par trois entre 1975 et 1988, soit un taux d'accroissement annuel d'environ 15 % qui correspondrait bien à l'évolution de la population constatée pour la période 1961-1981 (AMAYA, 1972; OCEI, 1985). Cette dynamique urbaine se fait à partir des centres urbains préexistants et l'expansion est limitée par la présence du lac et des forts reliefs au nord et au sud du bassin. Les nouvelles zones urbaines s'installent sur la plaine lacustre au fond des vallées suivant l'infrastructure routière, notamment l'autoroute orientée E-O. Il faut cependant nuancer ces résultats car même si les matrices de confusion entre les classes laissaient espérer une bonne affectation des pixels urbains, l'évaluation des classifications indique que des pourcentages non négligeables (10 % et 20 %) de pixels, appartenant à la classe « culture annuelle », se trouvent dans la classe « urbain ». Ceci peut être expliqué par le fait, qu'à la date de prise de vue, les champs de cultures annuelles sont en labour si bien que leurs signatures spectrales sont très proches.

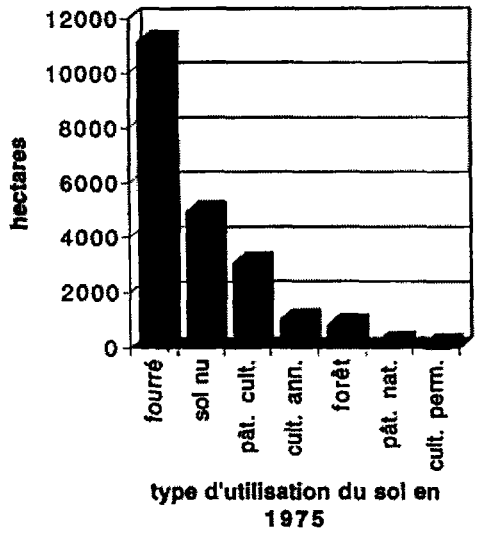


Figure 4. Évolution de la superficie d'utilisation du sol entre 1975 et 1988 dans le bassin du lac de Valencia

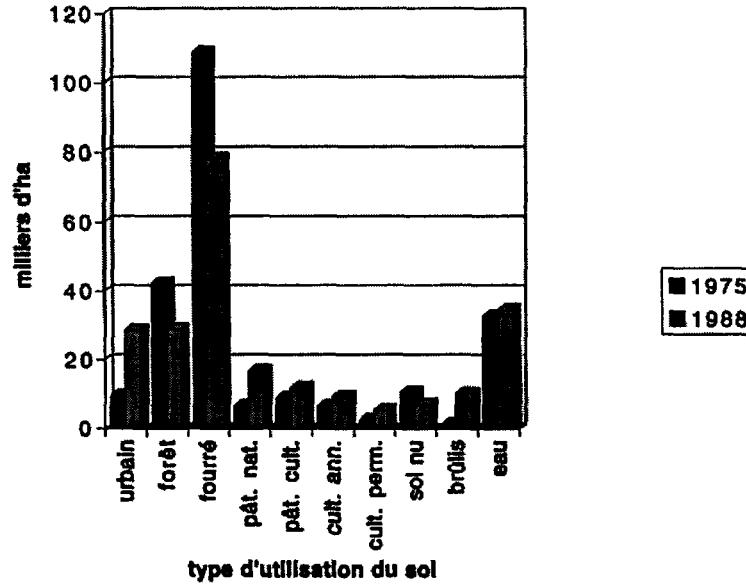


Figure 5. Contribution des types d'utilisation du sol en terme de superficie, à l'expansion urbaine de 1975 à 1988 dans le bassin du lac de Valencia

4. Conclusion

La méthode utilisée s'adapte bien au suivi des dynamiques spatiales dans des régions soumises à d'importantes pressions des activités urbaines. L'analyse des changements spatiaux faite à partir des images classées permet de s'affranchir des problèmes liés au calage radiométrique. Cependant, une attention particulière doit être accordée à la qualité des classifications car les erreurs ont un effet multiplicatif sur l'image des changements (STOW *et al.*, 1980). Les classifications faites uniquement sur la base de critères spectraux présentent des limites car les confusions entre les classes thématiques demeurent importantes. Néanmoins, les résultats obtenus en ce qui concerne le thème urbain semblent satisfaisants. Dans ce sens, l'intégration de critères morphologiques à l'aide d'un système expert lors de l'analyse multidate peut améliorer la cartographie et l'interprétation des dynamiques spatiales. L'application de cette méthode peut déboucher sur un essai de modélisation de la croissance urbaine en intégrant des données socio-économiques.

5. Remerciements

Nous tenons à remercier le Conseil national de la recherche scientifique et technologique du Venezuela (CONICIT) pour son appui financier assuré à la réalisation de cette étude. Plus près de nous, nous remercions Mlle Nawel Anahí Perez de nous avoir aidé à préparer les figures.

6. Références

AMAYA, C. 1972. Características del proceso de urbanización en la cuenca del lago de Valencia (1932-1972). Revista geográfica del Instituto de geografía y conservación de recursos naturales de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de los Andes, n° 12(26-27), Mérida, p. 18-26.

CAMPBELL, J. 1987. Introduction to remote sensing. Guilford Press inc, New York, 551 p.

EDER, H. and AVILAN, J. 1975. A preliminary study of the agriculture systems of the lake Valencia bassin. Instituto de geografía y desarrollo rural, Universidad central de Venezuela, Caracas, 162 p.

MINISTERIO DEL AMBIENTE 1983. Uso actual y cobertura vegetal de las tierras en la región centro-norte-costera. Informes técnicos, zona 2, Caracas, 167 p.

MINISTERIO DEL AMBIENTE, INSTITUTO DE INGENIERIA et FUNDACION POLAR 1991. Sistemas de información ambiental de la cuenca del lago de Valencia, Caracas 179 p.

OFICINA CENTRA DE ESTADISTICA E INFORMATICA (OCEI) 1985. Nomenclador de centros poblados. Región capital, Caracas, 486 p.

ROYER, A., CHARBONNEAU, L., BROCHU, R., MURPHY, J. M. and TEILLET, P.M. 1987. Radiometric comparaison of the Landsat-5 TM and MSS sensors. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, n° 4, p. 579-591.

SINGH, A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, n° 6, p. 989-1003.

STOW, D., TINNEY, L.R. and ESTES, J.E. 1980. Deriving land use land cover change statistic from Landsat. A study of prime agricultural land. Proceeding of the 14 th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 1980, Environmental Research Institute of Michigan, p. 1227-1237.

SWAIN, P.H. and DAVIS, S.M. 1978. Remote sensing: the quantitative approach. McGraw-Hill, New York, 396 p.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 315-323

32

Apport de la télédétection à la cartographie de l'espace urbain au 1: 20 000 en terme d'emprise au sol du bâti : cas de la ville d'Oran (Algérie)

YOUCEF MESSAR et NADIA MESSAR

Laboratoire de télédétection, Centre national des techniques spatiales (CNTS), B.P. 13, 31200 Arzew, Algérie;
téléphone : +213 (6) 37-22-17; télécopieur : +213 (6) 37-84-54

Résumé

Il est des utilisateurs pour qui l'image satellitaire semble ne pas convenir aux études urbaines; en effet, que peut-elle apporter que les couvertures photographiques ne montrent déjà plus finement ? Notre étude se propose d'examiner l'apport d'une classification par analyse discriminante des données HRV de SPOT prises sur la ville d'Oran en mai 1994, à l'aide des techniques intégrant l'information à la fois spectrale et spatiale apportée par les échantillons-terrain. Le but est d'aboutir à une stratification du site urbain en terme d'emprise au sol du bâti. Une classification par pixel a été appliquée sur l'image et ceci, après une sélection statistique des variables les mieux corrélées aux descripteurs du bâti. Le cœfficient d'emprise au sol du bâti n'a un sens que si l'unité élémentaire est l'îlot. De ce fait, le passage de la classification par pixel à la classification par îlot est une étape incontournable. L'opération a été réalisée après numérisation des contours des îlots à partir de la carte à l'échelle du 1: 7 500. La précision de la classification est vérifiée après sélection de 83 échantillons représentant les typologies les plus diverses, sur le plan régional de la ville d'Oran à l'échelle du 1: 5 000. Les résultats de la classification par îlot montrent le comportement des classes, dont la stabilité se situe entre 40 % et 83,33 % et un pourcentage global bien classé de 66,32 %.

1. Introduction

L'élaboration et la mise en œuvre de politiques urbaines requièrent une connaissance précise des différents usages du sol urbain. La nécessité d'une mise à jour régulière de ces inventaires conduit à envisager de recourir à des images satellitaires à haute résolution, en l'occurrence HRV (XS) de SPOT. Dans le cadre d'une caractérisation de la ville d'Oran en terme de densité du bâti, nous avons mené l'étude suivante en utilisant les données HRV de SPOT de mai 1994, selon deux volets principaux : 1) collecte d'informations « morphologiques » à partir d'un sondage aréolaire; 2) proposition, après utilisation et traitement des données, d'une image classée en niveaux de densités du bâti. De même, nous avons proposé de nouvelles approches permettant le passage de l'analyse par pixel à l'analyse par zone.

2. Enquête sur le terrain

La ville d'Oran couvre une superficie de 6 237 ha et se caractérise par des zones homogènes au point de vue de l'organisation spatiale (fig. 1). En effet, la ville a subi de nombreuses transformations depuis la colonisation espagnole jusqu'à nos jours. À partir de son ancien centre Sid El Houari, la ville a rayonné jusqu'à atteindre les villages d'Es-Senia, au sud, et de Bir El Djir, à l'est. Chaque étape de développement a laissé ses empreintes en donnant aux tissus urbains des formes de texture et des îlots de tailles différentes. À cet effet, chaque tissu urbain est représenté par une zone homogène du point de vue de l'organisation spatiale, du rapport surface bâti / espace non bâti, de la nature de matériaux et de l'âge des constructions.

L'enquête sur la « morphologie urbaine » (EBERHARD, 1987; MICHEL, 1988) est un outil indispensable pour appréhender les structures de ces tissus urbains, du fait des renseignements qu'elle apporte : mesure de la largeur de la voirie, surface relative du bâti, existence ou non de végétation, etc. Cette enquête menée en 1990 permet, d'une part, d'étudier la relation bâti / emprise au sol et, d'autre part, de caler l'interprétation de l'image satellitaire. Le taux de sondage a été fixé à 5 % de la surface totale de la ville pour une bonne représentativité de l'échantillon urbain.

2.1. Mise en œuvre du tirage TER-UTI

À partir d'un sondage aréolaire de type TER-UTI (FOURNIER *et al.*, 1985; ANONYME, 1992) exploitant les données cartographiques et photographiques, des segments de 9 ha regroupant les morphologies et les typologies les plus diverses sont sélectionnés sur photographies aériennes. Les données utilisées sont celles de la carte topographique au 1: 25 000 (1960), d'une carte au 1: 7 500 (INC, 1988) et de la couverture aérienne de la ville au 1: 10 000. Les différentes unités morphologiques sont repérées et numérotées sur chaque segment de la photographie aérienne pour permettre l'identification et la description des entités sur le terrain.

Les multiples enquêtes sur le terrain ont permis la caractérisation de l'occupation du sol des segments en deux grandes classes : bâti et non bâti. Dans la première, nous avons recensé toutes les constructions d'un ou de plusieurs niveaux ainsi que leurs descriptifs, soit état du bâti, nombre de niveaux et nature des toits. Dans la deuxième catégorie, toutes les surfaces non construites sont répertoriées, soit végétation, voirie et terrains nus.

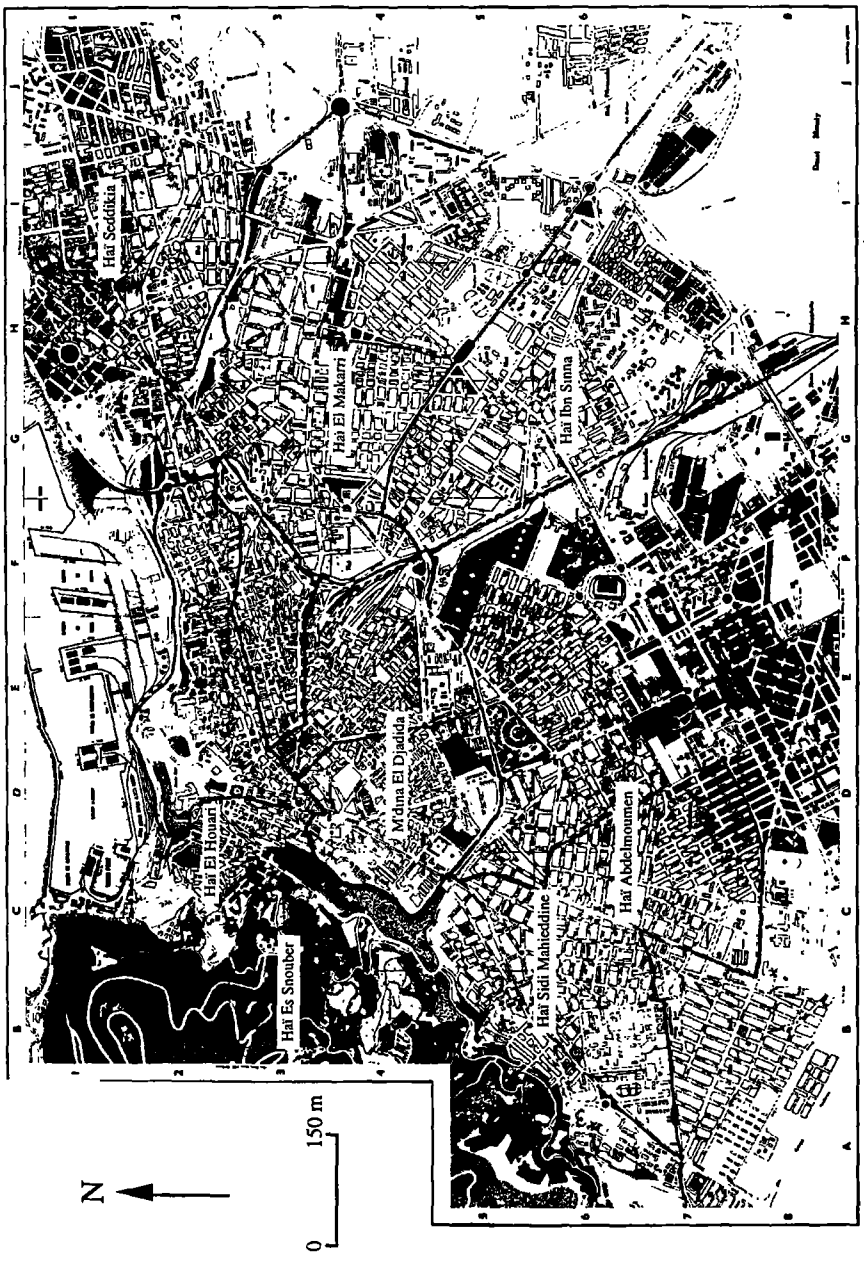


Figure 1. Plan de la ville d'Oran au 1: 7 500

2.2. Classement des îlots échantillons en densité croissante

Malgré certaines difficultés, liées notamment à la résolution des documents utilisés (photographies au 1: 10 000), le relevé individuel des îlots a pu être réalisé ainsi que le calcul des cœfficients d'emprise au sol du bâti.

Tout au long de cette étude, le mot « densité » a pour unique signification le rapport entre la surface construite d'un îlot (Sc) et sa surface totale (Si). L'îlot est délimité par la voirie. Le terme adéquat est le cœfficient d'emprise au sol, car la densité au sens de nombre de niveaux de chaque bâtiment n'est pas prise en compte, bien que ce renseignement figure dans nos fichiers d'informations-terrain.

Pour le calcul des densités, nous avons d'abord délimité les îlots constituant chaque segment de 9 ha sur les photographies aériennes. Lorsque ce dernier n'englobe pas l'îlot entier, nous faisons l'extension à l'ensemble de l'îlot pour respecter le taux de sondage à 5 %. Un planimètre digital a été utilisé pour le calcul des surfaces bâties et non bâties. Cette tâche s'est avérée difficile à cause de quelques problèmes rencontrés :

- à l'échelle du 1: 10 000, le relevé individuel de chaque îlot a été impossible dans certains cas; il s'agit plus particulièrement du quartier Haï Es Snouber, caractérisé par un réseau routier très étroit, enchevêtré, irrégulier, permettant à peine le passage d'un motocycliste (fig. 1);
- le centre-ville présente le même handicap, malgré une texture mieux structurée, régulière et orthogonale;
- le quartier commercial M'dina El D'jadida présente des caractéristiques similaires avec des ruelles étroites, n'atteignant pas parfois 4 m de largeur, ses îlots contigus témoins d'une structure destinée à jouer un rôle économique;
- l'ombre projetée de certaines parties de constructions complique le discernement entre la partie construite et la surface non bâtie.

Par conséquent, nous avons procédé à l'agrandissement au 1: 2 500 des photographies aériennes et, cette fois-ci, les difficultés se sont estompées avec cependant la persistance du problème d'ombre qui a pu être résolu par une connaissance approfondie des sites-échantillons. Nous avons ainsi identifié 5 classes d'emprise au sol du bâti, chacune faisant référence à un type particulier de tissu urbain (tab. 1).

Tableau 1. Les modalités de densité du bâti retenues après le calcul du cœfficient d'emprise au sol du bâti sur les segments échantillons

Classe de l'échantillon	Cœfficient d'emprise au sol	Taille des îlots	Élévation moyenne	Tissu	Organisation du réseau
Très forte	0,840-0,950	< 10 x 10 m	R+1	Spontané	Étroit sinueux< 5 m
Forte	0,700-0,820	20 x 20 m	R+4	Résidentiel collectif	5 à 10 m géométrie rectiligne
Moyenne	0,399-0,625	15 x 15 m	R+1	Résidentiel individuel	5 à 15 m orthogonal
Faible	0,117-0,231	30 x 30 m	R+8	Résidentiel collectif	10 à 20 m orthogonal

3. Les étapes de l'exploitation de l'image HRV de SPOT

Les éléments linéaires (routes et réseau ferroviaire), les éléments de surface (zones bâties, surfaces interstitielles en végétation et terrains nus) ainsi que les objets ponctuels qui constituent le milieu urbain contribuent à sa complexité et à son hétérogénéité. De ce fait, l'exploitation de l'information spectrale seule est insuffisante et nécessite l'association d'informations de type spatial qui renseignent sur la forme d'association de pixels, les structures et les organisations du bâti (HIRSCH et WEBER, 1988).

3.1. Choix de l'information

Étudier les possibilités d'aboutir à une image classée à partir des échantillons de l'enquête suppose : 1) une analyse comparée des informations recueillies par photo-interprétation (les clichés de 1981, la carte au 1: 25 000 de 1960 et la carte au 1: 7 500 de 1988) et des données accessibles à partir de l'image de référence, soit une scène HRV (XS et P) de SPOT de mai 1994 ayant pour référence K043-J278; 2) un repérage des changements intervenus entre la date de l'enquête (1990), celle des données numériques utilisées (1994) et celle des photographies aériennes (1981), sachant que de grands changements se sont opérés dans la ville.

Pour la première opération, étant donné la résolution des images utilisées (10 x 10 m et 20 x 20 m) et l'existence de tissus urbains à maille étroite (Haï Es Snouber au nord-ouest du centre-ville), le repérage des îlots est délicat et nécessite une attention accrue lors du déroulement de cette opération.

Pour bénéficier du pouvoir de discrimination spatial du canal panchromatique et de la qualité radiométrique des bandes multispectrales, nous avons procédé à la superposition des canaux XS sur le panchromatique au moyen d'une correction géométrique suivie d'un rééchantillonnage à 10 m. L'algorithme calculant à l'aide du plus proche voisin a été utilisé pour ne pas altérer la qualité radiométrique des bandes multispectrales.

4. Classification par pixel de l'image

Pour aboutir à une image classée en autant de catégories que de types de tissus urbains recensés dans l'enquête, nous avons procédé à une classification par analyse discriminante à but décisionnel. Chaque classe est représentée par un échantillon homogène choisi sur l'image. L'homogénéité est définie par rapport à des caractéristiques de couleur, de structure et de forme.

4.1. Statistiques descriptives sur les variables radiométriques

Afin de quantifier le pouvoir de discrimination des différents canaux élaborés (indices de brillance et végétation, axes des ACP), nous avons calculé dans chaque segment, des statistiques de chaque emprise au sol dans chacun des canaux et néo-canaux. Par ailleurs, la complexité du milieu étudié rend nécessaire l'ajout d'informations relatives aux éléments structuraux et texturaux de l'image (MŒLLER-JENSEN, 1990; COULOMBE *et al.*, 1991). Dans notre cas, nous avons considéré l'écart-type calculé sur un voisinage

5 x 5. L'analyse des courbes obtenues nous a permis de choisir les variables les plus liées au descripteur « densité du bâti » (fig. 2).

4.2. Interprétation de l'image classée

De manière générale, les résultats obtenus à partir de la classification par pixel (fig. 32-3, voir cahier couleur) montrent une diminution de la densité du bâti, partant du noyau urbain (forte densité) à la périphérie sud et est de la ville (densité faible) :

- la classe très fortement bâtie (couleur blanche) se retrouve également dans les zones hautement réfléchissantes (ex. : les chantiers à l'est de l'image);
- la classe de forte densité (couleur rouge) semble la plus compacte et couvre de façon continue le noyau urbain et partiellement le quartier Ibn Sinna; ce dernier est effectivement occupé par quelques HLM de la période coloniale; de même, quelques espaces industriels (sud de la ville) contribuent à cette classe, caractérisée par une forte absorption d'énergie due principalement à l'âge des constructions;
- la distribution géographique de la classe de moyenne densité (teinte bleue) recoupe les quartiers de bâti pavillonnaire lâche; cette classe comprend un taux de végétation plus élevé; elle s'étend notamment sur Haï Abdelmoumen, Haï El Makarri, Haï Sidi Mahieddine et Haï Seddikia; la qualité de l'environnement et l'aération sont nettement supérieures dans ce cas;
- la catégorie faiblement bâtie (couleur verte) s'intègre dans la large couronne aérée de l'expansion urbaine; les facteurs discriminants restent l'urbanisation dense et un couvert végétal important; elle couvre entièrement la périphérie de la ville;
- la classe non bâtie est de loin la plus homogène (couleur jaune).

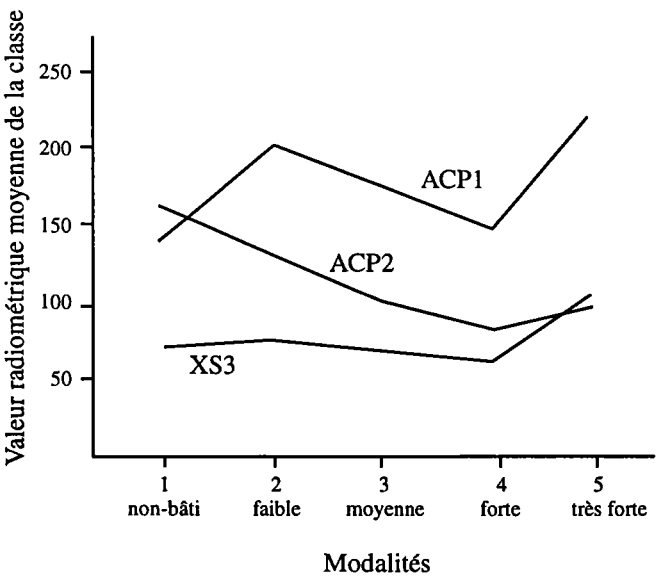


Figure 2. Variations des axes de l'analyse en composantes principales (ACP) et du canal original infrarouge proche (XS3); les axes de l'ACP sont calculés sur les canaux originaux (XS) réechantillonnés à 10 m et ce, après l'opération de superposition de ces derniers sur le canal panchromatique

5. Classification par îlot

Le cœfficient d'emprise au sol du bâti n'a de sens que si l'unité élémentaire est l'îlot. Un processus d'aménagement des pixels dans chaque îlot a été conçu afin d'aboutir à une statistique représentative. Cette méthode consiste à combiner l'image classée par pixel avec le fichier « îlots » obtenu par la numérisation des îlots. Les données des contours des îlots sont extraites de la carte au 1: 7 500 (INC, 1988). Les îlots de petites tailles ayant les mêmes caractéristiques ont été fusionnés dans certains endroits.

L'interpolation par la méthode du plus proche voisin altère les structures linéaires. En effet, lors de la superposition du fichier « îlots » sur l'image, des distorsions ont été constatées, notamment dans les îlots à mailles étroites caractérisés par des réseaux enchevêtrés.

5.1. Processus de regroupement

Chaque pixel de l'image déjà classée (par pixel), représente le taux de recouvrement de la surface bâtie, soit de la classe « faible densité » avec un taux compris entre 0,117 et 0,231 à la classe « très forte densité » dont le taux varie entre 0,840 et 0,950. L'approche utilisée pour la classification par îlot (PEDLEY, 1987; WEBER *et al.*, 1990; PEDLEY and CURRAN, 1991) consiste à parcourir, dans chaque îlot, tous les pixels et à calculer le taux de recouvrement moyen en utilisant la formule suivante :

$$Tj = \frac{\sum_{i=1}^{5} N_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^{5} N_i}$$

où N_i = nombre de pixels appartenant à la classe i dans l'îlot j considéré;
C_i = cœfficient moyen d'emprise au sol de la classe *i* (c1 = 0,172 pour la classe faible densité, c2 = 0,512 pour la classe moyenne densité, etc.);
j = numéro de l'îlot.

La classe qui correspond au taux Tj est ensuite attribuée à tous les pixels de l'îlot. Le même processus est répété pour tous les îlots.

5.2. Validation de la classification

La précision de la classification par îlot en terme d'emprise au sol (fig. 32-4, voir cahier couleur), est vérifiée sur le plan régional de la ville d'Oran à l'échelle du 1: 5 000 (ANC, 1976). La procédure de validation consiste à :

- choisir des échantillons d'îlots d'une manière aléatoire sur la totalité de la zone d'étude;
- calculer les cœfficients d'emprise au sol correspondants, suite aux mesures de surface (totale et construite) effectuées au niveau de l'îlot;
- identifier la classe d'appartenance de l'îlot à partir de son cœfficient, en se référant aux classes déjà mentionnées;
- vérifier cette appartenance sur l'image classée par îlot.

Dans notre cas, nous avons sélectionné 83 échantillons couvrant une surface de 112,7 ha dont 37,8 ha construite; les échantillons présentent une surface environ de 1,8 % de la surface totale. Les mesures de superficie sont faites avec le planimètre digital *x-PLAN 360IR*, dont la précision maximale est de 0,1 %. Le tableau 2 représente un échantillon de ces mesures et la comparaison des résultats génère le tableau 3.

5.2.1. Interprétation

Les résultats trouvés reflètent le comportement des classes dont la stabilité se situe entre 40 % et 83,33 % et un pourcentage global bien classé de 66,32 %.

La classe de très forte densité est relativement la moins bien classée car le degré de confusion de celle-ci avec la classe forte est important. Ce phénomène s'explique facilement du fait de l'existence d'îlots très réfléchissants au sein de la classe de forte densité. Un mouvement d'échantillons entre les classes de faible et moyenne densité a été constaté. Ce phénomène est dû principalement à l'existence d'un recouvrement d'autres thèmes avec ces deux classes. Enfin, 64,29 % des îlots classés « non bâtis » appartiennent bien à cette classe. Cette dernière montre également un mouvement d'échantillons vers toutes les classes, même s'il est relativement faible. Ce phénomène s'explique aisément du fait que cette classe renferme toutes les variétés d'occupation du sol : sols nus réfléchissants identiques radiométriquement aux échantillons de la classe de très forte densité, espaces en végétation identiques aux petits espaces verts des villas.

Tableau 2. Échantillon de résultats de validation de la classification par îlot sur le plan au 1: 5 000

N° îlot	Surface totale (m^2)	Surface construite	Cœfficient d'emprise au sol	Classe de densité (carte)	Classe de densité (image HRV)
20	5550,38	2914,48	0,525	Moyenne	Moyenne
24	1594,90	1405,84	0,881	Très forte	Forte
26	495,39	0	0	Non bâti	Non bâti
28	3513,25	2124,53	0,605	Moyenne	Moyenne
31	4465,03	4178,01	0,936	Très forte	Moyenne
32	5065,08	4104,97	0,810	Forte	Forte

Tableau 3. Pourcentage d'affectation des classes calculées sur l'image par rapport à celles calculées sur le plan du cadastre au 1: 5 000

Classe	Très forte	Forte	Moyenne	Faible	Non bâti
Très forte	40,00	56,00	4,00	0	0
Forte	0	83,33	16,67	0	0
Moyenne	0	0	81,25	0	0
Faible	0	6,35	12,50	62,40	18,75
Non bâti	3,57	14,29	7,14	10,75	64,29

6. Conclusion

Une nomenclature de l'occupation du sol urbain a été proposée à partir d'un sondage intégrant les données cartographiques et photographiques. Cette étude a mis en évidence les possibilités limitées de l'image HRV de SPOT, notamment en ce qui concerne la résolution spatiale. De ce fait, la complémentarité des images avec les photographies aériennes et d'autres documents n'est plus à démontrer.

Le taux de 66,32 % des îlots bien classés ne répond pas parfaitement à la demande formulée par les agences d'urbanisme pour le suivi des espaces urbains. Face à la complexité des images urbaines (fréquence de détails), les méthodes de traitement se basant principalement sur l'information spectrale s'avèrent insuffisantes. Par conséquent, il est nécessaire de s'attacher plus à l'organisation des pixels et aux relations entre objets. Nous croyons qu'une étude plus approfondie de l'analyse de texture pourrait améliorer la caractérisation de la zone urbaine.

7. Références

ANONYME, 1992. Les enquêtes aréolaires liées à la télédétection. Ministère de l'Agriculture et du Développement rural, Direction des affaires financières et économiques, Service central des enquêtes et études statistiques, Bureau méthodes et applications scientifiques, France, 37 p.

AGENCE NATIONALE DU CADASTRE (ANC). 1976. Plan régional de la ville d'Oran au 1: 5 000, Oran, Algérie.

COULOMBE, A., CHARBONNEAU, L. et BROCHU, R. 1991. L'apport de l'analyse texturale dans la définition de l'utilisation du sol en milieu urbain. Canadian Jounal of Remote Sensing, vol. 17, n° 1, p. 46-55.

EBERHARD, J. M. 1987. Télédétection urbaine : éléments de caractérisation géographique des quartiers de Quito à l'aide d'une image SPOT. DEA en géographie et pratique du développement, École des hautes études en sciences sociales (EHESS), Paris, 98 p.

FOURNIER, P., GILG, J.P. et MEYER-ROUX J. 1985. Intégration de la télédétection dans les méthodes classiques de connaissance de l'occupation du sol. Ministère de l'Agriculture, Service central des enquêtes et études statistiques, Courrier des statistiques, n° 36, France.

HIRSH, J. et WEBER, C. 1988. Combinaison des données multisources : la télédétection et le système urbain. Actes du 113e Congrès des sociétés savantes, Strasbourg, p. 139-144.

INSTITUT NATIONAL DE CARTOGRAPHIE (INC). 1988. Carte de la ville d'Oran, 1: 7 500. Boulevard Tripolie, Alger, Algérie.

MICHEL, A. 1988. Stratification de l'espace urbain à partir d'images satellites pour réaliser un sondage à objectif démographique. Thèse de doctorat, Centre d'analyse et de mathématiques sociales (CAMS), Paris, 2 volumes, 237 p. et 162 p.

MŒLLER-JENSEN, L. 1990. Knowledge-based classification of an urban area using texture and context information in Landsat-TM imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56 n° 6, p. 899-904.

PEDLEY, M.I. 1987. Digital image classification of SPOT HRV data using a field based approch advances in digital image processing. Remote Sensing Society, Nottingham, p. 168-173.

PEDLEY, M.I. and CURRAN, P.J. 1991. Per-field classification : an exemple using SPOT HRV imagery. International Journal of Remote Sensing, vol 12, n° 11, p. 2181-2192.

WEBER, C., HIRSCH, J. et SERRADJ, A. 1990. Classification pixels et classification par zones : tests sur image SPOT en milieu urbain. 2es Journées de télédétection de Bondy, 4-6 décembre 1990, p. 57-62.

PARTIE V

Actions de recherche partagée

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 327-336

33

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

AMADOU THIERNO GAYE et SIMÉON FONGANG

Laboratoire de physique de l'atmosphère et d'océanographie côtière (LPA),
École nationale supérieure universitaire de technologie (ENSUT),
Université Cheikh Anta Diop, B.P. 5085, Dakar-Fann, Sénégal;
téléphone : +221 25-93-64; télécopieur : +221 25-93-64; CÉ : gaye@lpa.ensut.sn

Résumé

Ce travail a pour but de déterminer des indices de précipitations d'hiver sur le Sénégal. On a utilisé des images Météosat ISCCP B2 (*International Satellite Cloud Climatology Project*) dans le canal infrarouge (IR). Les champs pluviométriques ont été réalisés à partir des données de pluies journalières sur 20 stations synoptiques et climatologiques du Sénégal pour les mois de novembre, décembre, janvier, février et mars entre 1989 et 1991. Les champs pluviométriques sont représentés sous forme d'images avec le logiciel *Triskel* à partir de cartes d'isohyètes. Les isolignes sont obtenues par « krigeage ». On effectue un seuillage à seuil variable des images afin d'extraire de la structure générale chaque type de nuage particulier. Ces images seuillées sont ensuite corrélées aux champs pluviométriques. On met ainsi en évidence les structures du jet subtropical (JST) intense pour des températures inférieures à 263 K. C'est à ce seuil que les premières traces de pluies ont pu être observées. Mais les nuages les plus pluviogènes sont détectés autour de 233 K. On note ainsi un lien entre l'occurrence de pluies et la présence de nuages froids sur la bande du jet. Plus celle-ci est large, plus le champ pluviométrique est étendu. La pluie est d'autant plus intense que la bande est épaisse. Une statistique élémentaire sur les images montre qu'un écart constant de 17,5 °C entre la moyenne et le minimum de température radiative représente un indice de précipitation produit par les nuages froids accompagnant le JST.

1. Introduction

Le long épisode de sécheresse qui sévit en Afrique sahélienne a engendré ces derniers temps un intérêt particulier pour les phénomènes météorologiques intéressant cette sous-région. Dans cette partie du continent les précipitations interviennent en majorité pendant la période de juin à octobre. Elles correspondent à une importante pénétration du flux de vapeur d'eau humide, la mousson, sur le continent (LAMB, 1985). Par contre en hiver, quand la ZCIT (Zone de Convergence Intertropicale), zone de maximum de convection, est la plus au sud, des pluies de faible intensité sont générées par la rencontre de masses d'air atlantique chaud et humide transporté en altitude par le jet subtropical (JST) et de masses d'air froid d'origine polaire. Le contact des deux types de masses d'air entraîne aux altitudes moyennes et supérieures la formation d'importantes masses nuageuses sur le continent pouvant occasionner des perturbations pluvio-orageuses. L'objectif de ce travail est de définir les liens entre les paramètres les plus pertinents dans l'occurrence de ces précipitations d'hiver appelées pluies de « heug » au Sénégal. Pour cela, on détermine des indices de perturbations par une combinaison de données radiométriques et de mesures pluviométriques. Ceci nécessite une étude des corrélations entre l'intensité du JST estimée sur l'image satellitaire Météosat par la largeur de la bande et par le pourcentage de pixels froids et le champ pluviométrique. Nous présentons d'abord la zone d'étude, les données et la méthode utilisée. Ensuite, dans une seconde partie, nous discutons des résultats obtenus.

2. Méthodologie

Les phénomènes sur lesquels porte le travail sont d'échelles spatiales différentes. La zone d'étude devra donc être suffisamment large pour couvrir toutes les dimensions spatiales des phénomènes à étudier tout en conservant une bonne résolution. Nous considérons la zone d'étude comprise entre 10° et 30° de longitude ouest et entre 3° et 20° de latitude nord. Cette zone permet de cerner la partie du JST et de la ZCIT qui nous intéresse.

Pour établir les caractéristiques hydrologiques des nuages représentant le JST et étudier les variations temporelles des champs de luminance, nous utilisons les images du canal infrarouge (10,5-12,5 mm) de format ISCCP B2 (SCHIFFER and ROSSOW, 1983) du satellite Météosat. Les images B2 sont échantillonnées à 3 heures d'intervalle avec une résolution spatiale de 30 km au point subsatellitaire. Elles sont constituées de 416 lignes et de 416 pixels. Nous n'utilisons ici que les images B2 de 12 TU pour éviter les variations importantes d'ensoleillement. Calibrées et normalisées, ces images peu encombrantes permettent une exploitation climatologique (DESBOIS *et al.*, 1988). Les images B2 utilisées couvrent les mois de janvier, février, mars, novembre, décembre de la période 1989-1991. La dynamique est inversée c'est-à-dire que les comptes numériques les plus élevés correspondent aux éléments les plus froids. La loi de calibration est donnée par une relation linéaire entre réflectance satellitaire R et compte numérique C :

$$R = FAG\,\beta\,(C\text{-}Co)$$

Le facteur FAGβ de calibration IR, est fourni dans les rapports de calibration donnés par l'*European Space Operation Centre* (ESOC) de l'Agence spatiale européenne (ESA) et Co est le compte numérique de visée de l'espace.

La réflectance estimée est convertie en température radiative à l'aide de tables de la fonction de Planck et de la réponse spectrale du radiomètre fournie dans le rapport de calibration. D'autre part, à partir de données pluviométriques journalières des stations synoptiques du Sénégal, on a construit les champs pluviométriques. Le mode d'interpolation utilisé dans la réalisation des champs est le « krigeage » par autocorrélation. Il s'agit d'une méthode d'interpolation linéaire qui calcule l'autocorrélation entre points du champ et donne une estimation sans biais en minimisant la variance.

La bande de JST apparaît sur l'image satellitaire (fig. 1) comme un accolement et une combinaison de plusieurs types de nuages situés à des niveaux différents :

- nuages de glace (cirrus, cirro-stratus) qui sont des nuages élevés à sommet froid; on les repère au cœur du jet, c'est-à-dire dans les zones de vent maximum;
- nuages bas (strato-cumulus) qui se repèrent sur les bords du JST; le sommet de ces nuages bas est plus chaud que celui des cirrus et le flux de vapeur d'eau d'origine océanique favorise leur formation;

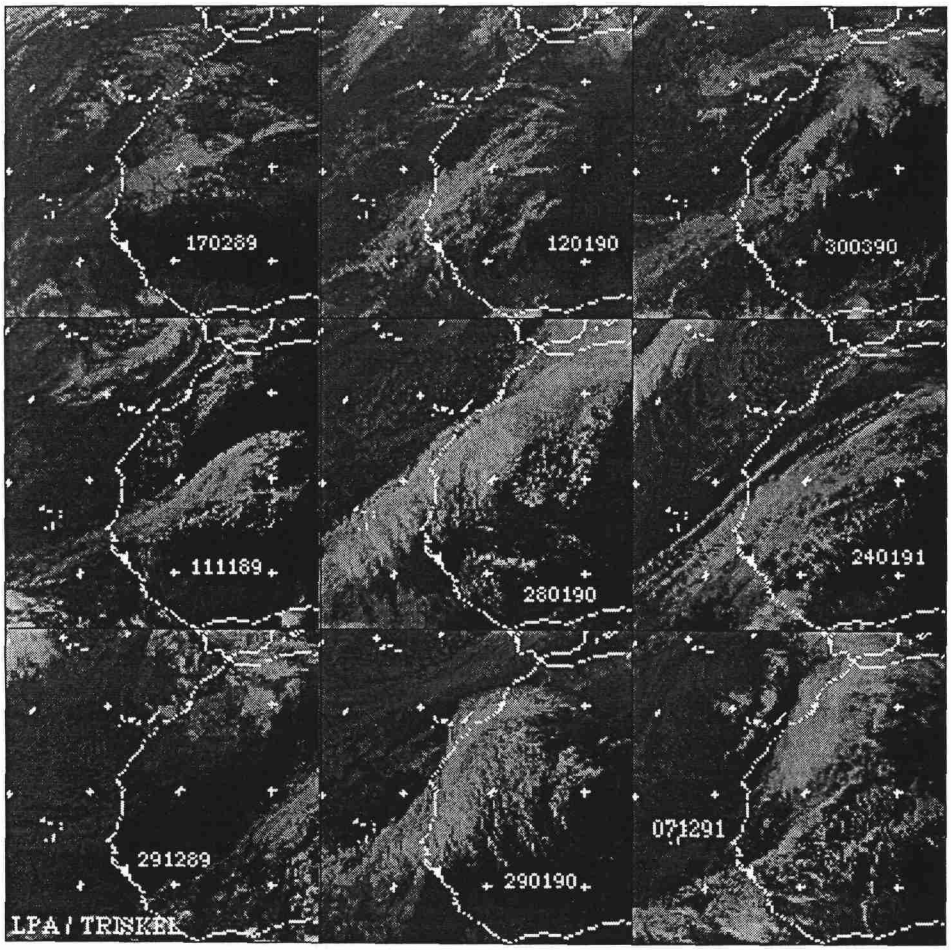


Figure 1. Série d'images IR Météosat ISCCP B2 sur la zone d'étude pendant des situations pluvieuses d'hiver boréal durant la période 1989-1991 (longitude -40° O, 5° E; latitude 0° N, 40° N)

- nuages cumuliformes (cumulus et cumulonimbus);
- nuages moyens (altocumulus et altostratus); l'abondance de la vapeur d'eau disponible favorise la transformation de l'altocumulus, à développement vertical, en cumulonimbus à base élevée siège de manifestations pluvio-orageuses (DE FELICE et VILTARD, 1976).

En Afrique sahélienne, le seuil de 233 K a été considéré par plusieurs chercheurs comme satisfaisant pour séparer les nuages pluviogènes des nuages non pluviogènes (ARKIN, 1979). Pour observer les nuages pluviogènes, nous avons donc choisi le seuil de 233 K souvent utilisé dans les algorithmes d'estimation de la pluie. Ce seuillage consiste à représenter par leur valeur réelle les pixels plus froids que le seuil de température choisi et les autres par zéro. Le seuil de 263 K a été choisi pour mettre en évidence la structure du JST intense. Nous combinons les données radiométriques ainsi traitées avec le champ pluviométrique pendant les jours de pluie. La faiblesse des quantités de pluie ne nous permet pas d'utiliser des algorithmes d'estimation de la pluie. Nous optons alors pour des techniques de détection de la pluie. La méthode utilisée doit permettre de distinguer selon la nature des nuages l'absence de pluie, les traces de pluie ou la pluie dans une zone.

3. Résultats et discussion

Le seuillage à -10 °C a mis en évidence les situations de JST intense. En effet nous considérons que, pour la période considérée, toutes les images seuillées à -10 °C sur lesquelles la bande de jet apparaît nettement correspondent à une activité importante du JST. Ce courant aérien de haute altitude (200 à 100 hPa) se caractérise en hiver, quand il est intense, par une ligne de fortes vitesses de vent (60 à 75 m/s). Il subit des variations saisonnières d'intensité très marquées. En hiver lorsqu'il est proche de l'Équateur, il entraîne dans son mouvement SO–NE des amas nuageux de la ZCIT, ce qui permet son renforcement. La force du jet dépend aussi beaucoup des contrastes thermiques entre masses d'air polaire et tropical. Ces contrastes thermiques sont renforcés par les descentes d'air froid polaire vers les basses latitudes tropicales.

Nous avons ainsi pu répertorier, suivant cette méthode par seuillage, 110 jours de JST fort pour les mois de janvier, février, mars, novembre, décembre des années 1989, 1990, 1991. Ces jours ne correspondent pas toujours à des situations de pluie. Pendant la même période, il y a eu 25 jours de pluie reçue au sol. Ces jours correspondent tous à des situations de JST fort. On voit donc que seuls 23 % des cas de JST fort aboutissent à une pluie estimable. La présence d'un jet fort ne garantit donc pas à elle seule l'obtention d'une pluie mesurable au sol. En effet les pluies de « heug » dépendent d'une combinaison de facteurs dynamiques tels le cisaillement du vent et les anomalies de la température de surface de la mer (TSM) et de facteurs thermodynamiques telle la quantité de vapeur d'eau (GAYE, 1994). Ce résultat signifie seulement que les nuages responsables des précipitations ont des sommets plus froids que -10 °C. Un seuillage à -40 °C permet de localiser les pixels potentiellement pluvieux. La combinaison des images avec le champ pluviométrique moyen journalier montre une bonne corrélation entre le champ pluviométrique (fig. 2) et la présence de nuages froids sur la bande représentant le JST (fig. 3). Les zones de maximum de pluviométrie visibles sur le champ correspondent sur l'image à des régions couvertes par la bande nuageuse. La figure 3 montre que les nuages convectifs générateurs de la pluie ne sont pas des amas isolés mais des structures prises dans la bande du JST. Plus la bande du JST est large, plus le champ pluviométrique est intense. L'intensité de pluie est aussi liée à l'épaisseur de la bande. Cette épaisseur peut être estimée par une évaluation

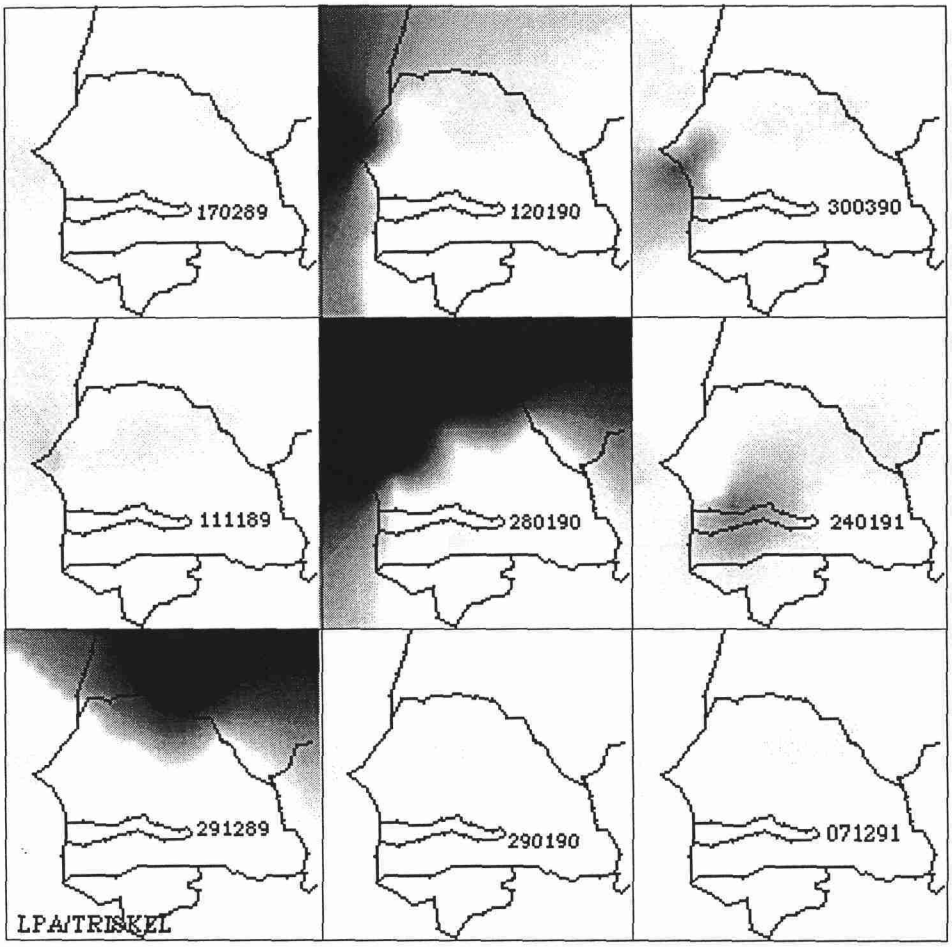


Figure 2. Représentation du champ pluviométrique lors de situations pluvieuses d'hiver boréal sur le Sénégal durant la période 1989-1991

de la densité de nuages froids.

Une statistique élémentaire des pixels d'images de perturbations nous donne les valeurs minimales Tmin, maximales Tmax et moyennes Tmoy de la température radiative. La figure 4 représente ces paramètres en même temps que les variations de la température de brillance sur Dakar. On y remarque une variation quasiment en phase de Tmax et de Tmoy. L'écart absolu ETA entre Tmax et Tmoy est en moyenne constant. Nous l'utilisons alors comme critère pour distinguer les cas de pluie ou de non pluie. Un ETA petit correspond à une situation de non pluie. Cette situation découle aussi des valeurs assez élevées de Tmax et Tmoy. Cette faiblesse du gradient de température radiative est certainement le fait d'une faible convection, donc d'une faible valeur de température de surface et du gradient vertical de température. Les gradients verticaux et horizontaux de la vapeur d'eau atmosphérique

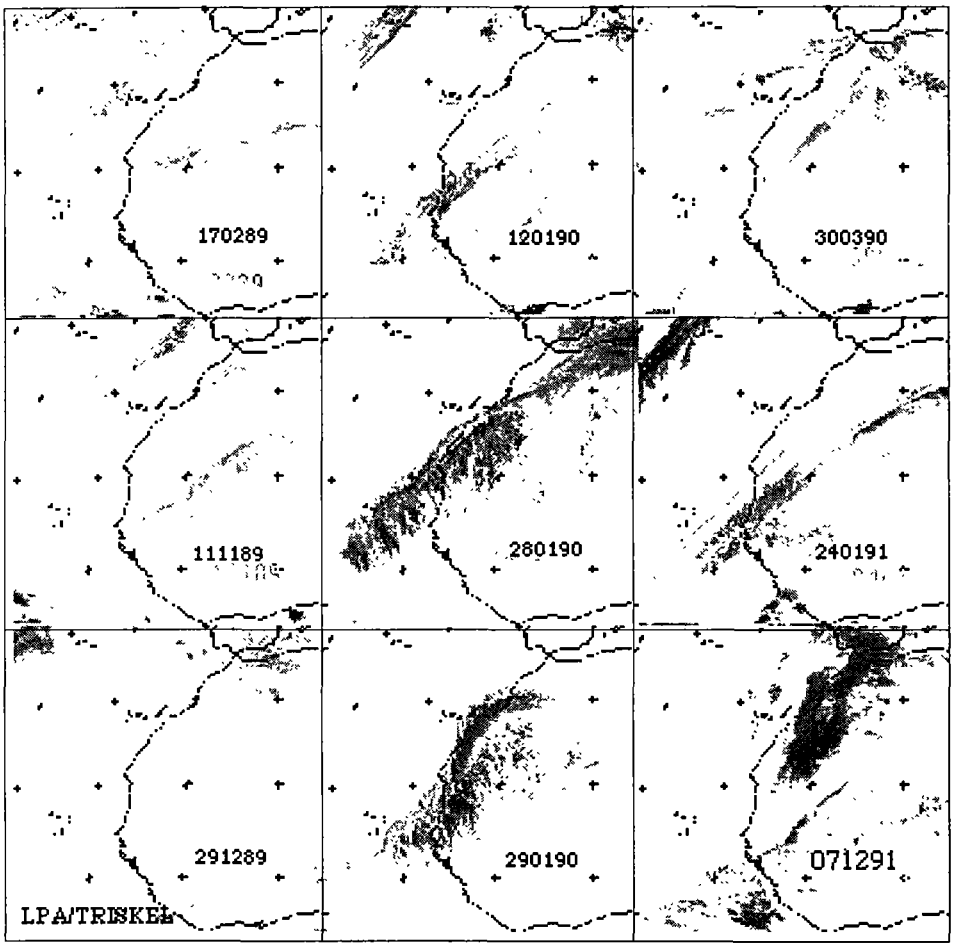


Figure 3. Série d'images IR Météosat ISCCP B2 de la zone d'étude seuillées à -40 °C, pour des perturbations pluvieuses d'hiver boréal de la période 1989-1991

sont ainsi considérablement réduits. Le JST est alors affaibli. La relation étroite entre Tmax et Tmoy pendant les situations pluvieuses est bien représentée par le cœfficient de corrélation (R = 0,80) illustré par la figure 5.

Les jours pluvieux sont caractérisés par un écart constant de 17 °C environ entre Tmoy et Tmax. Cependant, nous ne pouvons distinguer les situations pluvieuses entre elles. Les écarts constatés suffisent à provoquer les quantités de pluie recueillies. Il existe une corrélation entre l'écart de température ETA et les quantités de pluie recueillies, du fait de l'accroissement de la quantité de vapeur d'eau transportée dans le flux du jet. La forte variabilité de la température sur Dakar, notée TDK sur la courbe (fig. 4), prouve l'impossibilité de tirer une information fiable à partir de valeurs ponctuelles de luminance.

Les graphes de la figure 6 symbolisent la distribution des précipitations lors des événements pluvieux en fonction de Tmoy (fig. 6a), de Tmin (fig. 6b) et de Tmax (fig. 6c).

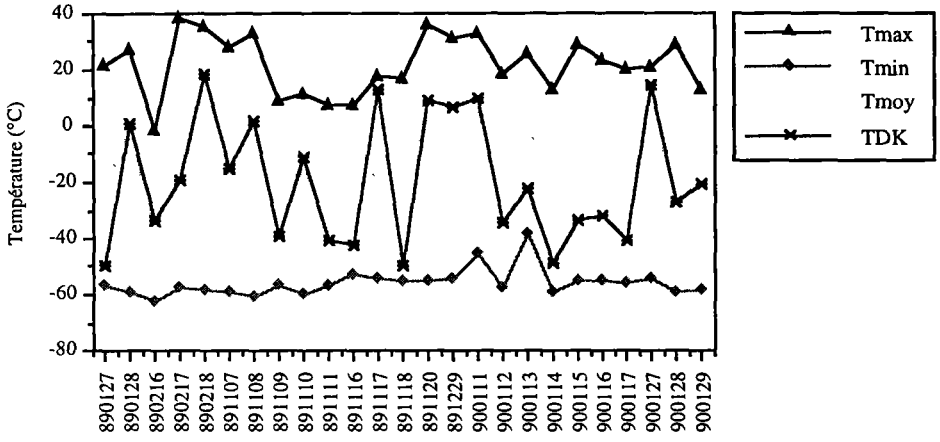


Figure 4. Variations de température radiative pour les situations de pluies d'hiver entre 1989 et 1991

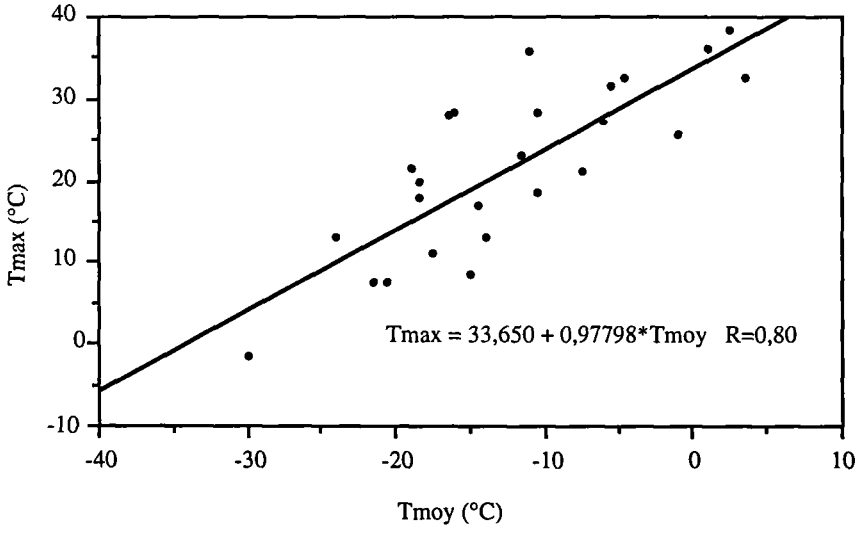
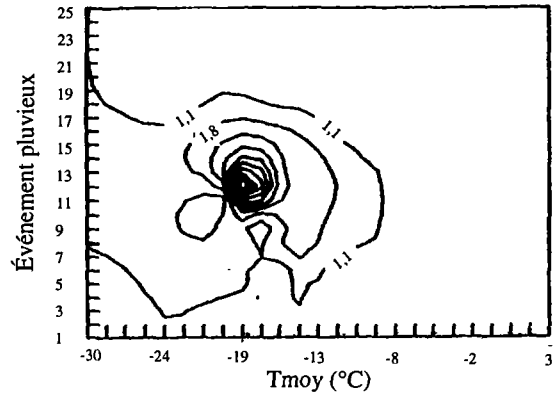
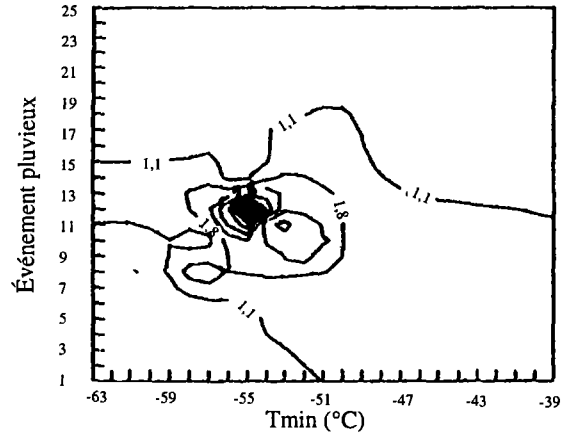


Figure 5. Corrélation entre la température moyenne sur la zone de l'étude et la température maximale

(a)



(b)



(c)

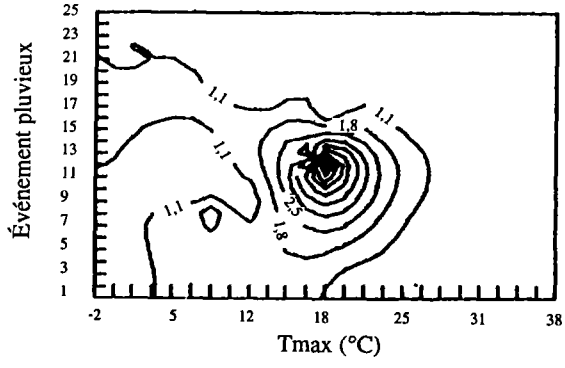


Figure 6. Répartition de la pluviométrie pour 25 événements de perturbations de la période 1989-91 en fonction de la température radiative : a) moyenne; b) minimum; c) maximum; les isolignes sont indiquées en mm par pas de 0,7 mm

Tmoy correspond à de la pluie entre -22,5 °C et -12,5 °C, le maximum étant obtenu pour Tmoy égale à -20 °C. Tmin est un peu plus dispersée. Les premières traces de pluie apparaissent pour Tmin = -40 °C. Jusqu'à Tmin = -60 °C, on note encore de la pluie. Les valeurs de Tmoy et Tmin pour lesquelles une certaine quantité de pluie est recueillie, sont décalées entre elles. Ce décalage, ETm, constitue un indice de précipitation produite par les nuages pluviogènes accompagnant le JST. Un petit ETm traduit en effet une densité importante de pixels froids de nuages convectifs, donc une plus grande probabilité de pluie. La figure 6c fait ressortir clairement une concentration de la pluie autour de valeurs de Tmax comprises entre 12,5 et 25 °C. Tmax est donc une représentation de la température de surface. Le maximum de pluie est recueilli pour des valeurs de Tmax autour de 17 °C.

4. Conclusion

Un seuillage à 263 K a été effectué pour mettre en évidence sur les images IR ISCCP B2 les structures du JST sur la zone d'étude. Le JST est intense pour des températures radiatives inférieures à ce seuil. Cette méthode de détection du JST a permis de montrer que les jours pluvieux sont des indicateurs des événements de JST fort. Mais la présence du jet ne garantit pas toujours l'occurrence de pluie au sol. Une bonne corrélation a été établie entre la présence de nuages plus froids que - 40 °C et le champ pluviométrique. Nous avons également déterminé les intervalles de températures pour lesquels la pluie est obtenue. Les plus fortes pluies sont obtenues pour des températures de surface entre 12,5 °C et 25 °C. Elles proviennent de nuage de convection profonde ou de type cumuliforme. De faibles pluies résultant de nuages stratiformes sont enregistrées pour une température moyenne de -22,5 °C à -12,5 °C. Les écarts absolus entre Tmax et Tmoy de même que Tmin et Tmoy suffisent à envisager l'occurrence ou non de la pluie. Ils peuvent à cet effet servir d'indices de précipitation.

Ce travail devrait être systématisé jusqu'en 1995 pour confirmer les résultats obtenus. L'utilisation de données étalonnées du radar centimétrique de l'aéroport de Dakar permettrait d'améliorer la résolution spatiale des résultats sur le domaine couvert par le radar.

5. Remerciements

Ce travail a été effectué grâce au concours financier de l'AUPELF-UREF et de la Coopération française, que nous remercions ici. Nous remercions également l'Agence spatiale européenne pour les images B2, la Direction de la météorologie nationale du Sénégal et l'Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et Madagascar (ASECNA) pour les données pluviométriques, ainsi que l'ORSTOM pour sa collaboration en particulier avec le logiciel *Triskel* (DAGORNE, 1988).

6. Références

ARKIN, P. 1979. The relationship between fractional cloud coverage of high cloud rainfall accumulation during GATE over the B-scale array. Monthly Weather Review, n° 107, p. 1382-1387.

DAGORNE, D., 1988. Traitement de données satellitaires à l'Antenne ORSTOM de Lannion. Le logiciel TRISKEL. Veille climatique satellitaire, n° 23, p. 17-22.

DE FELICE, P. et VILTARD, A., 1976. Aérojet subtropical d'hiver et nuages associés. La Météorologie, VI e série, n° 6, p. 223-225.

DESBOIS, M., KAYIRANGA, T., GNAMIEN, B., GUESSOUS, S. and PICON, L., 1988. Characterization of some elements of the Sahelian Climate and their interannual variations of july 1983, 1984, 1985 from the analysis of Meteosat ISCCP Data. Journal of Climate, volume 1, n° 9, p. 867-904.

GAYE, A. T., 1994. Dynamique et climatologie des perturbations d'hiver sur l'Afrique de l'Ouest entre 1931 et 1994. Thèse de docteur-ingénieur, École nationale supérieure universitaire de technologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 164 p.

LAMB, P., 1985. Rainfall in subsaharan west Africa during 1941-83. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, n° 21, p. 131-139.

SCHIFFER, R. A. and ROSSOW, W. B., 1983. The international satellite cloud climatology project (ISCCP) : the first project of the World climate research program. Bulletin of American Meteorological Society, n° 64, p. 779-784.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 337-346

34

Étude de l'évolution du milieu naturel du delta du Danube

JULIAN C. BARBALATA [1], ION IONESCU [2] et IOAN NOAJE [2]

[1] *Laboratoire de photogrammétrie, télédétection et SIG, Université de Moncton à Edmundston, 165, boulevard Hébert, Edmundston, Nouveau-Brunswick, Canada E3V 2S8; téléphone : +1 (506) 737-5236; télécopieur :+1 (506) 737-5373; CÉ : jbarbala@cuslm.ca*

[2] *Laboratoire de photogrammétrie et télédétection, Université technique de génie civil, 110, boulevard Lacul Tei, Bucarest, Roumanie; téléphone : +40 (1) 240-7330 (poste 188); télécopieur : +40 (1) 312-8793*

Résumé

Le système hydrographique du delta du Danube ainsi que de la zone côtière adjacente de la mer Noire présentent un intérêt scientifique et économique majeur. Ce système constitue la plus grande superficie de la Terre recouverte de roseau et représente en même temps l'habitat spécifique pour des espèces d'oiseaux sauvages uniques au monde. Dans la période 1960-1989, les aménagements agricoles, sylvicoles, piscicoles et les cannaies ont produit un grand déséquilibre écologique, influençant négativement le développement des réserves naturelles ornithologiques et forestières du delta du Danube. Après l'effondrement du communisme dans les pays de l'Europe centrale et de l'Est, considérant l'importance de préserver ce milieu naturel, le Gouvernement de la Roumanie a déclaré, en 1990 le delta du Danube comme réserve de la biosphère. Dans ce contexte, le but principal de cette étude a été de détecter les changements survenus dans le paysage du delta pendant les vingt dernières années en utilisant des méthodes photogrammétriques et de télédétection. L'accent a été mis sur la géomorphologie générale, sur les formations caractéristiques (levées alluviales, cordons littoraux, anciens cours d'eau) et sur l'évolution de la végétation. L'analyse diachronique d'images satellitaires, d'images photogrammétriques et de documents topographiques montre des changements importants au niveau des terres agricoles et boisées ainsi qu'au niveau des zones inondables.

1. Introduction

Les changements de l'environnement impliquent la mise en œuvre de nouvelles méthodes d'évaluation. Parmi ces méthodes, la télédétection présente un intérêt particulier, grâce à ses caractéristiques essentielles d'enregistrement et d'analyse. La télédétection, qui permet une vision globale des phénomènes, est en même temps le moyen d'étude privilégié pour contribuer à assurer une meilleure gestion de l'environnement. Les satellites d'observation de la Terre ont été fort utiles pour révéler les traumatismes régionaux ou continentaux et les données multidates acquises nous ont informés sur des signes de dégradation de l'environnement dans plusieurs régions du monde. C'est dans ce cadre qu'a été entreprise une étude consacrée à l'évolution du milieu naturel du delta du Danube. L'utilisation des données satellitaires historiques MSS de Landsat, des données satellitaires à haute résolution HRV de SPOT et TM de Landsat, ainsi que des photographies aériennes à petite échelle, nous ont permis d'analyser les changements dans le paysage du delta du Danube au cours des vingt dernières années.

2. Cadre géographique

La superficie du delta proprement dit est de 4 152 km^2, dont la plus grande partie se trouve en territoire roumain (3 446 km^2, soit 82 %). La superficie de l'ancien golfe d'Halmyris, qui abrite aujourd'hui le complexe lagunaire Razim-Sinoe, est de 1 115 km^2, dont 863 km^2 sont occupés par des lacs. Les deux unités géographiques réunies totalisent 5 165 km^2, dont 732 km^2 (12,2 %) s'étendent sur la rive gauche du bras et du delta secondaire de Chilia, dans la Bessarabie du Sud. Les limites géographiques de l'espace deltaïque ainsi définies sont entre 44° 47' 30" (extrémité de la levée de Perisor) et 45° 37' 30" (rive du lac de Sasic en Bessarabie du Sud) de latitude nord, ainsi qu'entre 28° 44' 25" (bifurcation du bras Chilia) et 29° 46' (extrémité est du delta secondaire du bras Chilia, en Bessarabie) de longitude est. (fig. 1)

Selon l'avis de nombreux scientifiques roumains et étrangers (GASTESCU, 1992), l'origine du delta du Danube peut être placée dans le Pléistocène supérieur, quand, environ 13 000 ans A.A., le « cordon littoral initial » a commencé à se constituer dans la région centrale d'un golfe de la mer Noire; ce processus a duré jusque vers 9 500 A.A., quand ce cordon, qui correspond à l'axe central de l'alignement des cordons de Jibriceni, Letea, Caraorman et Crasnicol, avait fini par fermer le golfe pour en faire un liman. Sans rien perdre des traits classiques d'un delta, le delta du Danube pourrait être également décrit comme une étendue plate, soit une plaine alluviale en cours de formation, avec une très légère pente de l'ouest vers l'est (0,006 %), d'où surgissent, hauts de quelques mètres à peine, le champ de Chilia et la levée fluviale de Stipoc et les cordons littoraux de Letea et de Caraorman, couverts de forêts.

Par rapport au « niveau zéro » d'altitude de la mer Noire, 20,5 % du delta se trouve au-dessous et 79,5 % au-dessus de ce repère. Les zones dont la hauteur varie entre 0 et 1 m d'altitude sont prédominantes (54,5 %) par rapport à celles dont la hauteur se situe entre 1 et 2 m (18 %). Les reliefs les plus importants se trouvent sur les cordons littoraux de Letea (12,4 m) et de Caraorman (7 m) et les grandes dépressions appartiennent aux bras du fleuve : 39 m pour le bras de Chilia, 34 m à Tulcea, 26 m pour le bras de Sfîntu Gheorghe et 18 m à Sulina. La profondeur des dépressions lacustres n'excède jamais 3 m, à l'exception toutefois du lac de méandre Belciug, qui a 7 m de profondeur. L'altitude moyenne du delta est de +0,52 m.

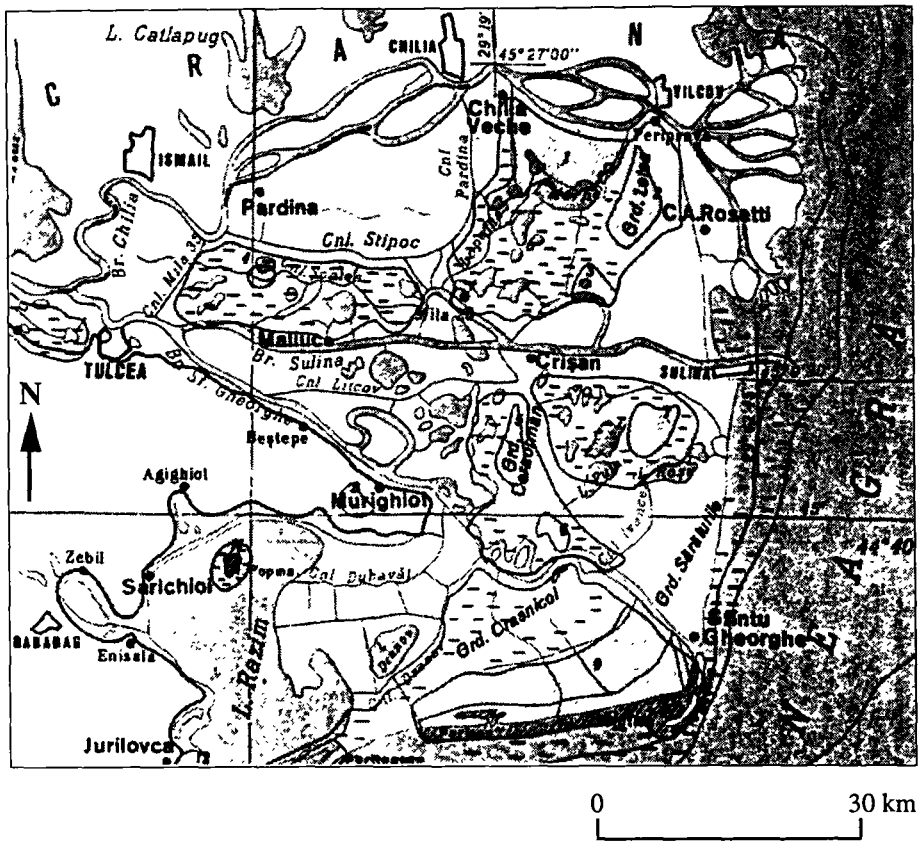


Figure 1. Delta du Danube

3. Matériel et méthodes

3.1. Matériel

Pour réaliser ce projet, des données MSS de Landsat-2 (1975 - 1981), TM de Landsat-5 (1984) et HRV (XS) de SPOT (1986 - 1993) ont été utilisées. Les caractéristiques de ces données sont présentées sur le tableau 1. Les traitements numériques de ces images ont été effectués dans un environnement basé sur un micro-ordinateur Unitek EISA 486-DX-50 avec 32 mégaoctets de RAM et 5,35 gigaoctets de mémoire sur les deux disques durs du système. La partie des traitements concernant l'application des méthodes photogrammétriques numériques a été effectuée avec le logiciel *Desktop Mapping System* (version 3.1) sur des photographies aériennes à l'échelle du 1: 30 000, numérisées avec le scanneur *Scanjet II C* de Hewlett-Packard. La partie des traitements de base des images satellitaires a été effectuée avec le logiciel *EASI/PACE* (version 5.2) de PCI et, finalement, pour les sorties sur l'imprimante couleurs *DeskJet 560 C* de Hewlett-Packard on a utilisé le logiciel *Idrisi* pour Windows.

Tableau 1. Caractéristiques des données satellitaires utilisées

	24-07-1975	05-06-1981	28-06-1984	27-05-1986	27-04-1993
Satellite	Landsat-2	Landsat-2	Landsat-5	SPOT -1	SPOT-1
Capteur	MSS	MSS	TM	HRV-2	HRV-2
Mode d'acquisition	Multibande				
Bande	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4,5,6,7	1,2,3	1,2,3
Trajectoire/ Rangée	195/029	195/029	180/029	98/259	98/259
Résolution (m)	79 x 79	79 x 79	30 x 30	20 x 20	20 x 20
Rectification* (pixel)	± 0,475	± 0,837	± 0,813	± 0,391	± 0,275

* Erreur quadratique moyenne après correction géométrique

Les corrections géométriques des images ont été appliquées sur la base d'un réseau de points de contrôle déterminé à partir des mesures d'aérotriangulation effectuées sur le restituteur analytique Wild Aviolyt BC2 (BARBALATA, 1988, 1993).

Des photographies aériennes prises dans les années 1978 et 1980 à l'échelle du 1: 30 000 et du 1: 40 000, ainsi que des cartes topographiques à l'échelle du 1: 50 000 ont également été utilisées.

Enfin, une campagne de terrain (1991-1993), effectuée par les chercheurs roumains, a permis de recueillir les données nécessaires pour dresser une carte thématique et valider la plupart des interprétations.

3.2. Méthode

La détection des changements à l'aide de données multibandes implique des traitements préliminaires, des classifications et des procédures spécifiques de type postclassification (ALLUM and DREISINGER, 1987; HILL and STURM, 1991; JENSEN *et al.*, 1995).

3.2.1. Traitements préliminaires

Pour assurer la comparabilité des données radiométriques multidates, il a fallu ramener les données MSS et TM à la résolution spatiale de l'image de référence du HRV (XS).

À cause des résolutions différentes de ces capteurs, 80 m pour MSS, 30 m pour TM et 20 m pour HRV (XS), les données ont été soumises à un suréchantillonnage de 4 x 4 pour MSS et de 1,5 x 1,5 pour TM. Les étapes suivantes sont l'amélioration des contrastes et la sélection de points d'appui. Les 35 points qui représentent des objets invariants ont servi au calcul des fonctions de transformation géométrique représentées par des polynômes du 3^e degré. Ces transformations correspondent à l'ajustement des images suréchantillonnées sur l'image de référence HRV (XS) d'avril 1993. Étant donné que les coordonnées obtenues après les transformations ne correspondent pas à un pixel précis, il a été nécessaire d'appliquer une convolution cubique. Cette fonction d'échantillonnage, qui utilise une approximation bicubique de 16 voisins les plus proches du pixel concerné, permet de modéliser l'image localement par une surface polynomiale (DEFOURNY, 1994). À la fin,

on obtient des plans spectraux qui vont coïncider parfaitement au niveau de chaque pixel, avec l'image de référence. La précision de ces transformations varie selon les images utilisées. Les erreurs moyennes quadratiques pour chaque scène rectifiée sont présentées au tableau 1. On constate sur ce tableau que les précisions varient de ±0,275 à ± 0,837 pixels. L'image représentée par la figure 34-2 (voir cahier couleur) est une composition couleur infrarouge rectifiée selon les principes énoncés plus haut. L'image est le résultat de l'application des traitements suivants : 1) étalement par la méthode d'égalisation des histogrammes; 2) création de l'image composite à partir des 3 canaux les plus décorrélés dans le cas de l'image TM et à partir des 3 canaux spécifiques de HRV (XS); 3) rééchantillonnage par convolution bicubique.

Cette composition colorée met très bien en évidence les caractéristiques géomorphologiques du delta du Danube. On distingue clairement les différents états du sol en fonction du degré d'humidité, notamment les étendues de grande humidité, représentées par les eaux courantes, les lacs, les eaux turbides et stagnantes, les restes des anciens méandres et les terrains marécageux. On distingue ensuite les étendues d'humidité modérée et faible, représentées par la structure parcellaire des terres agricoles et les sols sableux secs et nus. La composition colorée révèle également les principales formations morpho-hydrographiques représentées par les cordons littoraux, les levées fluviatiles, les plaines continentales, les bras, les ruisseaux et les chenaux.

Un problème rencontré par l'utilisation des images historiques pour des fins d'analyse diachronique est représenté par la variation de l'angle d'incidence du Soleil, la variation dans les conditions atmosphériques et d'humidité. Il y a aussi des facteurs qui affectent les valeurs de luminance des pixels, comme les différences de données de calibration des détecteurs appartenant aux différents systèmes de capteurs, la variation de l'angle d'incidence du Soleil, et la variation de la distance Soleil-Terre. Normalement, les données multidates doivent être normalisées pour réduire la variation des valeurs de luminance et les ramener aux conditions spécifiques de l'image de référence. À cause du manque d'informations concernant les caractéristiques atmosphériques et la réflectance bidirectionnelle des objets, nous avons adopté un modèle de correction qui tient compte des données de calibration du détecteur et des caractéristiques astronomiques, atmosphériques et d'angle de phase appartenant à la scène de référence (HRV).

Le calage radiométrique a été effectué sur des objets invariants et pseudo-invariants (CHAVEZ, 1989) : lacs, zones urbaines (Sulina, Sf. Gheorghe, Dunavat), portions du fleuve Danube, sablières sur la côte de la mer Noire, pour un total de 15 objets. La normalisation des images MSS et TM a été faite par l'application d'une équation de régression linéaire à chaque bande spectrale de type $y = ax + b$. Les résultats de la normalisation sont représentés par les cœfficients de calage a et b, ainsi que par les cœfficients de corrélation r (tab. 2). En analysant le tableau 2, on constate que le gain (cœfficient a) associé à l'image HRV du 27 mai 1986 est minime, alors qu'il est significatif pour les images historiques MSS.

3.2.2. Classification

Une classification non dirigée (LEE and MARSH, 1995) pour l'image de référence a fourni 14 classes (fig. 34-3, voir cahier couleur). Les résultats ont été comparés avec les données de la campagne de terrain et finalement, après le regroupement des classes, une nouvelle classification dirigée de huit classes a été réalisée avec la méthode du maximum de vraisemblance (fig. 34-4, voir cahier couleur). Cette classification a servi pour la validation des classifications effectuées sur les images MSS et TM. On distingue sur l'image HRV (fig. 34-5, voir cahier couleur) les principales catégories morpho-hydrographiques :

Tableau 2. Paramètres des équations de régression du calage radiométrique

Date	Capteur	Bande	Cœfficient a	Cœfficient b	Cœfficient r
24-07-1975	MSS	1	0,895	29,493	0,88
		2	0,638	26,572	0,86
		3	2,497	26,653	0,89
		4	3,415	30,451	0,79
05-06-1981	MSS	1	2,379	19,503	0,85
		2	2,034	12,705	0,89
		3	1,856	23,172	0,78
		4	3,697	25,005	0,89
28-06-1984	TM	1	1,175	28,505	0,86
		2	0,903	24,051	0,87
		3	1,305	31,015	0,87
		4	1,727	18,903	0,78
		5	1,503	21,441	0,89
		7	2,051	19,172	0,79
27-05-1986	HRV-1	1	0,468	34,754	0,89
		2	0,681	29,195	0,85
		3	0,611	25,288	0,87

- les cordons littoraux (8 %) qui occupent le côté est du delta et qui sont placés presqu'au travers des bras du Danube. Les principaux cordons littoraux sont représentés par les cordons Letea, Caraorman, Saraturile, Crasnicol;
- les levées fluviatiles (6 %) qui accompagnent les bras principaux et secondaires du fleuve et qui sont mieux représentées vers le sommet du delta, là où elles ont un aspect de plaines alluviales hautes de 2 à 5 m qui s'effilent vers la mer;
- les plaines continentales (3 %) qui sont formées de dépôts de lœss et qui sont représentées par la plaine de Chilia et par la zone centrale du cordon littoral de Stipoc;
- les terrains marécageux, couverts tantôt d'eau, quand le fleuve est haut, tantôt d'une végétation palustre, occupent dans leur état naturel environ 67,2 % de la superficie du delta, à une altitude qui varie entre -0,5 et 1 m;
- les lacs (8 %) qui remplissent les dépressions qui se trouvent au-dessous du niveau zéro à l'ouest (delta fluviatile) et au-dessous du niveau -0,5 m à l'est (delta maritime) où ils forment des complexes lagunaires. Les lacs occupaient en 1964 une superficie de 31 260 ha, soit 9,3 % du territoire du delta. En 1990, après l'assèchement de certains d'entre eux au profit des terrains agricoles, leur superficie totale n'était que de 25 800 ha, soit 8 %. Les plus grands lacs du delta du Danube sont celui de Dranov (2 170 ha), le lac Rosu (1 445 ha), Gorgova (1 377 ha), Lumina (1 367 ha), Isac (1 101 ha), Merhei (1 057 ha) et Furtuna (977 ha);
- les bras, les ruisseaux et les chenaux principaux qui couvrent 5 % de la superficie, dont les bras totalisent 4 % à eux seuls.

Une description détaillée des classes est présentée à l'annexe 1.

3.2.3. Traitements de postclassification

Des études concernant le suivi des changements des caractéristiques de la végétation (TUCKER *et al.*, 1985; CIHLAR *et al.*, 1991; MARSH *et al.*, 1992) sont basées sur l'indice de végétation normalisé. La réflexion différentielle de la végétation verte dans le spectre du visible et de l'infrarouge proche du spectre électromagnétique constitue l'argument de base théorique pour l'application de cette méthode (KARIMOUNE *et al.*, 1993; WEBER *et al.*, 1993; WOLTER *et al.*, 1995). Dans le cas de données MSS, l'indice de végétation NDVI, s'exprime par la relation :

$$NDVI\,(MSS) = \frac{(CH4 - CH2)}{(CH4 + CH2)}$$

où CH2 = réflectance dans le canal rouge (0,6 - 0,7 µm);
CH4 = réflectance dans le canal infrarouge proche (0,8 - 1,1 µm).

Finalement, l'indice NDVI a été calculé en fonction du degré d'absorption par la chlorophylle dans la bande rouge. Celle-ci est proportionnelle à la concentration de la chlorophylle dans les feuilles. L'indice NDVI a été calculé également en fonction de la réflectance dans la bande infrarouge proche. La réflectance de celle-ci est proportionnelle à la verdure des feuilles et aux caractéristiques de la surface. Une autre version de l'indice de végétation, sous le nom de *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (HUETE, 1988) a été calculée. Dans le cas des données MSS, la relation SAVI devient :

$$SAVI\,(MSS) = \left[\frac{(CH4 - CH2)}{(CH4 + CH2 + 0{,}5)}\right] \cdot 1{,}5$$

Pour certaines zones analysées, la comparaison entre les valeurs NDVI et SAVI a montré que les valeurs SAVI sont plus significatives pour le couvert végétal que les valeurs NDVI. Par conséquent, nous avons choisi l'indice de végétation SAVI pour caractériser l'état de la végétation dans le cas des données MSS (LEE and MARSH, 1995).

Comme dernière étape principale dans le cadre de l'analyse multidate sur la base des classifications des données NDVI et SAVI, nous avons appliqué une classification matricielle croisée qui s'est avérée très utile pour identifier les changements entre différentes dates. Les matrices résultantes nous ont permis d'obtenir pour les classes analysées : 1) sur la diagonale principale, le nombre de pixels, ou le pourcentage de pixels qui n'ont pas subi de changement entre les deux dates analysées; 2) au-dessus de la diagonale principale, le nombre de pixels, ou le pourcentage de pixels qui ont subi des changements positifs (augmentation); 3) au-dessous de la diagonale principale, le nombre de pixels, ou le pourcentage de pixels qui ont subi des changements négatifs (diminution).

4. Discussion et conclusion

Les résultats de cette étude nous montrent le potentiel des données historiques (MSS, 1975 et 1981), des données TM (1984) et HRV (1986 et 1993) et de leur intégration dans des analyses multidates, pour obtenir des informations viables concernant le suivi des changements dans le milieu naturel du delta du Danube sur une période approximative d'une vingtaine d'années.

Une attention particulière doit être réservée aux traitements préliminaires, car la qualité des analyses ultérieures dépend surtout, dans le cas des analyses diachroniques, de la prise en considération des caractéristiques des différents capteurs et des conditions atmosphériques spécifiques.

L'utilisation de l'indice de végétation SAVI, combinée avec l'analyse matricielle croisée, ont apporté des informations très utiles en ce qui concerne le pourcentage des changements de différentes classes de végétation des écosystèmes du delta du Danube. Les analyses détaillées et les résultats quantitatifs et qualitatifs sont présentés dans BARBALATA (1995).

5. Remerciements

Nous remercions tout particulièrement l'AUPELF-UREF qui a financé totalement les travaux de recherche associés à cette étude.

6. Références

ALLUM, J.A.E. and DREISINGER, B.R. 1987. Remote sensing of vegetation change near Inco's Sudbury mining. International Journal of Remote Sensing, vol. 8, n° 3, p. 399-416.

BARBALATA, J. C. 1988. Block triangulation at large scale using flight variant UMK camera photography. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 27, partie B11, p. 469-475.

BARBALATA, J. C. 1993. Integration of the Aviolyt BC2 Analytical Stereo-Plotter into CARIS Geographic Information System. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 17, n° 3, p. 239-242.

BARBALATA, C.J. 1995. Étude de l'évolution du milieu naturel du delta du Danube par télédétection multi-temporelle. Laboratoire de photogrammétrie, télédétection et SIG, Université de Moncton, N.-B., rapport n° 12, 80 p.

CHAVEZ, P. S. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 55, n° 9, p. 1285-1294.

CIHLAR, J., ST.-LAURENT, L. and DYER, J. A. 1991. Relation between the normalized difference vegetation index and ecological variables. Remote Sensing of Environment, n° 35, p. 279-289.

DEFOURNY, P. 1994. Évaluation et suivi de la végétation ligneuse en région tropicale sèche. *in* F. Bonn (réd). Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. ACCT/ Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, p. 247-264.

GASTESCU, P. 1992. Le delta du Danube. Ed. DTM, Bucuresti, Romania.

HILL, J. and STURM, B. 1991. Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. International Journal of Remote Sensing, vol. 12, n° 7, p. 1471-1491

HUETE, A.R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295-309.

JENSEN, J.R., RUTCHEY, K., KOCH, M.S. and NARUMANALI, S. 1995. Inland Wetland Change Detection in the Everglades Water Conservation Area 2A Using a Time Series of Normalized Remotely Sensed Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 61, n° 2, p. 199-209.

KARIMOUNE, S., ALEXANDRE, J. et OZER, A. 1993. Suivi par télédétection de la désertification dans la région de Zinder (Niger). *in* J.-M. Dubois, F. Cavayas et P. Lafrance (réd.). Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Édition AUPELF/ Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, p. 151-159.

LEE, C.T. and MARSH, S.E. 1995. The Use of Archival Landsat MSS and Ancillary Data in a GIS Environment to Map Historical Change in an Urban Riparian Habitat. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 61, nº 8, p. 999-1008.

MARSH, S.E., WALSH, J.L., LEE, C.T. and HUTCHINSON, C.F. 1992. Comparison of multi-temporal NOAA-AVHRR and SPOT-XS satellite data for mapping land-cover dynamics in the West African Sahel. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, nº 16, p. 2997-3016.

TUCKER, C.J., VANPRAET, M.J., SHARMAN, M.J. and ITTERSUM, G. VAN, 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. Remote Sensing of Environment, vol. 17, p. 233-249.

WEBER, C., HIRSCH, J. et SERRADJ, A. 1993. Cartographie d'une forêt spécifique à partir de données satellitaires TM de Landsat et HRV de SPOT : la forêt alluviale de la Robertsau. *in* J.-M. Dubois, F. Cavayas et P. Lafrance (réd.). Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Édition AUPELF/Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, p. 273-282.

WOLTER, P.T., MLADENOFF, D.J., HOST, E. and CROW, T.R. 1995. Improved Forest Classification in the Northern Lake States Using Multi-Temporal Landsat Imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 61, nº 9, p. 1129-1143.

Annexe 1

Classe : eaux courantes

Le Danube et ses bras : Chilia, ramifié et plein d'îlots, est le plus jeune, le plus long (120 km) et le plus vigoureux des trois bras. Il laisse passer 58 % des eaux et des alluvions du fleuve. Au cours de son évolution, il a formé plusieurs deltas secondaires, le premier dans la dépression de Pardina, le second tout près de la localité de Chilia Veche et le troisième, qui est en cours de formation, au-delà de Periprava. Le bras de Sulina a été préféré par la Comission Européenne du Danube, qui a entrepris d'amples études à cet effet, pour la navigation maritime. Dans ce but, entre 1862 et 1902, on a corrigé ses méandres et on a approfondi son lit. Sa longueur s'est par conséquent réduite de 92 km à 63,7 km, et le volume d'eau et d'alluvions a augmenté de 9 %, au détriment du bras de Chilia. À cause des alluvions déposées à l'embouchure du bras, on a dû récemment creuser un canal qui avance peu à peu dans la mer pour protéger la navigation; sa longueur actuelle est de moins de 10 km. Sfîntu Gheorghe, long de 108,2 km, est le plus ancien des bras du Danube. Six de ses grands méandres ont été corrigés ces dernières années, ce qui l'a réduit à 69,7 km. Avant l'embouchure, le bras bifurque et le nouveau bras, placé à droite par rapport au bras Sfîntu Gheorghe, bifurque à son tour dans deux bras secondaires, Garla de Mijloc et Garla Turceasca. Les deux finissent par déboucher dans un golfe appelé la baie de Sfîntu Gheorghe, formé par l'apparition en 1897 et le développement ultérieur des îles Sacalin, qui ont actuellement une longueur de 19 km.

Classe : eaux stagnantes

L'écosystème des eaux stagnantes, où la première place est occupée par les lacs et ensuite par les petits bras secondaires et les chenaux boueux, se caractérise par une flore riche, submergée et flottante dont on remarque surtout *Myriophyllum* et *Ceratophyllum* qui sont des plantes submergées, mais en régression suite à l'eutrophisation de l'eau, des nénuphars (*Nymphaea alba, Nuphar luteum*)

des *Trapa natans*, *Alisma plantago*, *Sagittaria sagittifolia*, qui sont des plantes flottantes à racines qui se développent aux bords des lacs, des *Lemna*, *Salvinia natans*, *Stratiotes aloides* et *Spirogyra*, qui sont des plantes flottantes sans racines et ayant des effets négatifs sur la productivité biologique des eaux.

Classe : terrains marécageux et inondables

Dans l'écosystème des terrains marécageux et inondables (des cannaies et des « plaur ») domine une végétation émergée où prédominent le roseau (*Phragmites communis*) et, vers les levées fluviales, la masette (*Tipha latifolia, Tipha angustifolia*), le carex (*Carex dioica, Carex stricta*), le jonc des tonneliers (*Scirpus radicans, Scirpus lacustris*), les iris jaunes (*Iris pseudocorus*), la menthe des marais (*Mentha aquatica*), la saule cendrée (*Salix cinerea*), etc. Il faut absolument mentionner à l'intérieur de cet écosystème la formation de « plaur », sorte d'île flottante formée de rhizomes entremêlés qui sert de sol à une formation végétale où dominent le roseau et les herbes. Les cannaies se forment, en général, autour des lacs et des complexes lacustres qu'ils envahissent à la longue.

Classe : levées fluviales et cordons littoraux

Dans l'écosystème des levées, l'élément de base est la levée fluviale. Les levées fluviales, jadis le royaume des saules, ont été défrichées et plantées de peupliers du Canada. Il y a quand même des boqueteaux de saules (*Salix alba, Salix fragilis, Salix pentandra, Salix rubra, Salix cinerea*) à côté du Peuplier blanc (*Populus alba*) et de quelques variétés d'arbrisseaux. Les cordons littoraux de Letea et de Caraorman dont le sol est sablonneux, sont des dunes couvertes de forêts de chênes autour desquels se sont enroulées des lianes, ce qui leur donne l'aspect d'une forêt subtropicale. Sur le cordon littoral de Letea, les dépressions formées entre les dunes sont couvertes de forêts, sous forme de boqueteaux, nommées hasmace. Le spectre floral est constitué d'arbres tels le chêne (*Quercus robur, Quercus pedunculiflora*), le frêne (*Fraximus angustifolia, Fraximus pallisae*), l'orme (*Ulmus foliacea Ulmus*), le Peuplier blanc, le Grisard et le Peuplier faux tremble (*Populus alba, Populus canescens, Populus tremula*); d'arbrisseaux comme l'Épine noire (*Prunus spinosa*), l'Aubépine (*Crataegus monogyna*), l'Églantier (*Rosa canina*), l'Épine-vinette (*Berberis vulgaris*), la Pruène (*Ligustrum vulgare*), l'Argousier (*Hyppophae rhamnoides*), *Tamarix gallica* et de plantes grimpantes comme la Vigne vierge (*Vitis silvestris*), le Lierre (*Hedera helix*), le Houblon (*Humulus lupulus*) et *Periploca graeca*, une liane extrêmement intéressante, d'une longueur pouvant atteindre 25 m.

Classe : aménagements agricoles

Les écosystèmes des eaux stagnantes, des cannaies et des levées fluviales ont subi des modifications majeures dues à la construction d'enceintes destinées aux cultures agricoles, aux plantations sylvicoles et aux établissements piscicoles, dont la superficie remontait, en 1991, à 100 700 ha, soit environ 30 % de la superficie totale du delta. Les aménagements qui ont totalement changé le paysage du delta ont été faits à Pardina (27 000 ha), Sireasa (7 500 ha), Carasuhat (2 800 ha) et Murghiol-Dunavat (2 500 ha).

Classe : aménagements sylvicoles et piscicoles

Les aménagements sylvicoles (Păpădia 2 000 ha, Rusca 1 200 ha, Carasuhat 680 ha, Murighiol 400 ha) et les aménagements piscicoles ont également abouti à la modification des écosystèmes naturels par les lotissements et les travaux de régularisation du régime hydrologique. On envisage de réintégrer les aménagements qui sont prouvés inefficaces, dans le régime hydrologique naturel (Holbina I, Holbina II, Dunavat II et Popina).

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 347-355

35

Suivi spectral des rizières dans le delta du fleuve Rouge (Viêt-nam) à l'aide de mesures spectroradiométriques et d'indices de végétation : appui à la compréhension des images satellitaires

NGUYEN XUAN DAO [1†], ABDERRAZAK BANNARI [2], PHAM VAN CU [1], FERDINAND BONN [2], JUDITH COULOMBE-SIMONEAU [2], PIERRE LAFRANCE [2] et PATRICK CLICHE [2]

[1] *Centre de télédétection et de géomatique, Institut de géologie, Centre national des sciences naturelles et de la technologie du Viêt-nam, Hanoi, Viêt-nam; téléphone et télécopieur : +84 (4) 835-14-93; CÉ : cu@ir-igl.ac.vn*

[2] *Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1; téléphone : +1 (819) 821-7180; télécopieur : +1 (819) 821-7944; CÉ : cartel@courrier.usherb.ca*

[†] *Cet article est un hommage posthume à Nguyen Xuan Dao, décédé tragiquement au courant de l'été 1995.*

Résumé

Au Viêt-nam, les réformes économiques et agraires pourraient aboutir à une augmentation spectaculaire de la production de riz au cours de la décennie à venir. Dans cette optique, l'analyse des images multibandes de télédétection apparaît comme une technique bien adaptée pour le suivi de l'évolution de l'environnement des rizières et des superficies cultivées afin de prévoir la production. Pour mieux comprendre les interactions du rayonnement électromagnétique avec les différentes unités d'occupation du sol, nous avons entrepris d'étudier leurs profils spectraux à partir des mesures physiques au sol. Les

données utilisées dans la présente étude ont été recueillies lors d'une campagne de mesures radiométriques menée dans le delta du fleuve Rouge à l'aide des radiomètres CIMEL et Spectron. Quatre sites sont retenus ici, ils représentent : 1) un sol nu typique de la région, de couleur gris-rouge argileux; 2) une rizière à une semaine émergeant d'une lame d'eau, avec un taux de couverture de 7 %; 3) une rizière à quatre semaines avec un sol humide sans lame d'eau, avec un taux de couverture de 29 %; et 4) une rizière à six semaines qui montre un taux de couverture élevé (66 %). L'indice de végétation SAVI permet une bonne description du taux de couverture du riz à différents stades de croissance indépendamment de la lame d'eau. Le taux de couverture du riz est surestimé durant tous les stades de croissance par les indices NDVI et GEMI, alors qu'il est sous-estimé par le TSAVI en période immergée, ce qui en rend plus difficile l'interprétation des résultats et par conséquent les prévisions des récoltes.

1. Introduction

Classé au second rang des céréales mondiales, le riz constitue la base de l'alimentation et la principale source de revenus de la majorité des pays asiatiques qui en sont les gros producteurs. L'accroissement de production est indispensable, d'une part, pour nourrir les populations en expansion de ces pays asiatiques et, d'autre part, pour l'exportation qui est une source de devises étrangères. Au Viêt-nam, les réformes économiques et agraires pourraient aboutir à une augmentation spectaculaire de la production de riz au cours de la décennie à venir (EVENSON et DAVID, 1993). Dans cette optique, l'analyse des images multibandes de télédétection apparaît comme une technique bien adaptée pour le suivi de l'évolution de l'environnement des rizières et des superficies cultivées afin de prévoir la production. Comparativement aux méthodes conventionnelles comme l'analyse visuelle des photographies aériennes et les enquêtes sur le terrain, la télédétection a coûté deux fois moins cher pour le suivi de l'environnement des rizières en Australie (McCLOY *et al.*, 1987). Vis-à-vis de la télédétection, la caractéristique principale des rizières est leur hétérogénéité spatiale et spectrale due à la présence de l'eau, des algues, du riz et du sol, ainsi qu'au parcellaire très morcelé. Pour mieux comprendre les interactions du rayonnement électromagnétique (vecteur de l'information) avec ces différentes unités d'occupation du sol, nous avons entrepris d'étudier leurs profils spectraux à partir des mesures physiques au sol.

Dans le cadre d'un projet de recherche partagée pour la surveillance de l'environnement par télédétection et système d'information géographique (SIG) dans le delta du fleuve Rouge au Viêt-nam, une campagne de mesures radiométriques au sol a été réalisée à différents stades de croissance du riz. La réalisation de ce suivi doit s'appuyer sur l'examen des limitations propres aux techniques de télédétection (FERRARI et GRÉGOIRE, 1983) compte tenu de la réalité de terrain et des spécificités du secteur d'étude : dimension des parcelles qui est souvent inférieure ou égale à celle du pixel (HRV, TM, etc.), variations dans l'espace (sols, eau, végétation) et dans le temps (stades de croissance, conditions de submersion, etc.) (ANGLADETTE, 1966). Les unités d'occupation du sol envoient au satellite un signal mixte composé de luminances de la végétation combinées à celles du sol, de l'eau et de toute sorte de végétation aquatique plus au moins verte (algues, lemnacées, etc.).

Ceci se traduit directement au niveau satellitaire par la présence d'un signal mixte dans un même pixel, ce qui cause un problème de compréhension de l'information reçue au capteur. La figure 1 illustre bien cette situation et montre le comportement spectral propre

à chacune des unités et du riz à différents stades de croissance. Un autre problème relève des conditions atmosphériques dans le delta qui sont défavorables presque durant toute l'année ce qui n'aide pas à faire des études multidates. En effet, les rares images qui existent sur la région sont caractérisées dans la plupart des cas par un faible contraste (effet d'environnement) ce qui affecte par conséquent l'interprétation des résultats. De ce fait, afin de connaître le comportement spectral de chacune des variables de ce milieu, nous trouvons très pertinent, dans un premier temps, de travailler dans un cadre basé sur des mesures au sol dont on connaît *a priori* l'occupation. Cela devrait permettre de mieux connaître le comportement spectral des rizières à divers stades de croissance, de déterminer des points de référence invariants pour l'observation des changements de l'environnement dans le delta et, comme perspectives futures, d'établir un catalogue des signatures spectrales des principales unités d'utilisation du sol.

L'exploitation des données de télédétection peut être effectuée à l'aide d'un éventail important de démarches différentes. La démarche présentée dans le cadre de cette étude s'appuie sur la transformation d'une série de données spectrométriques en indices de végétation. Les résultats de ces mesures sont analysés dans l'espace spectral rouge/ infrarouge proche, puis transformés par la suite en quatre indices de végétation différents (NDVI, SAVI, TSAVI et GEMI). Le potentiel de ces indices est analysé pour déterminer le taux de couverture du riz indépendamment du sol nu et de la lame d'eau dont la hauteur varie en fonction du cycle de développement et des conditions météorologiques (fig. 1). L'existence d'une relation entre l'indice de végétation et les paramètres du riz peut être utile pour l'établissement d'une typologie des rizières, d'une évaluation du taux de couverture et pour une compréhension de l'évolution du milieu.

2. Site d'étude

Le fleuve Rouge du Viêt-nam prend naissance en Chine et doit son nom à la couleur brique que prennent ses eaux en période d'inondation. Avec les villes de Hanoi et de Haiphong, son delta regroupe l'essentiel de la population et la moitié de l'activité économique du nord du pays et produit environ la moitié de la production nationale de riz. Les données utilisées

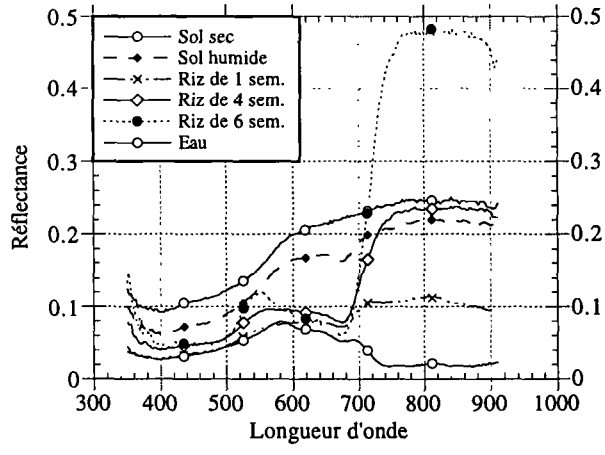


Figure 1. Comportement spectral du riz en fonction de la lame d'eau et du stade de croissance

dans la présente étude ont été recueillies lors d'une campagne de mesures radiométriques menée en janvier 1993. Quatre sites sont retenus ici, ils représentent un sol nu et trois stades de croissance du riz : 1) un sol nu typique de la région de couleur gris-rouge argileux; 2) une rizière à une semaine émergeant d'une lame d'eau, avec un taux de couverture de 7 %; 3) une rizière à quatre semaines avec un sol humide sans lame d'eau avec un taux de couverture de 29 %; 4) une rizière à six semaines qui montre un taux de couverture élevé (66 %). La figure 2 montre la localisation géographique des sites de mesure.

3. Méthodologie

Afin d'analyser le potentiel des indices de végétation pour déterminer le taux de couverture du riz indépendamment du sol nu et de la lame d'eau, nous envisageons la confrontation des indices dérivés à partir des mesures radiométriques aux taux de couvertures au sol (données de terrain) déterminés par les méthodes de traitement d'images (classification).

3.1. Estimation du taux de couverture

Le taux de couverture du riz a été estimé à partir des photographies 35 mm prises verticalement, d'une hauteur de 2,5 m, à l'aide d'une caméra amateur en même temps que les mesures radiométriques. Nous avons pour cela construit une plate-forme mobile formée de deux échelles de bambou. Le taux de couverture est défini comme étant la surface du sol qui serait couverte si on y projetait verticalement les organes aériens des plantes. Pour ce faire, nous avons numérisé les photographies, puis procédé dans un système de

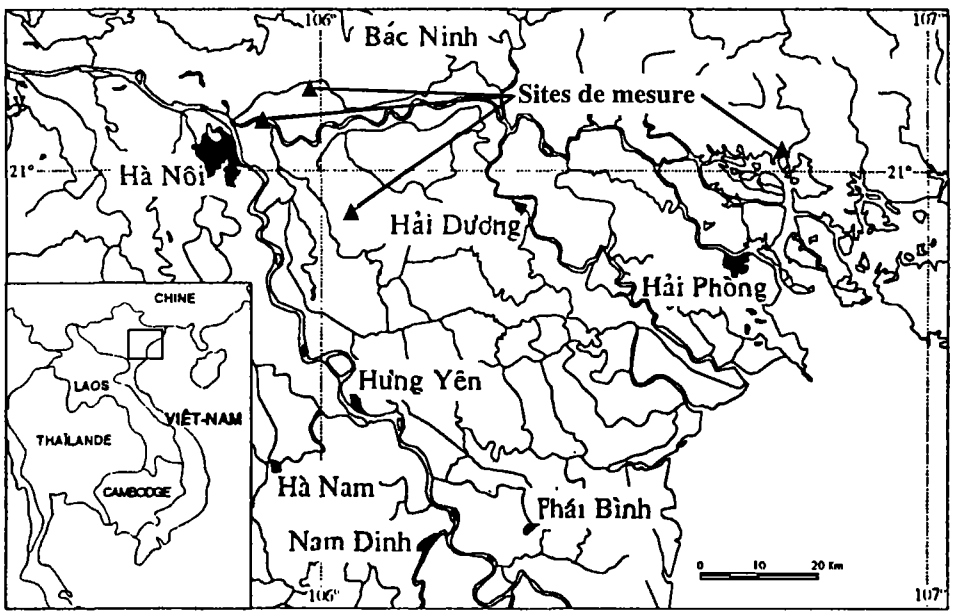


Figure 2. Localisation du site d'étude

traitement d'images à une classification par la méthode du maximum de vraisemblance des images ainsi obtenues dans les trois canaux du visible. Les taux de couverture résultants sont résumés sur le tableau 1.

3.2. Mesures spectroradiométriques

Les données utilisées dans cette étude impliquent un mélange spectral dû aux contributions du sol, de la végétation et de l'eau. Les mesures radiométriques ont été faites à l'aide d'un radiomètre portable de simulation du capteur HRV du satellite SPOT (CE-310 de CIMEL), ainsi qu'à l'aide d'un spectroradiomètre Spectron. Le CIMEL est doté de deux canaux dans le visible (vert et rouge) et d'un canal dans l'infrarouge proche, avec un champ de visée de 12°. Il mesure l'éclairement solaire incident au sol et la luminance dans chacun des trois canaux. Le radiomètre était placé à 2,5 m du sol en position verticale. La réflectance de la cible a été obtenue conformément à la méthode décrite par JACKSON *et al.* (1980) adaptée aux caractéristiques du radiomètre par l'utilisation d'une surface de référence lambertienne pour la normalisation des mesures. La réflectance de la cible est obtenue par la formule suivante :

$$\rho_{cible} = \frac{L_{cible}}{L_{réf}} \cdot \rho_{réf} \qquad (1)$$

où ρ_{cible} = réflectance de la cible;
$\rho_{réf}$ = réflectance de la surface de référence;
L_{cible} = luminance de la cible mesurée par le radiomètre;
$L_{réf}$ = luminance de la surface de référence mesurée par le radiomètre.

La réflectance bidirectionnelle dépend à la fois des angles d'éclairement et de visée. Cet effet bidirectionnel demeure négligeable dans notre cas puisque nos mesures ont été réalisées durant des intervalles de temps très courts et très rapprochés en gardant l'angle de visée constant dans une position verticale.

3.3. Passage des mesures aux indices de végétation

Malgré l'existence d'une quarantaine d'indices de végétation dans la littérature (BANNARI *et al.*, 1995), les rares travaux qui existent sur le suivi de l'environnement des rizières, utilisent souvent l'indice de végétation NDVI *(Normalized Difference Vegetation Index)* développé par ROUSE *et al.* (1974). Cet indice permet la mise en évidence des stades de croissance du riz (MAHAMAN, 1991). Dans l'optique de minimiser l'effet des sols sur la détection des couverts végétaux, les indices SAVI *(Soil Adjusted Vegetation Index)* (HUETE, 1988) et TSAVI *(Transformed Soil Adjusted Vegetation Index)* (BARET and

Tableau 1. Résultats des classifications

Stade de croissance	Taux de couverture du riz (%)	Remarques
1 semaine	7	Présence d'eau et d'ombre
4 semaines	29	Présence de sol nu humide
6 semaines	66	Présence d'eau

GUYOT, 1991) caractérisent bien le comportement spectral des couverts végétaux et du sol. Pour une gestion globale de l'environnement végétal à partir d'images satellitaires, PINTY et VERSTRAETE (1992) proposent un indice de végétation non linéaire le GEMI *(Global Environment Monitoring Index)*. Ces quatre indices (NDVI, SAVI, TSAVI et GEMI), jugés pertinents pour la présente étude, sont retenus :

$$NDVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_{PIR} + \rho_R)} \tag{2}$$

$$SAVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_{PIR} + \rho_R + L)} \cdot (1 + L) \tag{3}$$

$$TSAVI = \frac{a\,(\rho_{PIR} - a\,\rho_R - b)}{\rho_R + a\,\rho_{PIR} - a\,b + 0{,}08\,(1 + a^2)} \tag{4}$$

$$GEMI = \frac{\eta\,(1 - 0{,}25\,\eta) - (\rho_R - 0{,}125)}{1 - \rho_R} \tag{5}$$

$$\eta = \frac{\left[2\,(\rho_{PIR}^2 - \rho_R^2) + 1{,}5\,\rho_{PIR} + 0{,}5\,\rho_R\right]}{(\rho_{PIR} + \rho_R + 0{,}5)} \tag{6}$$

où ρ_R = réflectance moyenne dans le canal rouge;
ρ_{PIR} = réflectance moyenne dans le canal infrarouge proche;
a = pente de la droite des sols nus;
b = ordonnée à l'origine de la droite des sols nus;
L = facteur d'ajustement égal à 0,5.

4. Analyse et discussion des résultats

Dans l'espace spectral bidimensionnel rouge/infrarouge proche, nous constatons que les classes de riz à différents stades de croissance se distinguent très bien l'une de l'autre et aussi des classes de sols sec et humide (fig. 3). Nous remarquons que le comportement spectral permet de déterminer la densité du riz à un moment donné de sa croissance. Le riz à 6 semaines se distingue nettement des autres classes par sa forte réponse spectrale dans l'infrarouge proche. Quant au riz d'une semaine, sa signature se situe près de l'origine de la droite des sols. Elle est fortement influencée, d'une part, par l'effet de la lame d'eau qui absorbe sélectivement dans le rouge et l'infrarouge proche et, d'autre part, par celui du sol sous-jacent. Théoriquement, les signatures des sols nus secs et humides doivent être confondues avec la droite des sols, mais nous remarquons qu'elles s'en écartent un peu du fait que la réflectance dans l'infrarouge proche est légèrement accentuée à cause de la couleur gris-rouge du sol. À la lumière de ces constatations, nous pouvons dire que l'information spectrale contenue dans les canaux rouge et infrarouge proche permet une bonne discrimination entre les classes de sol et de riz à différents stades de croissance. Par conséquent, les indices de végétation dérivés à partir de ces deux canaux devraient pouvoir servir à caractériser l'état des surfaces dans un environnement de rizières.

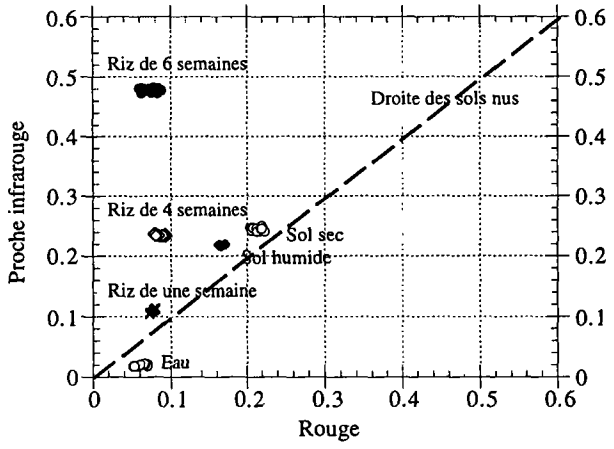


Figure 3. Caractérisation des différentes unités du sol dans l'espace spectral rouge/proche infrarouge

Pour chacun des sites d'étude, la figure 4 illustre bien la variation de la sensibilité entre les indices de végétation en fonction de différents taux de couverture du riz, du sol et de la lame d'eau. Dans le cas des sols nus, le TSAVI se caractérise par un comportement exemplaire du fait qu'il considère les paramètres de la droite des sols. Malgré l'ajustement du SAVI par rapport aux sols nus, il manifeste une faiblesse pour les couleurs claires de sols ce qui se traduit par une erreur quadratique moyenne de 8 %. Quant aux indices NDVI et GEMI, leur erreur de sensibilité aux sols nus est fortement significative, elle est de 13 % et 39 %, respectivement.

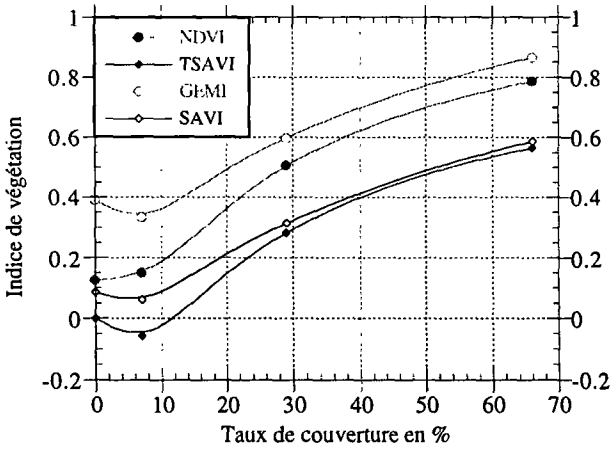


Figure 4. Sensibilité des indices de végétation aux taux de couverture du riz à différents stades de croissance

Par ailleurs, à cause de la présence d'eau pour le riz d'une semaine, l'absorption devient forte dans le rouge et l'infrarouge proche ce qui explique la forme concave des courbes de la figure 4. Pour le riz d'une semaine comme pour le riz de six semaines, la présence de l'eau affecte la précision du TSAVI. Les valeurs de celui-ci deviennent négatives (pour une semaine) ou faibles (pour six semaines). Par conséquent, il sous-estime le taux de couverture. En absence d'eau durant le stade de croissance de quatre semaines, le TSAVI s'approche de la réalité avec une erreur nulle.

En plus de leur sensibilité aux sols nus et à la lame d'eau, nous remarquons que globalement les indices NDVI et GEMI surestiment le taux de couverture. Durant tous les stades du cycle de développement, le taux de couverture est surestimé d'environ 14 % pour le NDVI et de 26 % pour le GEMI (tab. 2). Ceci fausse l'interprétation des résultats et par la suite les prévisions des récoltes.

Malgré sa sensibilité à la couleur du sol, le SAVI reflète une indépendance vis-à-vis la lame d'eau et estime le taux de couverture avec une bonne précision. Le tableau 2 montre une faible erreur moyenne sur cet indice et une excellente description du taux de couverture du riz à différents stades de croissance, en particulier en conditions immergées.

Tableau 2. Erreur sur l'indice de végétation en fonction du stade de croissance du riz

Stade de croissance	Erreur sur l'indice de végétation (%)			
	D NDVI	D GEMI	D TSAVI	D SAVI
Sol nu	+13	+39	0	+8
1 semaine	+8	+26	-13	0
4 semaines	+22	+31	-1	+2
6 semaines	+13	+21	-9	-6
Erreur quadratique moyenne	14,9	30,0	7,9	5,1

5. Conclusion

L'évaluation du taux de recouvrement du sol par la végétation est une des premières étapes de la compréhension du paysage à l'aide des données de télédétection. Afin d'étudier le potentiel des indices de végétation dérivés de mesures radiométriques pour le suivi de l'environnement d'une rizière, nous les avons confrontés aux taux de couverture du riz à différents stades de croissance déterminés par classification à partir des photographies numérisées. L'indice de végétation SAVI dérivé à partir des mesures radiométriques permet une bonne description du taux de couverture du riz à différents stades de croissance indépendamment de la lame d'eau. Le taux de couverture du riz est surestimé durant tous les stades de croissance par les indices NDVI et GEMI, alors qu'il est sous-estimé par le TSAVI en période immergée, ce qui en rend plus difficile l'interprétation des résultats et par conséquent les prévisions des récoltes.

Dans une étape ultérieure, nous utiliserons la méthode d'analyse des mélanges de spectres en vue de décomposer le signal en composantes propres à chacune des classes d'occupation du sol (SMITH *et al.*, 1994) en nous appuyant sur l'analyse des spectres complets obtenus à l'aide du spectroradiomètre.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le programme de recherche partagée de l'AUPELF-UREF qui leur a permis, non seulement de mener à bien cette recherche, mais aussi de s'en servir comme amorce pour un projet de plus grande envergure financé par le CRDI (Centre de Recherche et de Développement International).

7. Références

ANGLADETTE, A. 1966. Le riz. Collection Techniques agricoles et productions tropicales. Maisonneuve et Larose, Paris, 930 p.

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 Sensing of Environment, vol. 35, p. 161-173.

EVENSON, R. et DAVID, C. 1993. Ajustement et technologie : le cas du riz. Études du Centre de développement de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), Paris, p. 159.

FERRARI, G. M. et GRÉGOIRE, J. M. 1983. Analyse de mesures radiométriques au sol sur le site rizicole de Tamani (Rép. du Mali) : influence de certains paramètres de rendement sur le comportement spectral. Actes du II[e] Colloque international des signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, France, Ed. INRA Publ., Les Colloques de l'INRA, n° 23, p. 193-200.

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., ROBET, 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, USA, 66 p.

MAHAMAN, M. 1991. Applications de la télédétection aux bas-fonds rizicoles. Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du titre d'ingénieur agronome - orientation génie rural, Unité d'hydrolique agricole, Département de génie rural, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique.

McCLOY, K. R., SMITH, F. R. and ROBINSON, M. R. 1987. Monitoring rice areas using Landsat-MSS data. International Journal of Remote Sensing, vol. 5, n° 5, p. 741-749.

PINTY, B. and VERSTRAETE, M. M. 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. Vegetation, vol. 101, p. 15-20.

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 / GSFCT Type III Final Report, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 164 p.

SMITH, M. O., ADAMS, J. B. and SABOL, D. E. 1994. Spectral Mixture Analysis - New Strategies for the Analysis of Multispectral Data. *in* J. HILL and J. MÉGIER (eds), Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 125-143.

Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. 1997. p. 357-361

Conclusions

JEAN-PAUL DONNAY

Laboratoire SURFACES, Université de Liège, Place du 20-Août, 7, 4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (4) 366-54-24; télécopieur : +32 (4) 366-56-93; CÉ : surfaces@geo.ulg.ac.be

1. Pourquoi la télédétection urbaine ?

Pour ses Sixièmes Journées scientifiques, le Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF a choisi le thème de la télédétection des espaces urbains et périurbains. Pour tâcher de tirer les conclusions de cette réunion scientifique, il est bon d'en rappeler les attentes et, en premier lieu, de préciser pourquoi il est permis de parler de télédétection urbaine, et en quoi elle se différencie des autres applications de la télédétection.

La télédétection urbaine trouve son originalité, sa richesse, mais aussi ses limites, dans sa totale dépendance vis-à-vis de la technologie et de la méthodologie, dans sa totale dépendance vis-à-vis des données exogènes, et dans sa totale dépendance en regard de la notion même d'urbanisation.

L'analyse des espaces urbains et périurbains requiert une échelle de travail supérieure à toutes celles sollicitées par les autres applications de la télédétection. Longtemps, la photographie aérienne, seule, s'est avérée capable de répondre, au moins partiellement, à ses aspirations. Il a fallu attendre les capteurs des satellites de seconde génération pour que la télédétection satellitaire, accédant à une résolution décamétrique, s'immisce timidement parmi les outils d'analyse du milieu urbain. La télédétection urbaine est donc subordonnée à la qualité de la résolution géométrique. Aussi, ses utilisateurs sont-ils contraints d'examiner et d'incorporer toutes innovations techniques (nouveaux capteurs numériques et nouvelles photographies satellitaires) et méthodologique (évaluation précise des résolutions effectives, intégration d'images à résolutions multiples, recours aux photographies aériennes numérisées, etc.), susceptibles d'améliorer les capacités d'analyse de la ville par télédétection.

La ville, et l'espace urbanisé d'une manière générale, sont le produit de l'action de l'Homme. Or, il est notoire que la télédétection ne rend compte que de certains caractères physiques et morphologiques, bien incapables de résoudre, seuls, la complexité urbaine. L'apport de données exogènes, les plus diverses, s'avère dès lors indispensable à l'analyse :

données humaines, bien sûr (démographiques, sociales, économiques ou juridiques), mais aussi données physiques (topo-climatologiques, géomorphologiques, pédologiques, etc.) dès que les conflits sur l'espace, entre la ville et son environnement naturel, doivent être analysés et solutionnés. Au problème de disponibilité, souvent précaire, s'ajoute la difficulté de combiner, de rendre compatibles et cohérents des ensembles de données que tout semble séparer, des unités de mesure aux modes de distribution spatiale.

Mais l'un des défis les plus importants auxquels la télédétection urbaine doit faire face est de définir précisément l'objet de son analyse : la ville, l'espace urbanisé, l'urbanisation. Urbanistes, géographes, architectes, démographes ou historiens définissent autant de terrains d'action et identifient des enjeux multiples, et parfois contradictoires : ici la préservation du plan et de la forme; là, le développement des fonctions; ailleurs, la maîtrise de la croissance, etc. La télédétection peut-elle être amenée à participer à toutes ces démarches, avec quelles chances de succès et à quel niveau de qualité ?

On le constate, les domaines de préoccupations propres à la télédétection urbaine ne manquent pas. Les cercles scientifiques, la littérature spécialisée et les agences publiques, nationales et internationales, ont pris conscience du potentiel de la télédétection urbaine, ce qui s'est traduit en peu de temps par une multiplication de colloques, d'articles, de livres et de programmes de recherche appliquée. Il était donc pertinent, sinon urgent, d'évaluer l'implication du monde scientifique francophone dans ce courant de recherches, ce à quoi se sont efforcées de répondre ces Sixièmes Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF.

2. Compte rendu des séances

Trois domaines d'application ont été privilégiés durant ces journées, à savoir : les techniques spéciales de la télédétection urbaine, les rapports de cette dernière avec l'urbanisme et la planification, sous des aspects tant physiques que sociaux et économiques et, enfin, la cartographie urbaine. Comme de coutume, la réunion a favorisé la multiplicité des expériences, présentées sous forme de conférences et d'affiches, et émanant d'un grand nombre de pays de la communauté francophone, du Nord, comme du Sud.

Les sessions relatives aux techniques spéciales ont montré que la télédétection urbaine pouvait tirer profit de méthodes d'analyse confirmées d'autre part, mais adaptées au milieu urbain. Les multiples exploitations des indices de végétation en constituent un bel exemple. Parallèlement, le recours à la numérisation par scanneur rend aux photographies aériennes un rôle de premier plan en télédétection, soit à titre supplétif, soit intégrées à d'autres images, soit encore en tant que simulation de capteurs futurs à haute résolution. Comme on l'a signalé, la recherche d'une résolution géométrique optimale reste une constante en télédétection urbaine et elle a été soulignée à plus d'une reprise. On a constaté également l'utilisation de méthodes statistiques, sans doute familières, mais dont l'introduction en télédétection constitue une originalité. C'est le cas, par exemple, du modèle de potentiel et de l'analyse de correspondance. Enfin, la présentation de techniques nouvelles de diffusion et de distribution des données de télédétection urbaine, notamment par le réseau Internet, est venue compléter cette première catégorie d'exposés. Sans rien retirer de l'intérêt des communications présentées, il faut néanmoins remarquer l'absence de certains thèmes majeurs dont, pourtant, la littérature et d'autres colloques se sont fait récemment l'écho. C'est en particulier le cas de certaines méthodes de classification, telles que les méthodes bayésiennes, ou de l'usage de l'intelligence artificielle et de systèmes à base de connaissances.

Pour des raisons indépendantes des auteurs et des organisateurs, il a fallu déplorer l'absence de la délégation algérienne. Si ce regret est exprimé ici, c'est qu'une part essentielle des communications pressenties concernait, précisément, les techniques spéciales de télédétection urbaine : intégration de données optiques et radar, analyse de texture, segmentation, etc. Pour rendre justice à nos collègues algériens, et pour faire profiter le lecteur de l'originalité de ces méthodes, non discutées par ailleurs, le Comité de Réseau a souhaité faire figurer les textes de ces communications dans les pages de ces actes. Il reste, pourtant, que les participants aux journées ont manqué là, l'occasion d'une intéressante discussion méthodologique.

Comme on pouvait s'y attendre, les sessions consacrées aux applications de la télédétection à l'urbanisme et à la planification ont brillé par la diversité des thèmes abordés, tant sous forme de conférences, que sous forme d'affiches. La récurrence du thème de la délimitation des agglomérations urbaines par télédétection témoigne de son actualité et du degré opérationnel atteint, tantôt sur une base purement morphologique, tantôt en intégrant les données de recensement de population. Son importance a encore été soulignée lors de la présentation du vaste programme mené en la matière par l'agence de statistique européenne EUROSTAT. Dans le même ordre d'idées, on doit mentionner les approches originales menées dans les pays du Sud. L'identification des quartiers, la constitution de bases de sondage démographique, la mesure de la croissance urbaine sont autant de thèmes relevant sans doute de la même problématique, mais les discussions engagées sur ces thèmes font apparaître clairement des différences de concepts, sur lesquelles il y a lieu de s'interroger. De manière plus inattendue, mais particulièrement bienvenue, un certain nombre de communications ont abordé des aspects de planification physique liés, de près ou de loin, aux espaces urbains. La prise en compte de l'environnement naturel, y compris la géologie, dans les démarches de planification urbaine a ainsi été illustrée, mais le potentiel de la télédétection a aussi été démontré dans l'étude de la pollution atmosphérique des sites urbains. Pourtant, quelle que soit la diversité des thèmes discutés à l'occasion de ces sessions, on doit constater, ici encore, l'absence de préoccupations jugées par certains comme déterminantes pour l'avenir de la télédétection urbaine : les aspects normatifs et légaux de l'urbanisme, la standardisation des nomenclatures ou la modélisation des informations issues du traitement des images, en sont quelques exemples.

Le troisième domaine retenu pour ces journées était dédié à la cartographie urbaine. Par nature, le thème est hétérogène, puisqu'il incorpore des aspects strictement méthodologiques propres à la spatio-cartographie, à côté de considérations thématiques relevant de l'urbanisme et de la planification. En outre, c'est un thème qui s'exprime plus aisément par la voie d'affiches, au détriment parfois d'une discussion générale. Du point de vue méthodologique, on retiendra tout particulièrement les communications relatives à la fusion d'images à résolutions multiples pour la préparation de cartes satellitaires. La problématique de la mise à jour des cartes et de l'extraction d'informations cartographiques a également été débattue, en relation avec les notions d'échelle et de résolution. Cette discussion a d'ailleurs trouvé un prolongement intéressant dans l'exposé des bases de données géographiques à l'usage de cartes topographiques, établies par l'Institut géographique national belge. Quant à son exploitation thématique, la cartographie urbaine est essentiellement mise à contribution pour l'analyse diachronique, l'évaluation de la pression urbaine sur le milieu environnant et l'analyse de la croissance des agglomérations. Si les sessions ont été illustrées par un grand nombre de réalisations concrètes, sous forme de cartes et d'affiches, on remarque l'absence de toute référence à des thèmes tels que la réalisation d'orthophotocartes, l'extraction de réseaux ou la reconnaissance de formes. Il s'agit pourtant là, de sujets complémentaires aux questions abordées et impliquant une forte valeur ajoutée sur le plan méthodologique.

3. Les rapports Nord – Sud

La qualité et le nombre d'exposés et d'affiches, et le nombre de participants, plus de 130, ont confirmé l'opportunité du thème choisi pour ces sixièmes journées. On peut en déduire que les applications urbaines constituent l'un des axes de recherche privilégiés de la télédétection en communauté francophone. Malgré la relative jeunesse de la discipline, dix ans à peine, et les contraintes techniques et méthodologiques de son application, il faut souligner l'excellente répartition géographique des expériences illustrées. Pour chacun des thèmes abordés, des interventions significatives sont venues, tant des pays les plus développés, que des pays les plus défavorisés. On a pu constater, de part et d'autre, une bonne disponibilité des moyens techniques et, dans la plupart des cas, une bonne maîtrise des méthodologies mises en œuvre. Certes, la diffusion des outils de traitement d'image et de cartographie numérique se trouve favorisée par la banalisation de la micro-informatique. Il n'en reste pas moins que le succès de l'introduction de techniques et méthodes sophistiquées auprès d'un aussi grand nombre d'équipes, revient pour une bonne part à l'action du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF, qui a toujours œuvré pour un transfert des technologies dans un constant souci de collaboration. La chose s'est encore confirmée à l'occasion de ces journées, où les communications présentées par des équipes mixtes, incorporant des laboratoires du Nord et du Sud, étaient nombreuses et d'une grande valeur scientifique.

Une chose en amenant une autre, on ne peut pas s'empêcher de souligner, sinon une contradiction, au moins une certaine dissension entre les approches de la télédétection urbaine au Nord et au Sud. Si les chercheurs utilisent le même matériel et les mêmes logiciels, il est clair qu'il existe des différences sur les concepts véhiculés, au Nord et au Sud, dans les analyses de l'espace urbain et périurbain. Est-on sûr que le chercheur, du Nord ou du Sud, imagine des réalités semblables lorsqu'il s'attache à étudier la ville ou le quartier, ou qu'il utilise les notions de logement ou de ménage ? Les villes, les administrations, les chercheurs du Sud, peuvent-ils envisager les moyens adéquats requis pour la mise en œuvre d'une opération de planification urbaine ? *A contrario*, les agences publiques, les consultants et les chercheurs du Nord, savent-ils encore ce que signifie les notions de dynamique et de croissance urbaines ? Existe-t-il une philosophie de l'urbanisme propre aux pays du Nord, et une autre, propre aux pays du Sud ? Ces questions sont largement débattues par les urbanistes et les aménageurs œuvrant dans le cadre de la coopération au développement. Il ne faudrait pas qu'aveuglés par la magie de l'outil, informatique et satellitaire, les utilisateurs de la télédétection du Nord et du Sud ignorent ce débat.

4. En guise d'évaluation finale

Le participant à ces journées et le lecteur attentif de ces actes se seront rapidement forgé une opinion sur le potentiel de la télédétection urbaine. Point de rencontre privilégié de technologies de pointe, de sciences pures et de sciences humaines, la télédétection urbaine force le dialogue, élargit et enrichit le débat. La diversité et la signification des sujets évoqués dans ces actes le démontrent indubitablement. Cela suffit amplement à justifier l'organisation de ces journées, mais, aussi, cela invite les membres du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF à rester attentifs à l'évolution de cette discipline. C'est que tout n'a pas été dit, loin de là. Les nombreux points d'interrogation émaillant ce bref rapport de conclusion, laissent pendantes au moins deux questions, relevant de considérations distinctes.

D'une part, on s'est étonné de l'absence aux journées de Liège de thèmes de recherches actuellement débattus par la communauté scientifique internationale. Comment faut-il traduire un telle absence ? De tels sujets de pointe sont-ils ignorés par la communauté francophone ? Il suffit de relever la nationalité des auteurs, publiant en langue anglaise, pour se convaincre du contraire. Les chercheurs francophones qualifiés pour débattre de ces thèmes sont-ils étrangers au Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF ? On prétend que tous ont reçu l'information et qu'ils ont eu ainsi l'opportunité de participer aux journées scientifiques. Alors, il reste à convaincre une plus grande partie de la communauté scientifique de l'intérêt de diffuser l'information en langue française. Cela ne concerne pas tant les chercheurs eux-mêmes, que les comités, les fonds et autres autorités qui fixent les critères de qualité des curriculums scientifiques.

D'autre part, on s'est interrogé sur les différences de concepts couverts par les termes de villes, agglomérations, urbanisation, etc., entre le Nord et le Sud. Il est clair, qu'au-delà de la différence de concepts, il existe une différence d'enjeux considérables. Dès lors, ne faut-il pas envisager une approche de la télédétection urbaine distincte au Nord et au Sud ? Ne faut-il pas développer des méthodes d'analyse spécifiques ? La notion de transfert de technologies doit dépasser la fourniture de matériel et de logiciels et l'apprentissage de méthodologies de portée géographique restreinte. Cette perplexité interpelle toutes les formes de coopération entre le Nord et le Sud, et tout particulièrement les programmes de recherche communs élaborés par le Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF.

Que l'on ne s'y trompe pas. Ces doutes ou ces remises en question sont à mettre à l'actif des Sixièmes Journées scientifiques du Réseau. Ainsi, outre le fait d'avoir largement rassemblé, pour la première fois, les spécialistes francophones de la télédétection urbaine et d'avoir assuré la diffusion de leurs connaissances, ces journées pourront-elles, peut-être, contribuer à l'amélioration de l'efficacité du Réseau et des échanges qu'il favorise.

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.

Un des problèmes des plus cruciaux des pays développés autant que des pays en développement est la gestion des milieux urbains et périurbains. Dans ce cadre, les données de télédétection représentent une source d'information importante. Les *Sixièmes journées scientifiques du « Réseau Télédétection »* de l'AUPELF-UREF ont permis de faire le point sur la télédétection des milieux urbains et périurbains. Techniques spéciales de télédétection urbaine, télédétection et urbanisme, statistiques urbaines, cartographie urbaine et actions de recherche partagée … soit cinq rubriques et trente-cinq textes produits par d'éminents auteurs de disciplines et d'origines géographiques très différentes. Une somme indispensable pour les étudiants comme pour les chercheurs.

Prix : 50 $ CAN • Prix préférenciel UREF : 25 $ CAN

9 782920 021747 ISBN 2-920021-74-5