

## **PARTIE I**

# **Téledétection des milieux urbains et périurbains**



# 1

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

JEAN-PAUL DONNAY<sup>1</sup>, CLAUDE COLLET<sup>2</sup> et CHRISTIANE WEBER<sup>3</sup>

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

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

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

### **Résumé**

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

## 1. Émergence de la télédétection urbaine

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

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

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

## **2. Phase des recherches méthodologiques**

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

### **2.1. Analyses multisources**

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

### **2.2. Adaptation des procédures de classification automatique**

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

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

### 2.3. Modélisation et analyse spatiale

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

## 3. Caractère opérationnel de la télédétection urbaine

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

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

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

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

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

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

#### **4. Nouveaux capteurs**

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

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

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

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

## 5. Conclusion

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

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

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

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

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

## 6. Références

- ANDERSON, L.L., HARDY, E.E., ROACH, J.T. and WITMER, R.E. 1976. A Land Use and Land Cover Classification System for use with Remote Sensor Data. US Geological Survey Professional Paper, n° 964.
- APLIN, P., ATKINSON, P.M. and CURRAN, P.J. 1997. Fine spatial resolution satellite sensors for the next decade. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, n° 18, p. 3873-3882.
- BANNARI, A., MORIN, D. et HE, D.-C. 1997. Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide d'indices de végétation dérivés à partir de données de hautes résolutions spatiale et spectrale. *In* DUBOIS J.-M., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (éd.) *Télédétection des milieux urbains et périurbains*. Éditions AUPELF, Montréal, p. 47-64.
- BARNESLEY, M.J. and BARR, S.L. 1996. Inferring Urban Land Use from Satellite Sensor Images Using Kernel-Based Spatial Reclassification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 62, n° 8, p. 949-958.
- BAUDOT, Y. 1997. L'influence de la résolution effective des données télédéteçtées sur les possibilités d'analyse des milieux urbains complexes. *In* DUBOIS J.-M., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (éd.) *Télédétection des milieux urbains et périurbains*. Éditions AUPELF, Montréal, p. 3-13.

- BILLEN, R., CORNÉLIS, B., SHEEREN, D., DONNAY, J.-P. et PANTAZIS, D. 2000. Influence de la précision absolue des points d'amer sur la qualité de la géoréférenciation des images à très haute résolution. *In* DUBOIS, J.-M., CALOZ, R. et GAGNON, P. (réd.) *La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives*. Éditions Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, p. 15-22.
- BINARD, M., JAMAGNE, P. et MULLER, F. 2000. Utilisation des données satellitaires pour l'actualisation décennale du découpage en secteurs statistiques du territoire de la Belgique. *In* DUBOIS, J.-M., CALOZ, R. et GAGNON, P. (réd.) *La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives*. Éditions Agence universitaire de la Francophonie, p. 23-31.
- CANTAT, O. 1987, Télédétection spatiale et microclimats : le cas de la région Île-de-France. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France, Paris, 190 p.
- CLARCK, J. 1980. The Effect of Resolution in Simulated Satellite Imagery on Spectral Characteristics and Computer Assisted Land Use Classification. Rapport du Jet Propulsion Laboratory, p. 75-22.
- COLLET, C. 1999. Vers un système d'assistance à l'interprétation d'images numériques de télédétection (IIAO). Colloque international télédétection et géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux, 67<sup>e</sup> Congrès de l'ACFAS, Ottawa, 10-12 mai 1999.
- COLLET, C. et ABEDNEGO, B. 1987. L'évolution du paysage urbain étudiée à l'aide d'un indice de végétation. *In* DONNAY J.-P. (réd.) *Télédétection satellitaire et espaces urbains*. Notes de recherches de la Société Géographique de Liège, n° 9, p. 3-16.
- COLLET, C., DONNAY, J.-P. et WEBER, C. 2000. Démarches de reconnaissance des formes urbaines et transfert méthodologique Nord - Sud (Europe - Afrique). *In* DUBOIS, J.-M., CALOZ, R. et GAGNON, P. (réd.) *La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives*. Éditions Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, p. 41-48.
- COLLETTE, B., NADASDI, I. et DONNAY, J.-P. 1991. Essai de discrimination du tissu urbain par segmentation d'image. *Mappemonde*, n° 4, p. 31-35.
- COLVOCORESSES, A. 1985. Mapping of Washington D.C. and Vicinity with the Landsat 4 T.M. *EARSel News*, août 1985, p. 43-46.
- COLWELL, R.N. and POULTON, C.E. 1984. SPOT simulation imagery for urban monitoring - A comparison with Landsat TM and MSS imagery and with high altitude color infrared photography. *SPOT simulation applications handbook - Proceedings of the 1984 SPOT Symposium*, Scottsdale (Arizona), SPOT Image Corporation, Washington, p. 139-147.
- CORNÉLIS, B., BINARD, M. et NADASDI, I. 1998. Potentiels urbains et îlots de chaleur. *Publications de l'Association internationale de climatologie*, vol. 10, p. 223-229
- COULOIGNER, I. 1998. Reconnaissance des formes dans des images de télédétection en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, p. 98 + annexes.
- COULOMBER, A., CHARBONNEAU, L., BROCHU, R., MORIN, D. et RHEAULT, M. 1989. Révision cartographique et analyse de texture : essais méthodologiques sur la frange urbaine. *In* BERNIER R., BONN F. et GAGNON P. (réd.) *Télédétection et Gestion des Ressources*, vol. 6, L'association québécoise de télédétection, p. 103-113.
- DE BÉTHUNE, S., MULLER, F. and BINARD, M. 1998. Adaptive intensity matching filters : a new tool for multi-resolution, data fusion. *AGARD Conference Proceedings 595, Multi-Sensor Systems and Data Fusion for Telecommunications, Remote Sensing and Radar*, Lisbon (Portugal), 29 September - 2 October 1997, p. 28-1-28-15
- DONNAY, J.-P. 1992. Applications de la télédétection satellitaire à l'aménagement du territoire et à l'urbanisme. *In* Centre National d'Études Spatiales (réd.) *Télédétection spatiale*. Cépaduès-Éditions, Toulouse, p. 221-241.

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

- DUBOIS, J.-M., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.) 1997. Télédétection des milieux urbains et périurbains. Collection Universités francophones - Actualités scientifiques, éditions AUPELF-UREF, Montréal, 361 p.
- DUREAU, F. 1995. Images satellite et démographie : Présentation d'une nouvelle méthode de production d'information sur les populations citadines. *In* DUREAU, F. et WEBER, C. (réd.) Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Paris, p. 271-284.
- DUREAU, F., BARBARY, O., MICHEL, A. et LORTIC, B. 1989. Sondages aréolaires sur image satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain. Manuel de formation, Éditions de l'ORSTOM, Paris.
- DUREAU, F. et WEBER, C. (réd.) 1995. Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Paris, 379 p.
- EUROSTAT, 1995. Projet pilote – Délimitation des agglomérations européennes par télédétection. Résultats et conclusions. EUROSTAT : Document statistique, Office des publications officielles des Communautés européennes, Thème 3, Série D, Luxembourg.
- FANOUILLET, J.-C. 1994. Essai d'utilisation de la télédétection pour la délimitation des unités urbaines. Série des documents de travail de la Direction des Statistiques Démographiques et Sociales, F9407, INSEE, Paris, 56 p. + annexes.
- FORSTER, B.C. 1983. Some urban measurements from Landsat data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 49, n° 12, p. 1693-1707.
- FORSTER, B.C., SMITH, C., FARRINGTON, R. and JONES, C. 1988. Mapping and urban multi-experimental. Assessment of SPOT - Urban results. *In* Centre National d'Études Spatiales (réd.) SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Cépaduès-Éditions, Toulouse, p. 669-674.
- GAF, 1993. Satellitenbildkarte 1:25 000, 7835 München. Angewandte Fernerkundung mbH, Munich.
- GALAUP, M. 1997. User workshops to define the requirements of town/city local government departments. The European Community Joint Research Centre, Space Applications Institute, document HDB/97504sg. CEO RGC9D, 2 volumes.
- GAMBA, A. et POITEVIN, J. 1990. La télédétection satellitaire au service d'un observatoire urbain de l'aire métropolitaine de Buenos Aires. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France, Paris, 15 p. + annexes.
- GARRY, G. (réd.) 1992. Environnement et aménagement - 3. L'usage des photographies aériennes. Les éditions du STU, Paris, 154 p.
- GILG, J.-P. et BILDGEN, P. 1994. Analyse et étude de la thermicité de la région parisienne à travers l'imagerie Landsat. Ministère de l'Environnement, Paris.
- GUPTILL, S.C. and MORRISON, J.L. (réd.) 1995. Elements of spatial data quality. Publié au nom de l'Association Cartographique Internationale. Elsevier Sciences, Oxford, 202 p.
- HARRIS, P.M. and VENTURA, S.J. 1995. The Integration of Geographic Data with Remotely Sensed Imagery to Improve Classification in an Urban Area. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n° 8, p. 993-998.
- HE, H. and COLLET, C., 1999. Combining spectral and textural features for multispectral image classification with artificial neural networks. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, Part 7-4-3 W6.
- HE, H., COLLET, C. and SPICHER, M., 1999. Evaluation and Comparison of two Fuzzy Classifiers for Multi-Spectral Imagery Analysis. IGARSS'99, Hambourg.
- JENSEN, J.R. (réd.) 1983. Urban/Suburban Land Use Analysis. *In* ESTES, J.E. and THORLEY, G.A. (réd.) *Manual of Remote Sensing*, vol. 2. American Society of Photogrammetry, Falls Church, p. 1571-1666.

- JENSEN, J.R. and COWEN, D.C. 1999. Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 65, n° 5, p. 611-622.
- KACZYNSKI, R., DONNAY, J-P. and MULLER, F. 1995. Satellite image maps of Warsaw in the scale 1:25,000. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, vol. 4, n° 2, p.100-103 + 1 pl. h.t.
- LANGFORD, M. and UNWIN, D.J. 1994. Generating and mapping population density surfaces with a geographical information system. *The Cartographic Journal*, vol. 31, p. 21-26.
- LENCO, M. 1997. Étude par télédétection des écosystèmes urbains des grands agglomérations françaises à l'échelle du 1 : 25 000. *In* DUBOIS, J.-M. ., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.) *Télédétection des milieux urbains et périurbains*. Éditions AUPEF-UREF, Montréal, p. 191-206.
- LE TOURNEAU, F. M. 1999, Utilisation d'une séquence d'images ERS et d'une méthode d'extraction automatique des zones urbaines pour le suivi de la croissance de la ville de MCAPA (Amapa , Brésil). *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection* (sous presse).
- LO, C.P., QUATTROCHI, D.A. and LUVALL, J.C. 1997. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, n° 2, p. 287-304.
- MALAN, O.G., ERASMUS, P.F. and FOURIE, C. 1988. Comparison of SPOT, Landsat TM and combined data for urban studies. *In* Centre National d'Études Spatiales (réd.) *SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats*. Cépaduès-Éditions, Toulouse, p. 681-687.
- MILAZO, V.A. and DEANGELIS, R.H. 1984. Applications of simulated SPOT data to mapping land cover patterns and changes in an urban fringe environment. *SPOT simulation applications handbook. Proceedings of the 1984 SPOT Symposium, Scottsdale (Arizona), SPOT Image Corporation, Washington*, p. 177-186.
- MISHRA, J.K., PERMANA, D.S., NAKAJIMA, T., YUASA, T. and AKATSUKA, T. 1999. Remotely Sensed Data based Information System : Considerations for Unvertainty, Errors and Limitations. *In* SHI, W., GOODCHILD, M.F. and FISHER, P.F. (réd.) *Proceedings of The International Symposium on Spatial Data Quality '99, Hong Kong, 1999*. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, p. 605-615.
- NADASDI, I. (1995). Inventaires biophysiques de l'occupation du sol et pratique des plans d'organisation du territoire : expériences de l'Euregion Meuse-Rhin, de la Wallonie et du Grand-Duché de Luxembourg. *Jornadas tecnicas sobre sistemas de informcion geografica y teledeteccion espacial a la ordenacion del territorio y el medio ambiente, Vitoria-Gasteiz, 21-24 November 1994*, p. 171-198.
- NASCIMENTO, I. 1992. Rio de Janeiro. L'imagerie satellitaire, un outil prospectif pour l'aménagement urbain et rural. *Rapport de synthèse 1989-1992*. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France, Paris, 70 p. + annexes.
- NICHOL, J.E. 1988. Visualisation of urban surface temperatures derived form satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n° 9, p. 1639-1650.
- OEEPE, 1996. Survey on 3D-City Models. Organisation Européenne d'Études Photogrammétriques Expérimentales (OEEPE) and Institute of Photogrammetry of the University of Bonn, <http://www.ipb.uni-bonn.de/OEEPE/oeepe.html>, consultation le 10 août 1999.
- OLIVA, P. et HUSSON, P. 1982. Classification supervisée des ensembles urbains et péri-urbains de la région d'Aix-en-Provence. *Aspects méthodologiques. Journées de télédétection en milieu urbain, 6-7 mai 1982, C.N.R.S.*, p. 28-42.

- POHL, C. and VAN GENDEREN, L. 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n° 5, p. 823-854.
- POLI, U., PIGNATARO, F., ROCCHI, V. and BRACCO, L. (1994) Study of the heat island over the city of Rome from Landsat-TM satellite in relation with urban pollution. *In* VAUGHAN R. (réd.) *Remote sensing from research to operational applications in the new Europe. Proceedings of the 13<sup>th</sup> EARSeL Symposium, Dundee, 28 June-1 July 1993*, p. 413-42
- QUARMBY, N.A., TOWNSHEND, J.R.G. and CUSHNIE, J.L. 1988. Monitoring urban land cover changes at the urban fringe from SPOT HRV imagery in South-East England. *Centre National d'Études Spatiales (réd.) SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Cépaduès-Éditions, Toulouse*, p. 575-582.
- RICHMAN, A. 1999. Urban Releaf. CEO Product Development and Marketing projects. <http://ewse.ceo.org/anonymous/vfs.pl?id=889117&name=summary.PDF>, consultation le 10 août 1999.
- RIDLEY, H.M., ATKINSON, P.M., APLIN, P., MULLER, J.-P. and DOWMAN, I. 1997. Evaluating the potential of the forthcoming commercial U.S. high-resolution satellite sensor imagery at the Ordnance Survey, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 63, n° 8, p. 997-1005.
- RIMBERT, S. 1973. Les paysages urbains. *Collection Uprisme, Armand Colin, Paris*, 240 p.
- RIMBERT, S. 1984. Des néo-variables polygéniques au secours d'une image hivernale, *L'espace géographique*, n° 3, p. 185-200 et 299-300.
- TERRETTAZ, P. 1998. Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitaires SPOT HRV. Application aux villes de Genève, Strasbourg et Liège. Thèse de doctorat, Université de Fribourg (Suisse), 304 p.
- THIBAUT, C. et GUILLARD, H. 1986. Mesurer la végétation urbaine par télédétection. Du satellite au terrain. *Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France, Paris*, 82 p.
- WALD, L., RANCHIN, T. and MANGOLINI, M. 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions : assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 63, n° 6, p. 691-699.
- WEBER, C. 1995. Images satellitaires et milieu urbain. *Collection Géomatique, Hermès, Paris*, 185 p.
- WEBER, C., 1998, Des indicateurs "objectifs" de la qualité de vie : espaces verts et télédétection . *In* REYMOND H., CAUVIN C. et KLEINSCHMAGER (réd.) *L'espace des villes. Pour une synergie multistratè. Anthropos, Collection Villes, Paris*, p. 393-414.
- WEBER, C. et HIRSCH, J. 1989. Intégration des données multisources : les problèmes de désagrégation et agrégation de données dans une approche de système d'information géographique. *Fiabilité et utilisation optimum des informations. Communication au colloque SIGEO : Les systèmes d'information géographique, Rouen*, 10 p.
- WEBER, C., HIRSCH, J. et SERRADJ, A. 1990. Classification pixels et classification par zones : tests sur image SPOT en milieu urbain. *Communication aux 2<sup>es</sup> journées Télédétection de Bondy, ORSTOM : Caractérisation et suivi d'espaces urbains*, 6 p.
- WELCH, R. 1982. Spatial resolution requirements for urban studies. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 3, n° 2, p. 139-146.
- WILMET, J. 1987. Contribution de la télédétection à l'analyse de l'environnement des grandes villes africaines. *In* *Recherches de géographie urbaine - Mélanges offerts à J.A. SPORCK. Presses Universitaires et Société Géographique de Liège, Liège*, p. 712-719.
- ZANG, J. and FOODY, G.M. 1998. A fuzzy classification of sub-urban land cover from remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n° 14, p. 2721-2238.



## 2

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

ROLAND BILLEN<sup>1 2</sup>, BERNARD CORNÉLIS<sup>1</sup>, DAVID SHEEREN<sup>1</sup>,  
JEAN-PAUL DONNAY<sup>1</sup> et DIMOS PANTAZIS<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> *Aspirant au Fond National de la Recherche Scientifique (FNRS); courriel : roland.billen@ulg.ac.be*

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

### **Résumé**

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

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

## 1. Introduction

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

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

## 2. Points d'amer

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

## **2.1. Cartes de l'Institut géographique national belge**

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

### **2.1.1. Carte 1 : 25 000**

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

### **2.1.2. Carte 1 : 10 000 numérisée**

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

## **2.2. Levé au GPS**

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

## **2.3. Base de données topographiques**

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

### **3. Test 1**

#### **3.1. Matériel**

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

#### **3.2. Méthode**

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

#### **3.3. Résultat**

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

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

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

### 3.4. Discussion

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

## 4. Test 2

### 4.1. Matériel

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

## 4.2. Méthode

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

## 4.3. Résultat

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

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

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

## 4.4. Discussion

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

## 5. Conclusion

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

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

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

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

## **6. Références**

- BILLEN, R et CORNÉLIS, B. 2000. Corrections géométriques. *in* J-P. DONNAY (éd.). Spatiocartographie. Société géographique de Liège, 30 p.
- BOTTON, S., DUQUENNE, F., EGELS, Y., EVEN, M. et WILIS, P. 1997. GPS localisation et navigation. Hermès, Paris, 159 p.
- COMMISSION DE COORDINATION NATIONALE POUR LA BANQUE DE DONNÉES TOPOGRAPHIQUES, 1990. Normes de qualité, Commission de coordination nationale, 111 p.
- CORNÉLIS, B. and PATTYN, F. 1997. Geocoding SPOT image coverage of Belgium : evaluation and optimization of rectification procedures. Étude de faisabilité, SURFACES, Université de Liège et Geografisch Instituut, Vrije Universiteit Brussel, 52 p.
- KARDOULAS, N., BIRD, A. and LAWAN, A. 1996. Geometric correction of SPOT and Landsat imagery : a comparaison of map- and GPS-derived control points. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 62, n°10, p. 1173-1177.
- KRAUSS, K. 1997. *Photogrammetry, advanced methods and applications*. Volume 2. Dümmlers Verlag, Bonn, 446 p.
- MACGWIRE, K. 1996. Cross-validated assessment of geometric accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 62, n°10, p. 1179-1187.

- RÉGIE DES TÉLÉGRAPHES ET DES TÉLÉPHONES DE BELGIQUE, 1990. Cahier des charges type (RN 13), confection de plans de routes digitaux par aérophotogrammétrie, levées terrestres, ou digitalisation de plans existants. 21 p.
- RIDLEY, H., ATKINSON, P., ALPIN, P., MULLER, J-P. and DOWMAN, I. 1997. Evaluating the potential of the forthcoming commercial U.S. high-resolution satellite sensor imagery at the ordnance survey(r). . Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 63, n° 8, p. 997-1005.
- RONGXING, L. 1998. Potential of high-Resolution satellite imagery for national mapping products. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 64, n°12, p. 1165-1169.
- TOUTIN, T. 1995. Intégration de données multisources : comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. International Journal of Remote Sensing, Vol. 16, n°15, p. 2795-2811.
- TOUTIN, T. 1996. La correction géométrique rigoureuse : un mal nécessaire pour la santé de vos résultats. Journal canadien de télédétection. vol. 22, n° 2, p. 184-189.
- WILMET, J. 1996. Télédétection aérospatiale, méthodes et applications. SIDES, Fontenay-sous-Bois, 300 p.

## 3

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

MARC BINARD <sup>1</sup>, PIERRE JAMAGNE <sup>2</sup> et FABRICE MULLER <sup>1</sup>

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

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

### Résumé

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

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

## **1. Introduction**

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

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

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

## **2. Matériel de base**

Ont servi de base à ce projet :

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

## **3. Méthodologie**

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

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

### **3.1. Sélection des images et détermination des zones de travail**

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

#### **3.1.1. Importation et positionnement des images**

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

#### **3.1.2. Évaluation de la qualité des images**

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



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

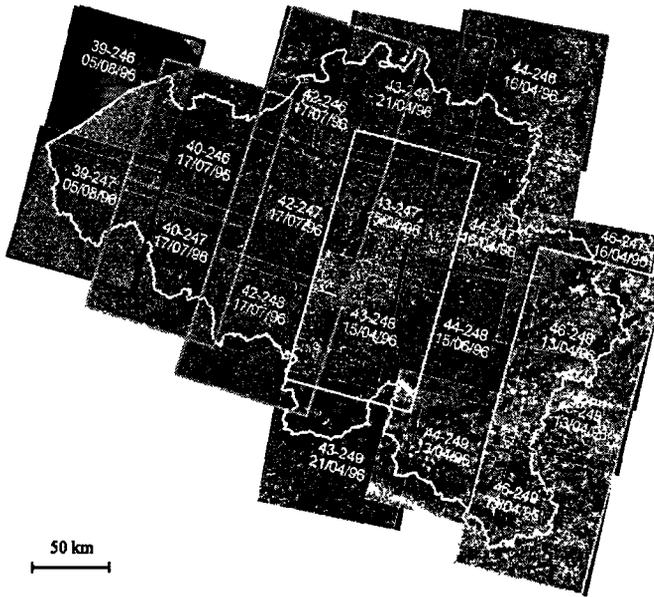


Figure 2. Disposition des scènes HRV (P) de SPOT sur le territoire belge

### 3.1.3. Regroupement des images

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

## 3.2. Corrections géométriques et fusion des images

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

### 3.2.1. Corrections géométriques

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

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

### **3.2.2. Fusion**

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

### **3.3. Détermination de la zone de travail**

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

### **3.4. Classification et détection des noyaux de bâti**

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

#### **3.4.1. Classification**

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

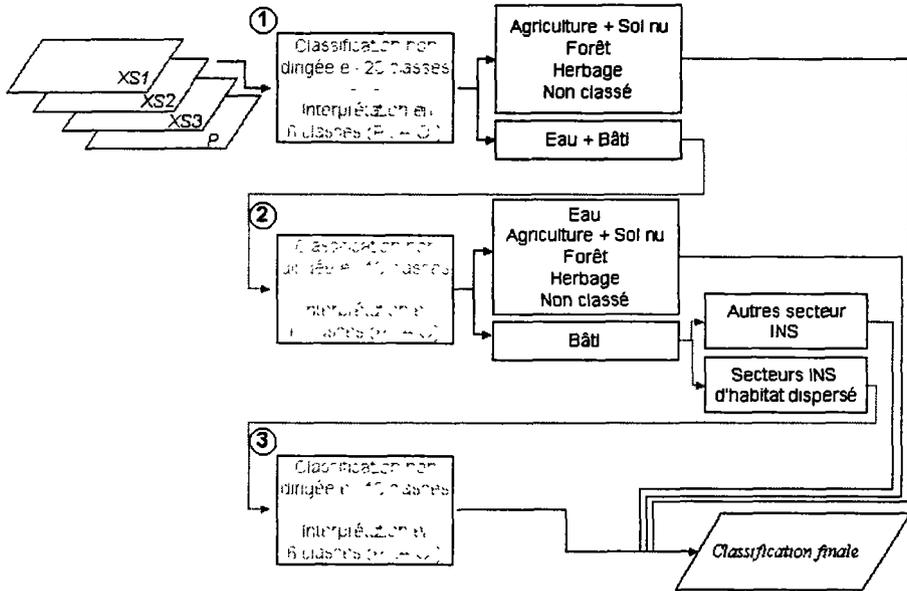


Figure 3. Organigramme de la procédure de classification

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

### 3.4.2. Détection des noyaux de bâti

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

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

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

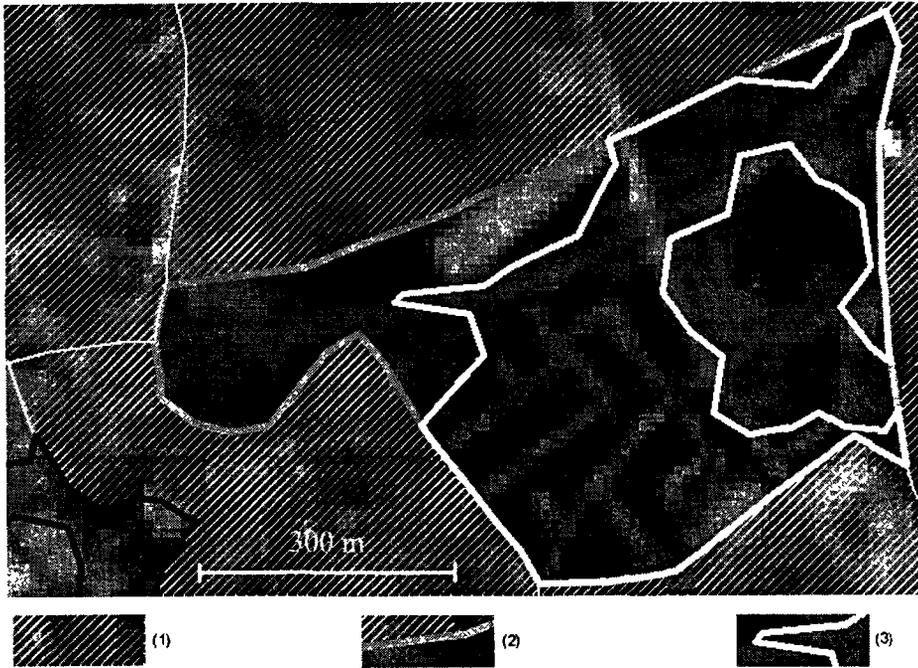


Figure 4. Détection d'un noyau du bâti sur le secteur « 52012B492 ». 1) Secteur bâti; 2) limite du secteur 52012B492; 3) limite du noyau.

### 3.5. Limite des agglomérations “morphologiques”

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

## 4. Résultats

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

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

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

## 5. Discussion et conclusion

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

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

## 6. Remerciements

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

## 7. Références

- BINARD, M. et COLLETTE, B. 1993. Traitement contextuel en post-classification pour l'élaboration d'une spatio-carte destinée à la gestion et à l'aménagement du territoire. *in* J.-M. Dubois, F. Cavayas et P. Lafrance (réd) *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*. Collection Universités francophones-Actualités scientifiques, Editions AUPELF-UREF et Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, p. 285-295.
- DE BÉTHUNE, S., DONNAY, J.P. et MULLER, F. 1998. Fusion d'images multirésolution par égalisation de moyennes et de variances locales: comparaison avec la fusion par la méthode des ondelettes. *in* J.-M. Dubois, M. Bernier, J.-P. Fortin et F. Boivin (réd) *La réalité de terrain en télédétection: pratiques et méthodes*, Collection Universités francophones-Actualités scientifiques, Editions AUPELF-UREF, Montréal, p. 119-126.

- DONNAY, J.-P. et LAMBINON, M. 1997 Détermination des limites d'agglomération par télédétection: discussion méthodologique et application au cas de Huy (Belgique). in J.-M. Dubois, J.-P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd) *Télédétection des milieux urbains et périurbains*, Collection Universités francophones-Actualités scientifiques, Editions AUPELF-UREF, Montréal, p. 239-246.
- EUROSTAT. 1992. Définition de l'agglomération dans la communauté européenne. Groupe de travail "Statistiques démographiques". Doc. E3/SD/11b/92. Eurostat, Luxembourg, 4 p.
- I.N.S. 1984. Subdivision des communes en secteur statistiques/quartiers en vue des recensements généraux de 1981. Étude statistique n°72, Institut National de Statistique, Bruxelles, p. 39-53.
- INTERGRAPH. 1997. *Image Analyst – User's Guide*. Huntsville, 372 p.
- LEMONNIER, H. 1997. *Apport de la précision spatiale des futures données SPOT5 dans le contexte du projet Eurostat sur la délimitation des agglomérations*, in EUROSTAT, *Télédétection, aménagement, environnement et statistiques urbaines*, Actes du séminaire de Lille, 24 et 25 juin 1996, EUROSTAT, thème O, Série D, Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg, 1997, 63-67.
- NADASDI, I. et BINARD, M.. 1997. *Images de haute résolution au service des statistiques et de l'aménagement urbains : une application sur l'agglomération arlonaise*, in EUROSTAT, *Télédétection, aménagement, environnement et statistiques urbaines*, Actes du séminaire de Lille, 24 et 25 juin 1996, EUROSTAT, thème O, Série D, Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg, 1997, 69-75.
- ZÉGUERS, D. 1998. *Actualisation des secteurs statistiques en vue du recensement 2001*. Mémoire de stage présenté au Ministère des Affaires Économiques - Institut National de Statistique, Bruxelles, 56 p.



## 4

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

AKILA CHELABI-KEMMOUCHE <sup>1</sup> et CATHERINE MERING <sup>2</sup>

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

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

### **Résumé**

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

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

## 1. Introduction

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

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

## 2. Principe de l'analyse granulométrique des images binaires

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

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

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

où

MesX est la mesure de Lebesgue dans  $R^2$  (i.e. la surface);

$X_{\lambda B}$  est l'ensemble X ouvert par l'élément structurant de taille  $\lambda$ .

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

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

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

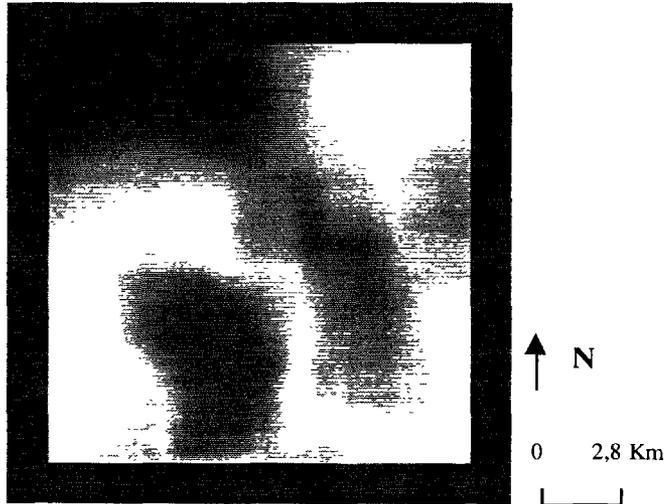
### **3. De la macrotecture à la carte de la densité**

#### **3.1. Principes de la cartographie de la macrotecture**

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

$$V_i(P) = g_i[F(P)]$$

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



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

### 3.2. Choix de la taille de la fenêtre

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

### 3.3. Classification des pixels

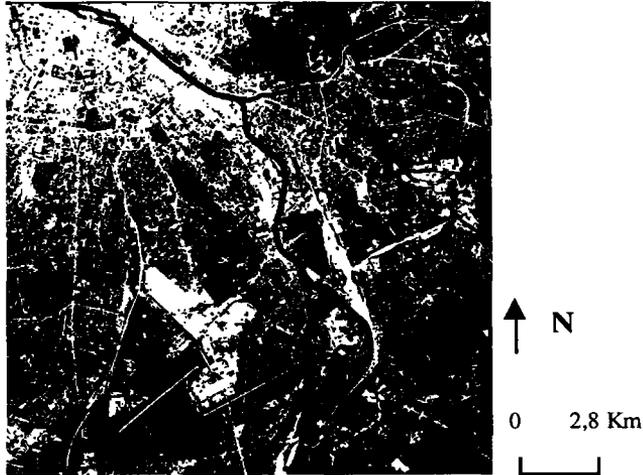
L'image résultant de la classification des images des densités granulométriques est une image à  $k$  couleurs,  $k$  étant le nombre de classes fixé par l'opérateur. Chacune des classes doit en effet être interprétée en terme de macrotexture. Par définition, une classe correspond à une catégorie de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

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

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

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

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



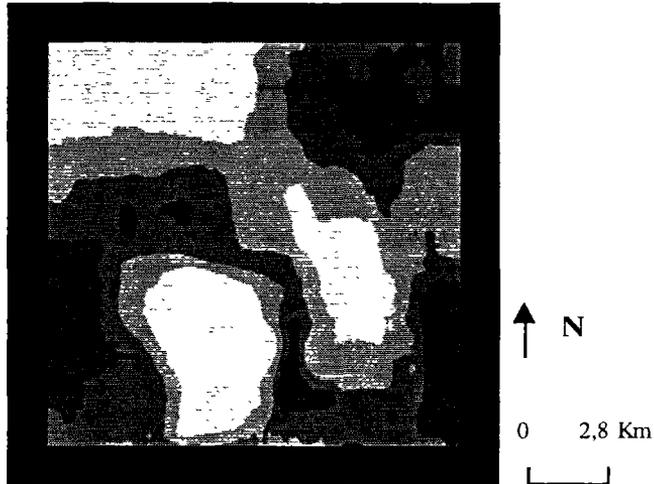
**Figure 2.** Image binaire du bâti de la région sud-est de Paris

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

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

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

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



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

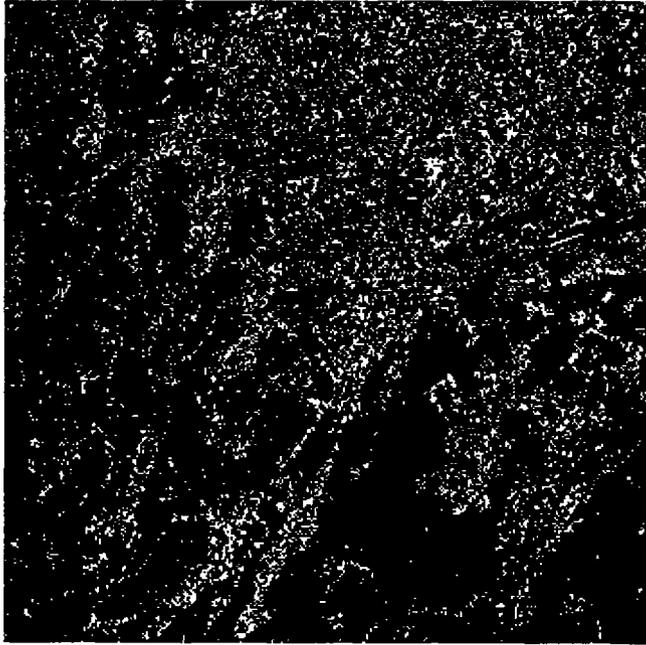
#### **4.2. Analyse d'une sous-scène HRV (XS) de SPOT de la ville de Tachkent**

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

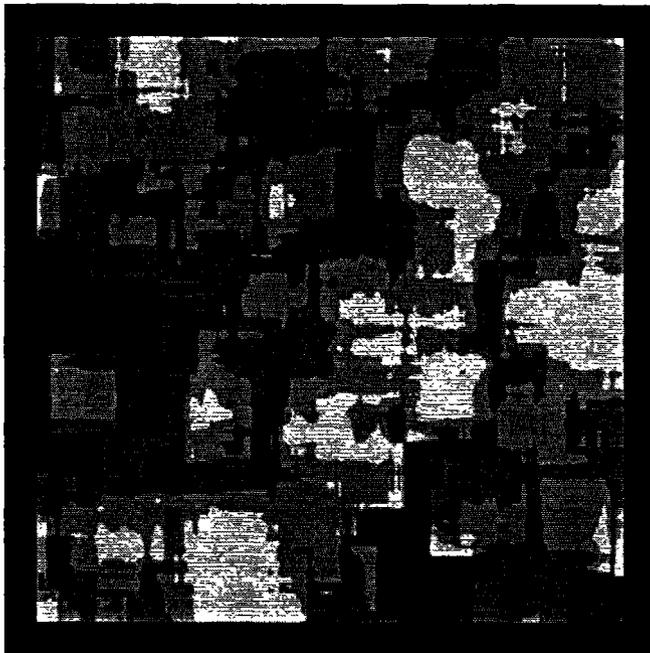
### **5. Conclusion**

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

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



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



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

## 6. Références

- COSTER, M. et CHERMANT, J.L. 1989. Précis d'analyse d'image. Éditions CNRS, Paris, 423 p.
- DUREAU, F. 1995. Images Satellites et démographie. Présentation d'une nouvelle méthode de production d'information sur les populations citadines. in F. Dureau et C. Weber. Télédétection et systèmes d'information urbain. Éditions collection Villes Anthropos, Paris, p. 271-284.
- MATHERON, G. 1967. Éléments pour une Théorie des milieux poreux. Éditions Masson, Paris, 170 p.
- MATHERON, G. 1975. Random Sets and Integral Geometry. John Wiley & Sons, New York.
- MERING, C., CALLOT, Y. and KEMMOUCHE, A. 1997. Analysis and Mapping of Natural landscapes from satellites images using Morphological Filters. Microscopic, Microanalysis, Microstructure, n° 7, p. 323-330.
- VOIRON, C. 1995. Analyse spatiale et analyse d'images. Éditions RECLUS, Montpellier.

# 5

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

CLAUDE COLLET<sup>1</sup>, JEAN-PAUL DONNAY<sup>2</sup> et CHRISTIANE WEBER<sup>3</sup>

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

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

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

### Résumé

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

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

## **1. Introduction**

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

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

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

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

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

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

esquissées.

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

## **2. Démarches méthodologiques élaborées**

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

### **2.1. Méthodes de rehaussement en IIAO**

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

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

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

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

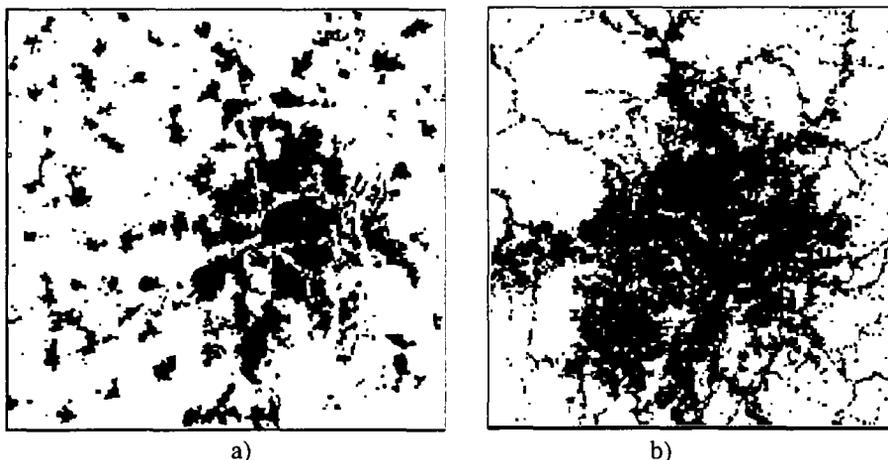
Cette transformation en indice de végétation a aussi été largement exploitée dans le cadre des autres démarches de délimitation et de segmentation de l'espace urbain.

## 2.2. Délimitation de l'espace urbain par approches numériques

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

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

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



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

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

### **2.3. Segmentation de l'espace urbain par approches numériques**

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

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

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

### 3. Conclusion

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

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

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

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

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

### 4. Remerciements

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

## **5. Références**

- ARMAND, M. 1995. Télédétection, urbanisme et aménagement. Les Cahiers pédagogiques du GDTA, Cahier A4, Toulouse, 150 p.
- ASSAKO ASSAKO, R.J. 1998. Yaoundé : essai de délimitation de l'enveloppe urbaine à partir d'une image HRV de SPOT. Rapport de stage AUPELF-UREF, Fribourg, 12 p.
- BANNARI, A., MORIN, D. et HE, D.-C. 1997. Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide d'indices de végétation dérivés à partir de données de hautes résolutions spatiale et spectrale. In DUBOIS, J.-M. *et al.* (réd.). Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éditions AUPELF-UREF, Montréal, p. 47-64.
- BINARD, M et NADASDI, I. 1997. Modélisation des données issues des traitements d'image satellitaire en vue de la réalisation d'un schéma de structure transfrontalier. Rapports scientifiques et techniques 10, SURFACES, Université de Liège, Belgique, 41 p.
- CHAVEZ, P.S., SIDES, S. and ANDERSON, J. 1991. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data : Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 57, n° 3, p. 295-303.
- COLLET, C. et ABEDNEGO, B. 1987. L'évolution du paysage urbain étudiée à l'aide d'un indice de végétation. DONNAY, J.-P. (réd.). Télédétection satellitaire et espaces urbains. Notes de Recherches de la Société Géographique de Liège, n° 9, p. 3-17.
- COLLET, C. 1999. Vers un système d'assistance à l'interprétation d'images numériques de télédétection (IIAO). Colloque International Télédétection et Géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux, 67<sup>ème</sup> Congrès de l'ACFAS, Ottawa, 10-12 mai 1999.
- DONNAY, J.-P. 1992. Applications de la télédétection satellitaire à l'aménagement du territoire et à l'urbanisme. In Télédétection spatiale. Cepaduès-Éditions, Toulouse, p. 221-241.
- DONNAY, J.-P., COLLET, C. et WEBER, C. 1999. La télédétection urbaine à l'aube de la très haute résolution spatiale. Programme et résumés des VIII<sup>es</sup> journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'IAUF, Lausanne, 22-25 novembre 1999, p. 34.
- DONNAY, J.-P. et LAMBINON, M. 1997. Détermination des limites d'agglomération par télédétection : discussion méthodologique et application au cas de Huy (Belgique). In DUBOIS, J.-M. *et al.* (réd.). Télédétection des milieux urbains et périurbains. Montréal, AUPELF-UREF, p. 239-246.
- GALLICE, C. 1999. Extraction d'informations en milieu périurbain par photo-interprétation assistée par ordinateur. Rapport de stage à l'Institut de géographie de l'Université de Fribourg, Université Jean Moulin, Lyon 3, 114 p.
- HE, H. et COLLET, C. 1999. Combining spectral and textural features for multispectral image classification with artificial neural networks. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June 1999.
- MOUAFU, D. 1999. Intégration d'images de télédétection et de données multisources dans un SIG en vue de la cartographie urbaine et du suivi de l'urbanisation à Douala au Cameroun. Rapport de stage AUPELF-UREF, Fribourg, 47 p.
- RAKOTONIAINA, S. 1999. Analyse multirésolution par ondelettes en traitement du signal. Exemples d'application en télédétection et en géophysique. Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, 132 p.
- RAKOTONIAINA, S. et COLLET, C. 1997. Élaboration d'un outil mathématique : la transformée en ondelettes pour l'exploitation des données de télédétection. Applications dans les Sciences de la terre. Rapport de stage doctoral en télédétection AUPELF-UREF, Fribourg, 53 p.

- TERRETTAZ, P. 1998. Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitaires SPOT HRV. Thèse de Doctorat, Université de Fribourg Suisse, 304 p.
- THIAM, S. 1998. Délimitation et segmentation urbaine à partir de la télédétection satellitaire : Application à la ville de Dakar (Sénégal). Rapport de stage AUPELF-UREF, Rapports scientifiques et techniques 15, SURFACES, Université de Liège, Belgique, 41 p.
- WEBER, C. 1995. Télédétection des milieux urbains et péri-urbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. Rapport d'activité (1<sup>ère</sup> année), Action de recherche partagée de l'AUPELF-UREF. X/1.20.04/01/94.18.0., 55 p.
- WEBER, C. 1997. Télédétection des milieux urbains et péri-urbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. Rapport d'activité (2<sup>ème</sup> année), Action de recherche partagée de l'AUPELF-UREF. X/1.20.04/01/96.18.0., 33 p.
- WEBER, C. 1998. Télédétection des milieux urbains et péri-urbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. Rapport final, Action de recherche partagée de l'AUPELF-UREF. X/1.10.04/01/97.18.0., 20 p.
- WEBER, C., DONNAY, J.-P. et COLLET, C. 1997. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. In DUBOIS, J.-M. *et al.* (éd.). Télédétection des milieux urbains et périurbains. Montréal, AUPELF-UREF, p. 133-144.
- WEBER, C. et HIRSCH, J. 1997. Processus de croissance et limites urbaines. Photo-Interprétation n°. 97-1-2, p. 21-33.
- ZHOU, J., CIVCO, D.L. and SILANDER, J.A. 1998. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT Panchromatic data. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 4, p. 743-757.

## 6

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

BALLA DIARRA<sup>1</sup> et JACQUES CHAMPAUD<sup>2</sup>

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

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

### **Résumé**

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

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

## **1. Introduction**

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

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

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

### 1.1. Présentation de Bamako

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

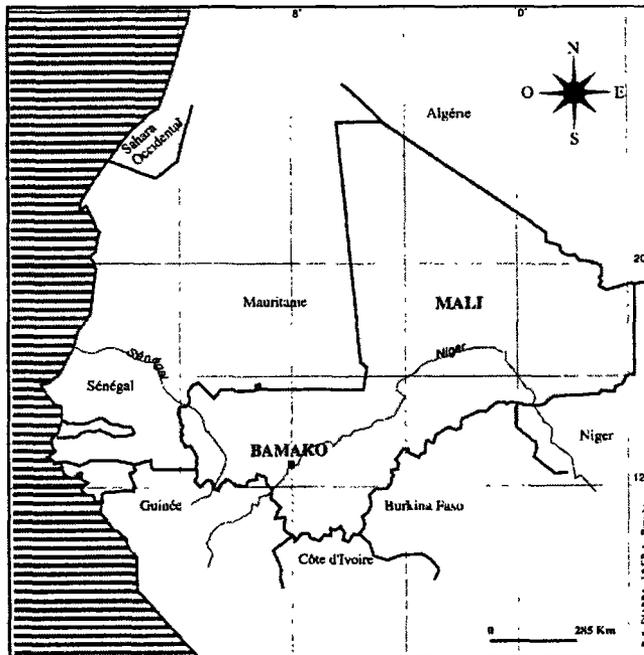


Figure 1. Localisation de Bamako au Mali et en Afrique de l'Ouest

## **1.2. Présentation des villages**

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

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

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

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

## **2. Méthodologie**

### **2.1. Documents cartographiques utilisés**

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

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

**Tableau 1.** Cartes de Bamako de 1918 à 1996

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

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

- les cartes topographiques de 1918, 1948, 1960, 1974; si ces cartes ont permis un suivi lointain de l'espace bamakois, leur traitement n'a pas été très facile à cause de défauts dont nous parlerons plus bas;

- deux couples d'images HRV, pris en novembre 1986 et avril 1996; ces mois correspondent à deux saisons différentes à Bamako (fin de la saison des pluies et fin de la saison sèche). Cette différence de saisons a parfois rendu l'interprétation de l'emprise urbaine délicate. Les deux couples sont du même KJ : 40-325 (il existe pour les satellites à défilement une grille de référence qui indique pour toute région du globe couverte la position nominale des scènes en numéro de colonne K et de ligne J).

## 2.2. Traitements appliqués

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

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

$$(2 * X_{si} * P_w) / (X_{S1} + X_{S2})$$

où  $P_w = P$  ayant subi le filtre de Wallis.

La création des PXS<sub>i</sub> avait pour but de profiter pleinement de la grande résolution du panchromatique tout en conservant l'apport thématique spécifique des canaux XS. Les deux P+XS ont été créées en mettant le PXS<sub>3</sub> dans le rouge, le P<sub>w</sub> dans le vert et le PXS<sub>1</sub> dans le bleu. Avant de les imprimer, les compositions colorées ont été intégrées dans un logiciel de SIG (Savane 7.0, logiciel de l'Institut de Recherche pour le Développement) afin de leur donner une référence cartographique et une grande échelle (ici le 1 : 25 000). Les limites des taches urbaines ont été interprétées sur calque, numérisées puis récupérées dans le SIG. L'étape de l'interprétation n'est pas toujours facile, le tracé de limite étant un choix parfois difficile. Dans les zones d'extension spontanées par exemple, des maisonnettes généralement construites pour marquer l'appartenance des parcelles, existent çà et là et sont parfois très éloignées les unes des autres. La nature du problème n'est pas très différente dans les nouveaux lotissements. Le choix du tracé de la limite devient encore plus difficile quand deux fronts d'extension se font face. Dans ce cas, en effet, il faut s'assurer

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

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

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

### **3. Résultats**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### 4. Conclusion

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

résultats de l'interprétation.

## **5. Références**

- ASSAKO ASSAKO, R-J. 1995. Contribution à la création d'un observatoire urbain utilisant la télédétection et les données géoréférencées à Yaoundé (Cameroun). Thèse de doctorat. Université de Paris X - Nanterre, 321 p.
- BLENAU, D. et La COGNATTA, G. 1972. Évolution de la population de Bamako. Études maliennes n° 3, p. 26-41.
- CHEREL, J.-P. 1993. Maîtriser l'aménagement urbain en Afrique sub-saharienne : l'intérêt des images-satellites SPOT. Exemples de Nairobi (Kenya) et Ouagadougou (Burkina Faso). Thèse de doctorat, Université Paul Valéry, Montpellier, 354 p.
- COULIBALY, L. (1974). La spéculation foncière à Bamako. Mémoire de l'Ecole Nationale d'Administration, Bamako, 65 p.
- DIARRA, B. 1999. Dynamique spatiale et politiques urbaines à Bamako : le rôle des images-satellite SPOT dans la gestion des villes. Thèse de doctorat, Université de Provence, Aix-en-Provence, 280 p.
- OUEDRAGO, D. et PICHÉ, V. 1995. L'insertion urbaine à Bamako. Karthala, Paris, 206 p.



# 7

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

RAMATA MAGAGI<sup>1</sup>, MONIQUE BERNIER<sup>1</sup>, GAËTAN LAFRANCE<sup>2</sup> et YVES GAUTHIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *INRS-Eau, 2800, rue Einstein, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4C7; téléphone : (418) 654-3784; télécopie : (418) 654-2600; courriel : magagira@inrs-eau.quebec.ca; monique\_bernier@inrs-eau.quebec.ca*

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

### **Résumé**

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

## 1. Introduction

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

## 2. Faisabilité de l'approche

### 2.1. Point de vue énergétique

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

$$R_N = R_S + R_L \quad (1)$$

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

$$R_N = (1 - \alpha)R_S \downarrow + \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (2)$$

où,  $\alpha$  est l'albédo de surface;  $\sigma$  est la constante de Boltzman,  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_s$ , les émissivités de l'air et du sol;  $T_a$ ,  $T_s$ , les températures de l'air et du sol.

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

## **2.2. Point de vue des données TM6**

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

## **3. Données disponibles**

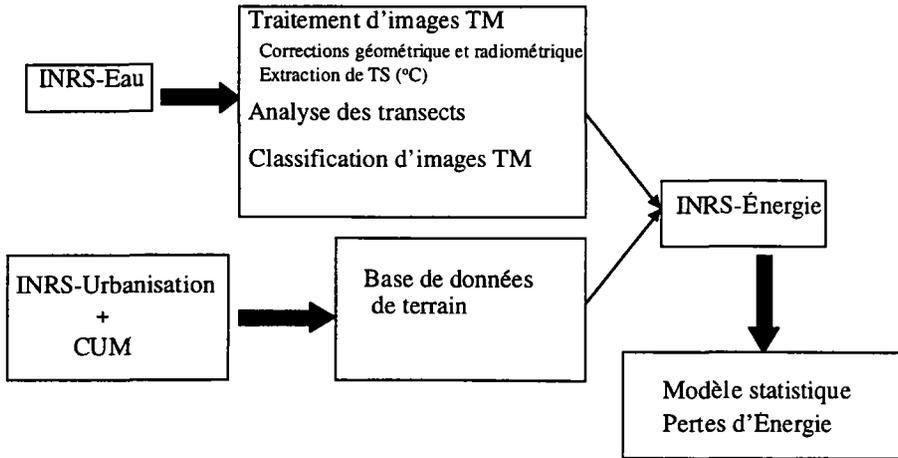
Actuellement, nous disposons de quatre images TM de LANDSAT-5, dont deux images d'été, une image d'automne et une image de printemps. Elles ont été acquises sur l'île de Montréal (extrémités sud-ouest 44°30'N-72°36'O et nord-est 46°30'N-74°36'O) les 20-08-1984, 26-08-1986, 11-10-1997 et 12-04-1998. La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

## **4. Méthodologie**

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

### **4.1. Traitement d'images du capteur TM**

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



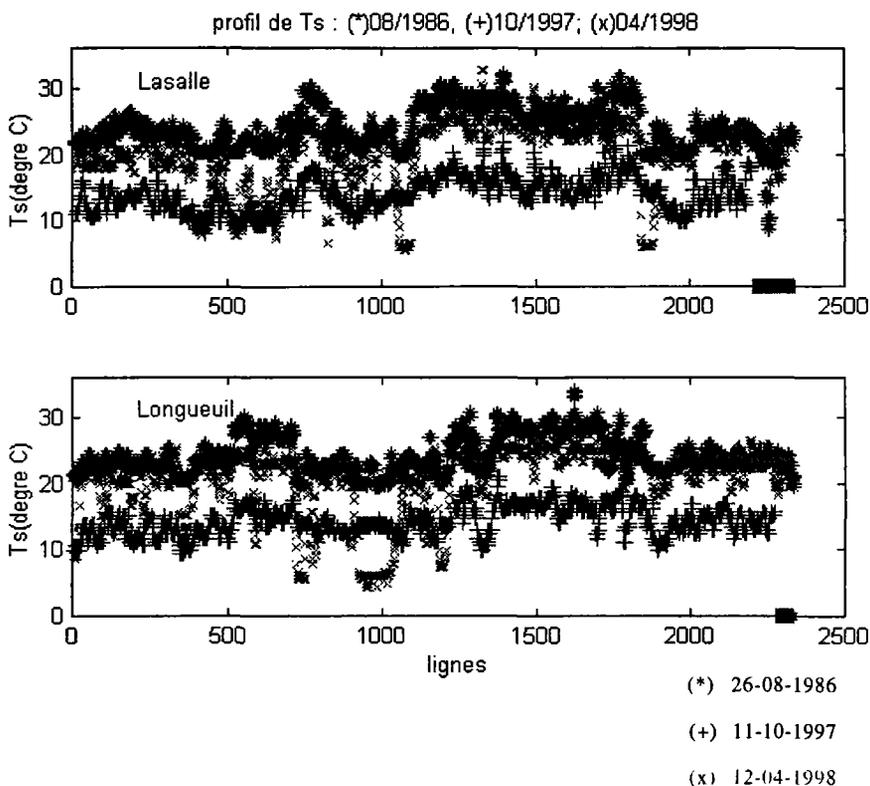
**Figure 1.** Contribution des trois centres de recherche de l'INRS et les principales étapes de la méthodologie.

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

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

#### 4.3. Classification

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



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

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

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

## 5. Résultats

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

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

Le but ici n'est pas de décrire l'information contenue dans les bandes 3 à 6 du capteur TM, mais de montrer leur comportement spectral différent au sein des classes rencontrées sur le transect nord-sud passant par LaSalle et Longueuil. Pour l'image de 1997, sur la figure 3, on présente les signaux moyen infrarouge, proche infrarouge et rouge en fonction des différentes classes. Les courbes sont polynomiales, avec un maximum décalé, alors que le canal thermique (figure 4) montre un profil quasi linéaire. Le même profil est observé pour les années 1984, 1986 et 1998. De l'analyse des figures 3 et 4, il apparaît que :

- chacun des quatre signaux (canaux 3 à 6) se comporte différemment par rapport aux différentes classes, ce qui met en évidence leur différence de sensibilité aux différentes classes et donc leur aptitude à fournir une classification convenable, mais non forcément fine;

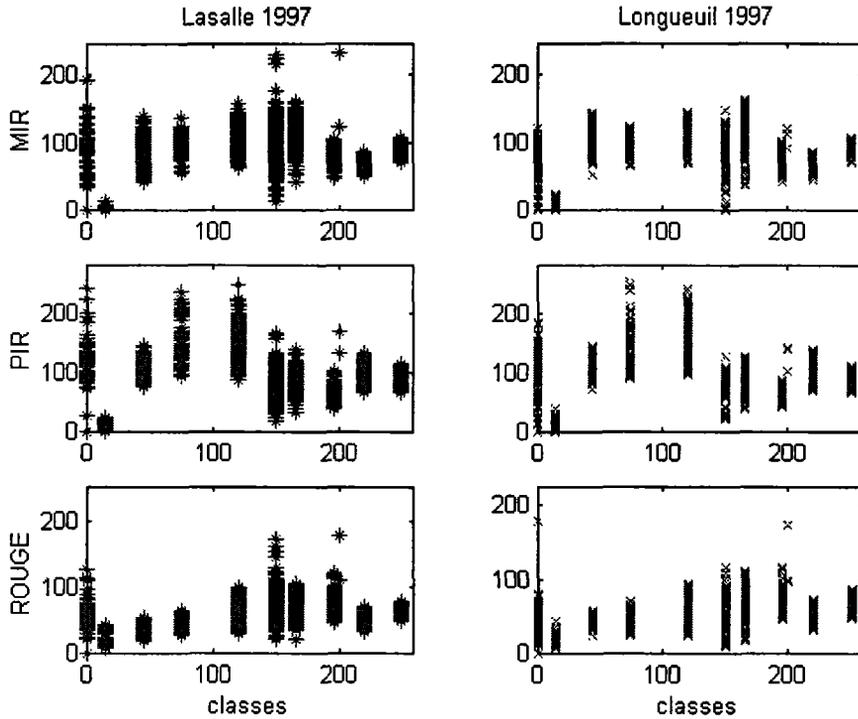
- pour la température  $T_s$ , la matière minérale (indice de classe >120) se détache du végétale, les maxima sont obtenus au niveau des grands bâtiments et des réservoirs de raffineries. La résolution spatiale de TM6 étant de 120 m x 120 m, la mesure de  $T_s$  représente une valeur intégrée et non la température d'une cible spécifique, ce qui, à notre avis, masque l'effet de l'utilisation des cibles urbaines. Ce point important sera analysé avec les données de recensement.

### 5.2. Analyse par secteur de recensement

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

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

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



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

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

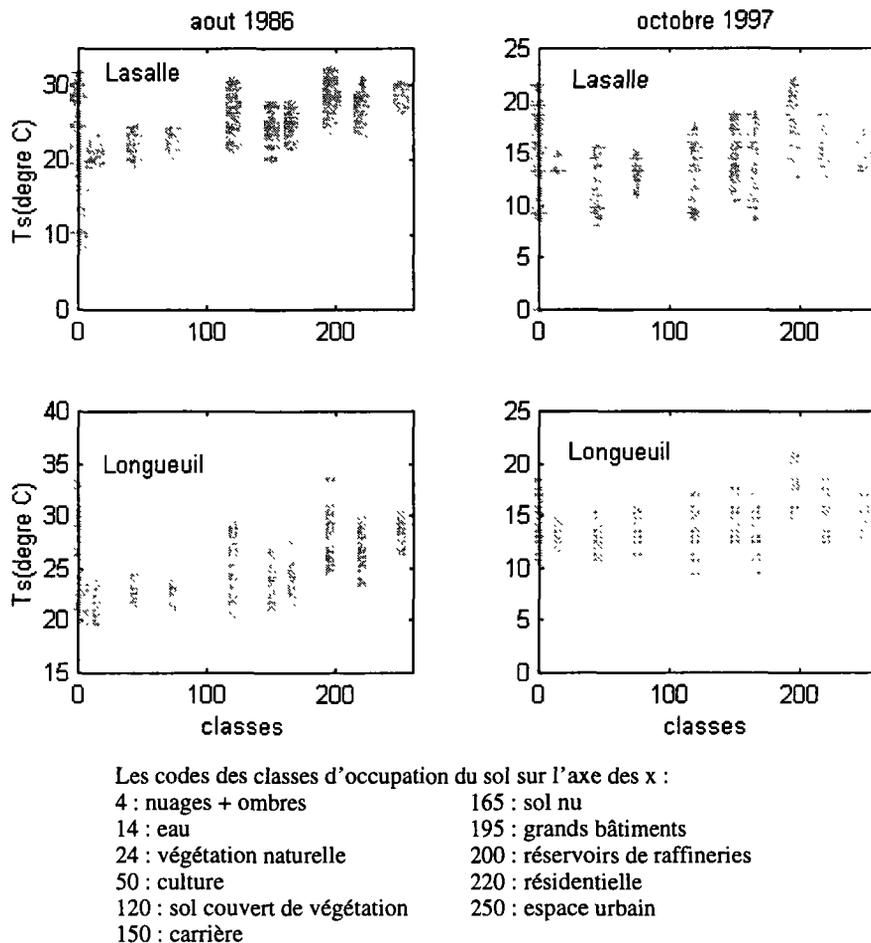
**Figure 3.** Signatures des bandes moyen infrarouge, proche infrarouge et rouge du capteur TM (image de 1997) en fonction des différentes classes obtenues le long des transects passant par LaSalle et Longueuil.

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

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

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

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



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

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

## 6. Conclusion

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

## 7. Références

- Anonyme 1983. Urban/Suburban land use analysis. Manual of Remote Sensing, 2<sup>e</sup> édition, *American Society of Photogrammetry*, Virginia, vol. 2, p. 1571-1666.
- BAUDOIN, Y., CAVAYAS, F. et MAROIS, C. 1995. Vers une nouvelle méthode d'inventaire et de mise à jour de l'occupation/utilisation du sol en milieu urbain. *Journal canadien de télédétection*, vol. 21, n° 1, p. 28-41.
- CHARBONNEAU, L., MORIN, D. et BROCHU, R. 1985. Détection des unités d'utilisation et de couverture d'un sol urbain au moyen d'une simulation SPOT. *Cahier de Géographie du Québec, Université Laval*, vol. 29, n° 76, p. 29-47.
- CHARBONNEAU, L., COULOMBE, A., MORIN, D. et BROCHU, R. 1989. Développement d'une spatio-carte orientée vers la planification urbaine : résultats préliminaires. *Cahier de Géographie du Québec*, vol. 33, n° 88, p. 23-36.
- JENSEN, J. R. 1996. *Introductory digital image processing : a remote sensing perspective*. 2<sup>e</sup> édition, Prentice Hall, Upper Saddle River (N. J).
- LAFRANCE, G. and SURPRENANT, J. P. 1992. Modelling the Global Energy efficiency of Urban Community: a sustainable city strategy. 15<sup>th</sup> International Conference of the International Association for Energy Economics, Tours, France, mai 1992.
- LARIVIÈRE, I. and LAFRANCE, G. 1998. Modelling the electricity consumption of cities : effect of urban density. *Energy Economics*, vol. 21, p. 53-56.
- LAFORÉST, K. et THÉRIAULT, M. 1979. Thermographie au sol et économie d'énergie dans les bâtiments. *Télédétection et gestion des ressources*, F. J. Bonn, éditeur, vol. 1-2, p. 223-230.
- PCI Geomatics Inc. 1997. PCI/EASI/PACE software.
- PRÉVOST, C. et BONN, F. 1979. Problèmes d'interprétation des thermographies pour la détection des pertes d'énergie des bâtiments. *Télédétection et gestion des ressources*, F. J. Bonn, éditeur, vol. 1-2, p. 211-215.

## 8

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

DIEUDONNÉ MOUAFO

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

### **Résumé**

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

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

## 1. Introduction

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

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

---

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

---

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

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

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

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

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

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

## **2. Méthodologie**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

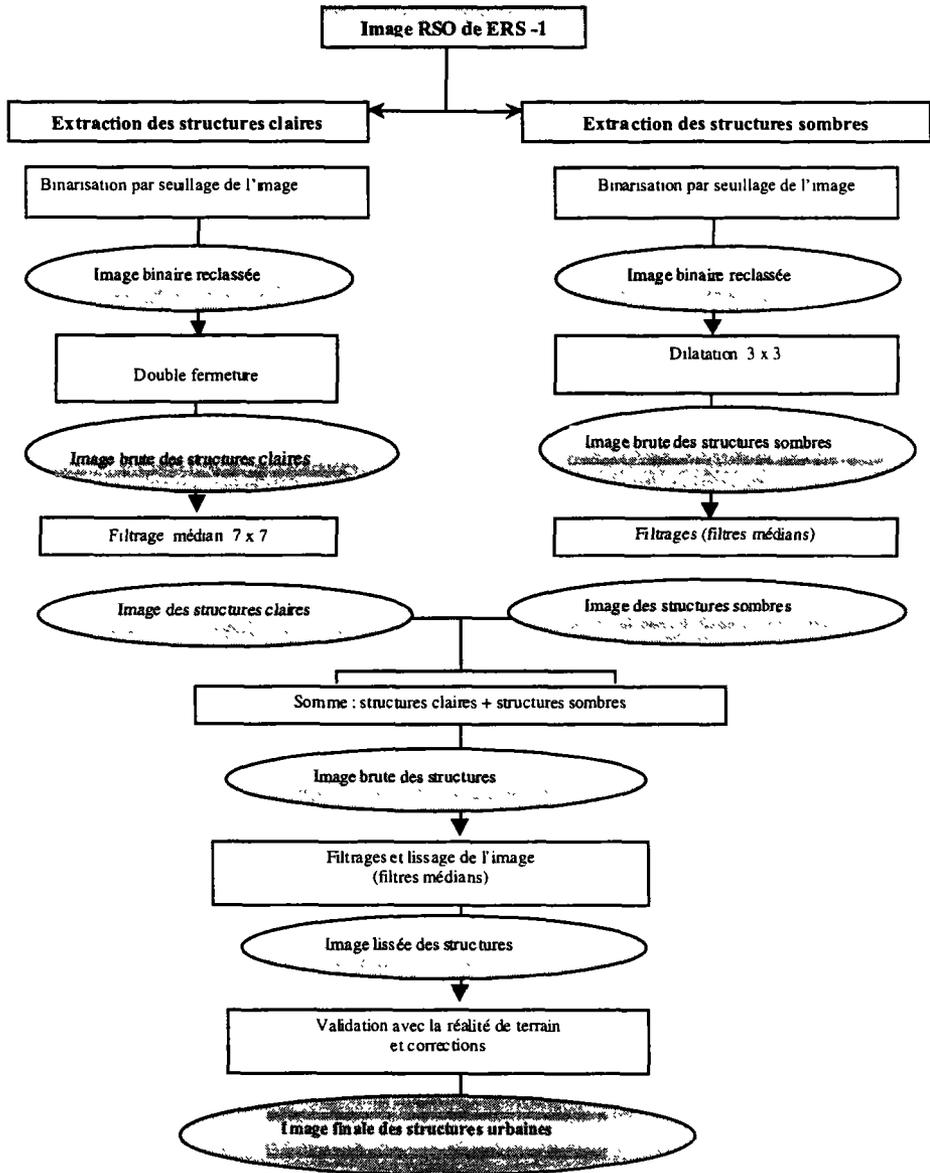


Figure 1. Schéma des séquences de la morphologie mathématique appliquée à l'image RSO de ERS-1 de Douala

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

### 3. Résultats

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

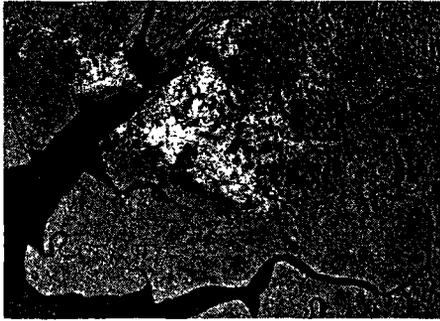
Les structures claires représentant le tissu urbain dense ont été comparativement plus faciles à isoler que les structures sombres. Ce sont en général des surfaces minéralisées plus ou moins compactes et dont la luminance est proche de la saturation (tableau 2 et figure 2).

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

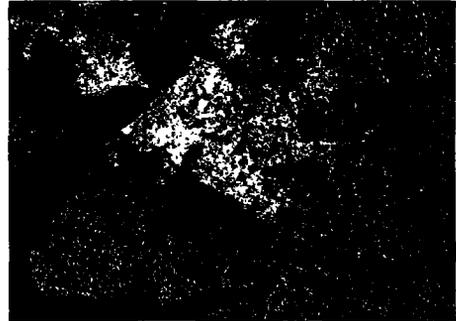
L'image des structures obtenue fait ressortir les grands axes d'urbanisation dans la région de Douala (figure 4). On observe en effet la structure tentaculaire de la ville dont les excroissances forment des chapelets le long des grands axes de communication que sont les routes et les voies ferrées. On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

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

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



a) Image radar originelle



b) Image seuillée (binaire)



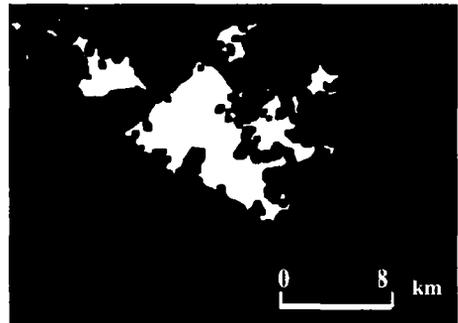
c) Fermeture



d) Dilatation

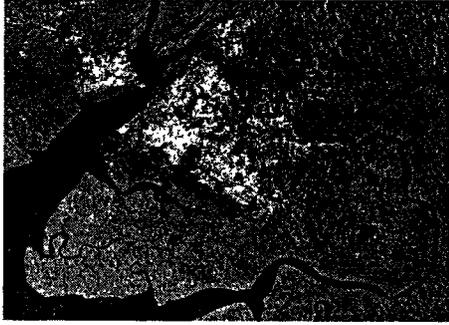


e) Double dilatation



f) Érosion et filtrages

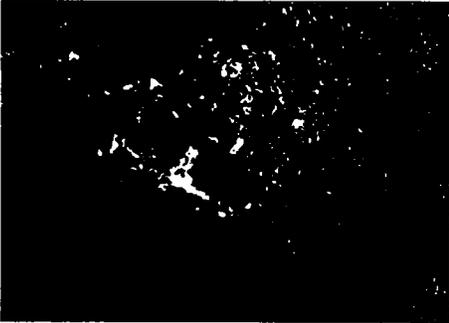
**Figure 2.** Principaux résultats de l'extraction des structures claires de l'image RSO de Douala



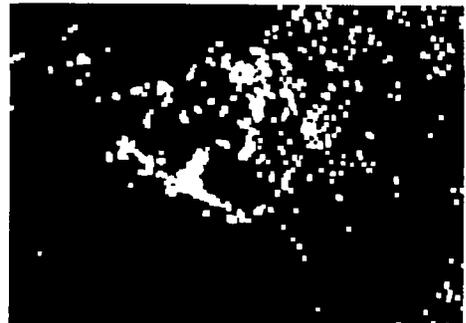
a) Image radar originale



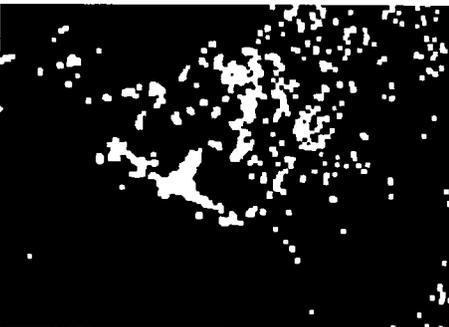
b) Image seuillée (binaire)



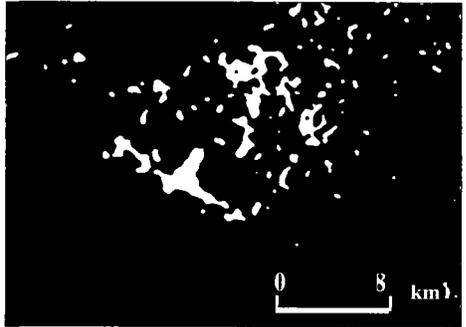
c) Image brute des structures sombres



d) Dilatation



e) Double dilatation



f) Érosion et filtrages médians

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

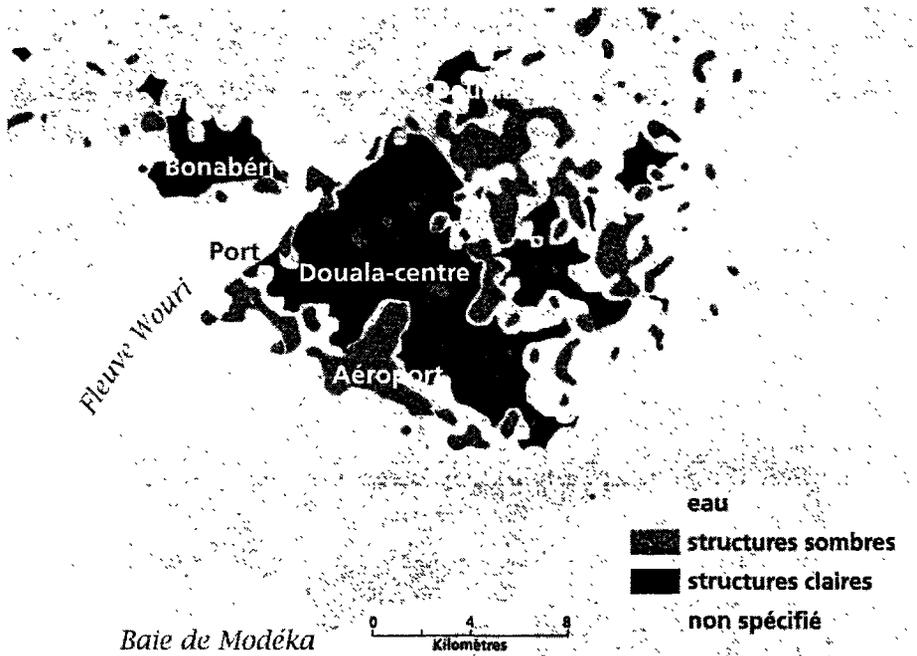


Figure 4. Image résultant de la somme des structures urbaines superposée au masque urbain géoreférencé de Douala

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

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

#### 4. Validation des résultats

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

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

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

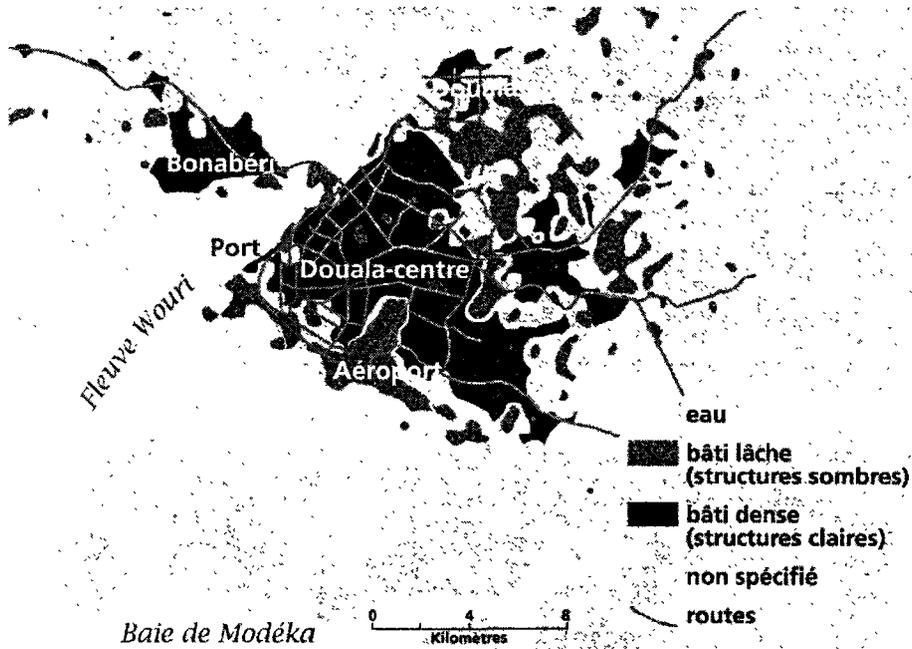


Figure 5. Image finale obtenue des structures urbaines superposée avec le réseau routier de Douala

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

## **5. Discussion et conclusions**

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

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

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

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

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

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

d'obtenir un résultat satisfaisant (figure 1) :

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

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

## 6. Remerciements

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

## 7. Références

- ALBIOL A. and SERRA, J. 1997. Morphological image enlargements. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 8, n° 4, p. 367-383.
- ANY S, H., BANNARI, A., HE, D.-C. and MORIN, D. 1994. Texture analysis for the mapping of urban areas using airborne MEIS-II images, *in Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Strasbourg, France, vol. 3, p. 231-245.
- ASSAKO ASSAKO, R.-J. 1998. Yaoundé : essai de délimitation de l'enveloppe urbaine à partir d'une image HRV de SPOT. Université de Fribourg, Institut de géographie, Fribourg, Rapport de stage de l'ARP de l'AUF-UREF, 27 p.
- BEUCHER, S. 1990. Segmentation d'images et morphologie mathématique. Thèse de doctorat, Paris, Centre de Morphologie mathématique, École des Mines de Paris.
- BILODEAU, M. and BEUCHER, S. 1994. Road Segmentation Using a Fast Watershed Algorithm. *in Proceedings ISMM'94 : Mathematical Morphology and its Applications to Image Processing*, Fontainebleau, September 1994, p. 29-30.

- BONN, F. et ROCHON, G. 1992. Précis de Télétection. Vol. 1 : principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.
- BUSQUE, P., CAVAYAS, F., GRAY, J. et POIRIER, S. 1998. Acquisition des données de terrain de support aux analyses des images RSO de Radarsat. In J.-M. DUBOIS *et al.* (dir), Actes des Journées scientifiques de Sainte-Foy. La réalité de terrain en télétection : pratiques et méthodes. AUPELF-UREF, Montréal, p. 101- 118.
- DONNAY, J.-P. et LAMBINON, M. 1997. Détermination des limites d'agglomération par télétection : discussion méthodologique et application au cas de Huy. in J.-M. Dubois, J.-P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd.) Télétection des milieux urbains et périurbains. AUPELF-UREF, Montréal, p. 239-246.
- DUBOIS, J.-M., BERNIER, M., FORTIN, J.-P. et BOIVIN, F. (réd.) 1998. La réalité de terrain en télétection : pratiques et méthodes. AUPELF-UREF, Montréal, 356 p.
- DUBOIS, J.-M., DONNAY, J.-P., OZER, A., BOIVIN, F. et LAVOIE, A. (réd.) 1995. Télétection des milieux urbains et périurbains. AUPELF-UREF, Montréal, 361 p.
- GUERRA, F., TORRES, W., PÉREZ, J., et MARTINEZ, M. 1997. Apport de deux images MSS et TM de Landsat au suivi cartographique des dynamiques spatiales récentes des milieux périurbains dans le bassin du lac de Valencia (Venezuela). in J.-M. Dubois, J.-P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd.) Télétection des milieux urbains et périurbains. AUPELF-UREF, Montréal, p. 307-314.
- HARALICK, R.M., SHANMUGAN, K. and DINSTEN, I. 1973. Textural Features for Image Classification : IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 6, p. 610-621.
- HENDERSON, F.M. and ZONG-GUO, X. 1998. Radar Applications in Urban Analysis, Settlement Detection and Population Estimation, in F.M. HENDERSON and A.-J. LEWIS, (ed.), Principles and Applications of Imaging Radar. John Wiley & Sons, New York, p. 733-763.
- JEULIN, D. 1989. Morphological Modeling of Images by Sequential Random Functions. Signal Processing, n° 16, p. 403-431.
- JEULIN, D. 1994. Random Structure Models for Composite Media and Fracture Statistics. in K. Markov (ed.) Advances in Mathematical Modelling of Composite Materials, World scientific company, vol. 15, p. 239-259.
- MAINET, G. 1985. Douala, croissance et servitudes. L'Harmattan, Paris, coll. « Villes et Entreprises », 605 p.
- MEYER, F. 1997. Morphological segmentation on a neighborhood graph. Acta stereologica, vol. 16, n° 3, 1997, p. 1-8.
- MINUH (Ministère de l'Urbanisme et de l'Habitat du Cameroun) 1983. Schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme (SDAU) de Douala. MINUH, Yaoundé, Projet Urbain-FAC/ Cameroun, 8 volumes + annexes.
- MOUAFO, D. 1999. Intégration d'images de Télétection et de données multisources dans un SIG en vue de la cartographie urbaine et du suivi de l'urbanisation à Douala au Cameroun. Université de Fribourg, Institut de géographie, Fribourg, Rapport de stage des Bourses postdoctorales d'excellence de l'AUF, 47 p.
- OGAO, P.-J. 1999. Visualization of Urban Growth Using Temporal Cartographic Animation: A proposed case study of Nairobi, Kenya. Communication à la Conférence de l'Association cartographique internationale (ICA '99), Ottawa, 14-21 Août 1999.
- SERRA, J. and CHERMANT, J.-L. 1997. Mathematical morphology : A historical overview. Acta stereologica, vol. 16, n° 3, p. 1-9.
- TERRETTAZ, P. 1998. Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitaires SPOT HRV. Institut de géographie, Fribourg, thèse de doctorat, 372 p.

- THIAM, S. 1998. Délimitation et segmentation urbaine à partir de la télédétection satellitaire : Application à la ville de Dakar (Sénégal). Laboratoires SURFACES, Liège, Université de Liège. Rapport de stage des bourses d'excellence AUPELF-UREF, 27 p.
- TONYÉ, E. et AKONO, A. 1998. Application de la réalité-terrain et de l'imagerie radar à la cartographie des mangroves de la région de Douala (Cameroun). *in* J.-M. DUBOIS *et al.* (dir), La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Actes des Journées scientifiques de Sainte-Foy, AUPELF-UREF, Montréal, p. 241-247.
- WEBER, C., DONNAY, J.-P. et COLLET, C. 1997. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. *in* J.-M. Dubois *et al.* (dir), Actes des Journées scientifiques de Liège : télédétection des milieux urbains et périurbains. AUPELF-UREF, Montréal, p. 133-144.

## 9

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

SOLOFOARISOA RAKOTONIAINA<sup>1</sup>, CLAUDE COLLET<sup>2</sup> et JEAN BRUNO RATSIMBAZAFY<sup>1</sup>

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

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

### Résumé

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

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

## 1. Introduction

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

## 2. Outils et méthodologie

### 2.1. Outils classiques

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

### 2.2. Transformée en ondelettes et l'analyse multirésolutions

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

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

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

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

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

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

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

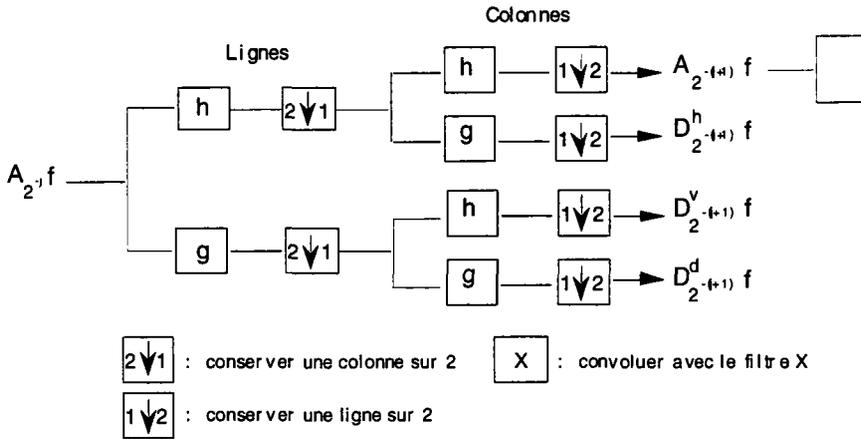
En pratique, le calcul des coefficients  $C_{j,k}$  et  $a_{j,k}$  se réalise par des opérations de filtrage (MALLAT, 1989). Ainsi, à la fonction d'échelle, on associe un filtre passe-bas  $h$  qui permet de conserver les éléments caractéristiques du signal tout en éliminant le bruit. Un filtre passe-haut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

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

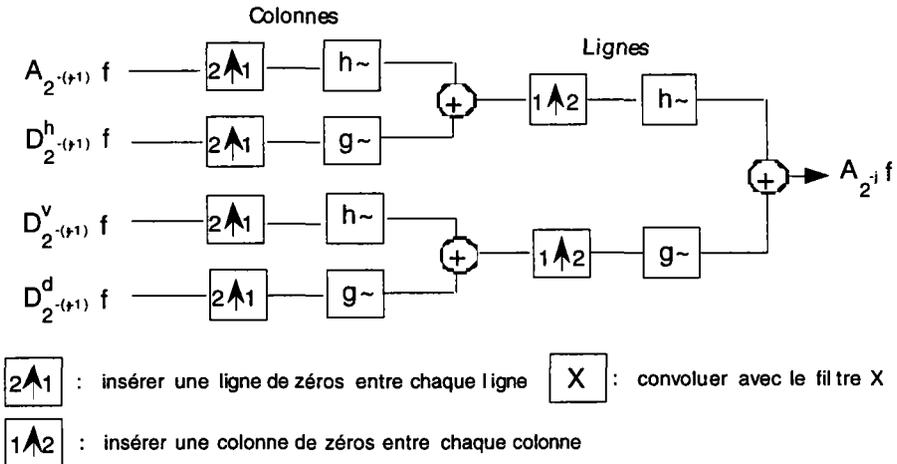
Dans le cas d'une image, pour un niveau de résolution  $J > 0$ , la représentation en ondelettes orthogonales de l'image de départ est donnée par l'ensemble de  $3J+1$  images (MALLAT, 1989) :

$$\left( A_{2^{-j}} f, (D_{2^j}^h f)_{-j \leq j \leq -1}, (D_{2^j}^v f)_{-j \leq j \leq -1}, (D_{2^j}^d f)_{-j \leq j \leq -1} \right)$$

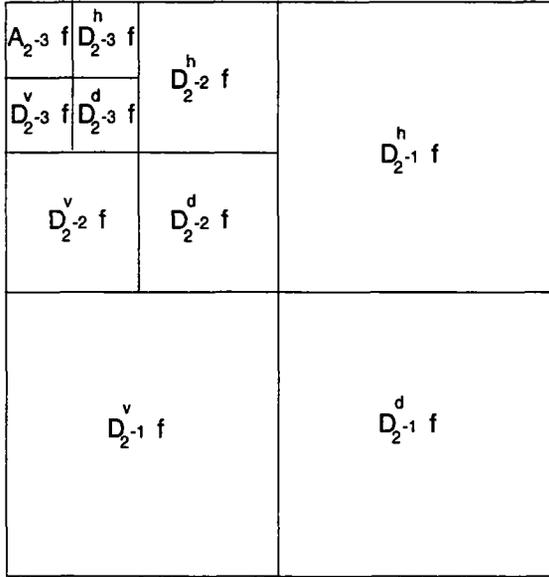
$A_{2^{-j}} f$  est l'approximation de l'image à la résolution  $2^{-j}$  et les  $D_{2^j}^i f$  images donnent les images de détails pour différentes orientations (horizontale, verticale, diagonale) et différentes résolutions (figure 3).



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



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



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

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

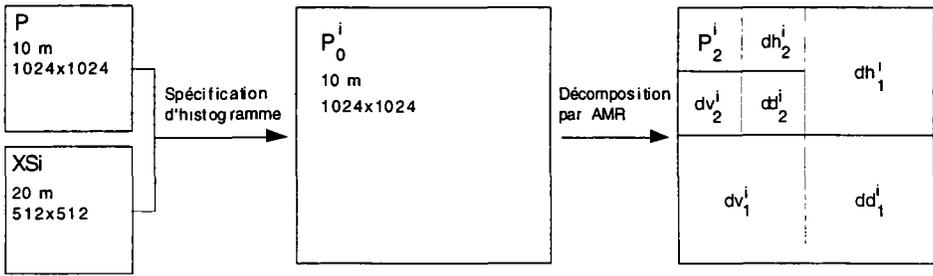
Nous avons pu inventorier trois approches de fusion d'images par la méthode des ondelettes : ce sont les approches de RANCHIN (1993), de GARGUET-DUPORT (1994) et de YOCKY (1996), laquelle est reprise par ZHOU *et al.* (1998).

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

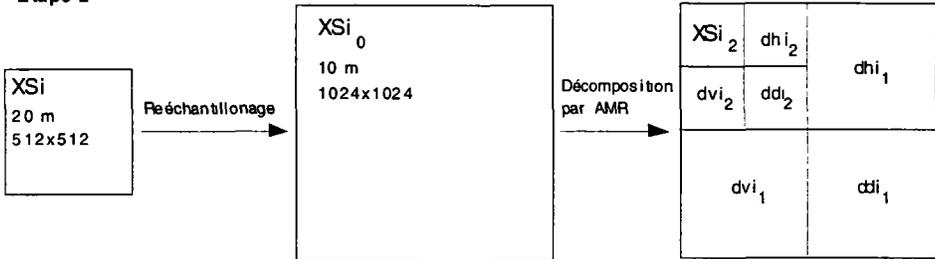
**2.4. Évaluation des résultats**

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

Etape 1



Etape 2



Etape 3

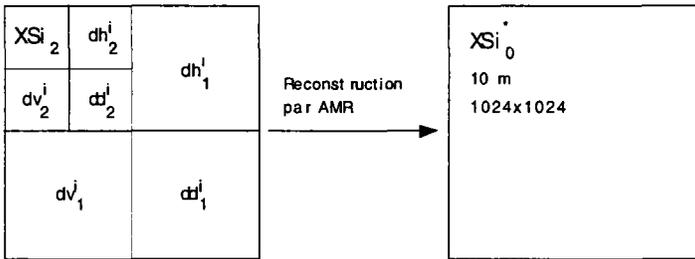


Figure 4. Fusion d'images par la méthode des ondelettes suivant l'approche de ZHOU *et al.* (1998)

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

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

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

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

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

### 3. Données utilisées

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

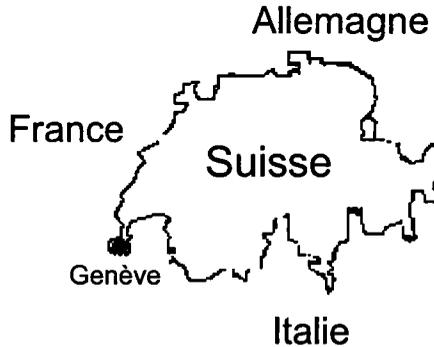


Figure 5a. Localisation de la région d'étude : Genève

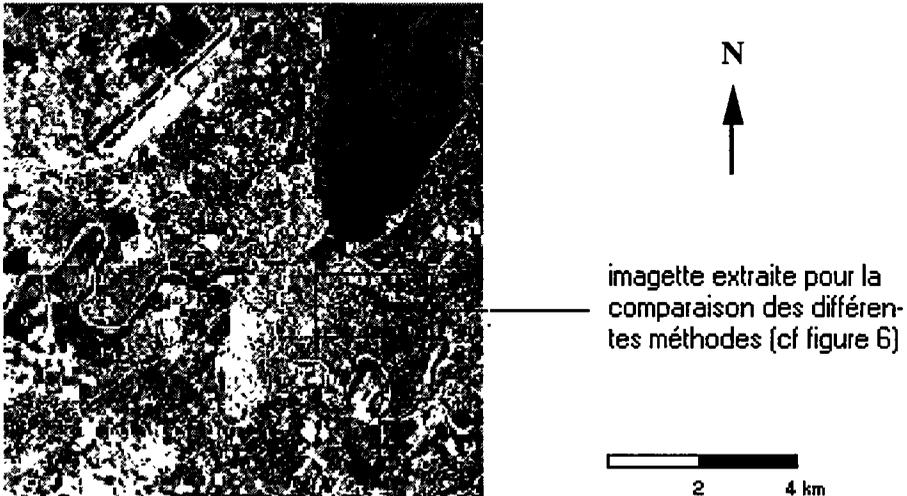


Figure 5b. Localisation de la région d'étude : image HRV (XS1) de SPOT de la ville de Genève

## 4. Résultats

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **5. Interprétation et discussion**

### **5.1. Classement des méthodes au niveau de la qualité spectrale**

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

### **5.2. Classement des méthodes au niveau de la qualité spatiale**

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

### **5.3. Interprétation des résultats de la classification**

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

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

## **6. Conclusion**

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

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

## **7. Remerciements**

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

## **8. Références**

- CHAVEZ, P.S., SIDES, S., ANDERSON, J. 1991. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data : Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 57, n° 3, p. 295-303.
- COLLET, C. 1999. Vers un système d'assistance à l'interprétation d'images numériques de télédétection (IIAO). Colloque International Télédétection et Géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux, 67<sup>e</sup> Congrès de l'ACFAS, Ottawa, 10-12 mai 1999.
- DAUBECHIES, I. 1992. Ten Lectures on Wavelets. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. SIAM Press, Philadelphia, Pennsylvania.
- GARGUET-DUPORT, B. 1994. Fusion d'images et télédétection en écologie du paysage. Application à l'étude structurale d'un corridor fluvial alpin. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 110 p.
- MALLAT, S.G. 1989. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition : The Wavelet Representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, n° 7, p. 674-693.
- MANGOLINI, M., RANCHIN, T. et WALD, L. 1995. Évaluation de la qualité des images multispectrales à haute résolution spatiale dérivées de Spot. *Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection* n° 137, p. 24-29.
- PRESS, W., FLANNERY, B., TEUKOLSKY, S. and VETTERLING W. 1992. *Numerical Recipes in C : the art of scientific computing*. Cambridge University Press, Cambridge, 702 p.

- RAKOTONIAINA, S. et COLLET, C. 1997. *Élaboration d'un outil mathématique : la transformée en ondelettes pour l'exploitation des données de télédétection. Applications dans les Sciences de la terre. Rapport de stage doctoral en télédétection AUPELF-UREF, Université de Fribourg, 53 p.*
- RAKOTONIAINA, S. 1999. *Analyse multirésolution par ondelettes en traitement du signal. Exemples d'application en télédétection et en géophysique. Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, 132 p.*
- RANCHIN, T. 1993. *Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection. thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 146 p.*
- TERRETTAZ, P. 1998. *Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitaires SPOT HRV. Thèse de doctorat, Université de Fribourg , 304 p.*
- YOCKY, D.A. 1996. *Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and Spot Panchromatic data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 62, n° 9, p. 1067-1074.*
- ZHOU, J., CIVCO, D.L. and SILANDER, J.A. 1998. *A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT Panchromatic data. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 4, p. 743-757.*

# 10

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

EMMANUEL TONYÉ<sup>1</sup>, ALAIN AKONO<sup>1</sup>, ANDRÉ NDI NYOUNGUI<sup>2</sup> et RENÉ-JOLY ASSAKO ASSAKO<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> *Institut universitaire de Ngaoundéré, Université de Ngaoundéré, B.P. 455, Ngaoundéré, Cameroun; téléphone : (237) 252751; télécopieur : (237) 252751;*

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

### **Résumé**

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

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

## 1. Introduction

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

## 2. Matériel et méthode

### 2.1. Données utilisées et site d'étude

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

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



apparaître les éléments recherchés sur l'image, a été retenu. Il s'agit du paramètre appelé poids des longues plages de faible niveau de gris (équation 2) :

$$\text{LRLGE} = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{j^2 r(i,j)}{i^2} \quad (2)$$

La constante  $nr = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r(i,j)$  est le nombre total de plages dans une fenêtre centrée autour d'un pixel courant où  $M$  est le nombre de niveaux de gris dans l'image et  $N$  est le nombre de longueurs de plages rencontrées dans la fenêtre. Pour obtenir l'image de texture, on remplace le niveau de gris du pixel courant par la valeur du paramètre de texture évaluée dans une fenêtre centrée autour de ce pixel.

### 2.2.2. Squelettisation

La squelettisation (SERRA, 1982) permet de réduire la dimension des contours d'une image, de manière à obtenir des contours d'épaisseur égale à 1 pixel. Cette opération a été utile pour la détermination de la longueur du réseau routier. La squelettisation s'effectue par une succession d'opérations appelées amincissement, jusqu'à l'obtention d'une structure stable ne pouvant plus être amincie.

### 2.3. Procédure

L'image originale est préalablement filtrée par un filtre de chatoiement. Le filtre de Lee (LEE, 1980) a été choisi ici pour ses bonnes performances dans nos travaux antérieurs. Le paramètre de texture du poids des longues plages de faible niveau de gris est ensuite appliqué sur l'image filtrée, ce qui produit une image de texture.

Le succès de toute procédure de classification texturale dépend largement de la taille de la fenêtre choisie pour le calcul des paramètres de texture. Si la taille de la fenêtre est très petite, une information spatiale ne peut pas en être extraite pour caractériser correctement une classe donnée. Si la fenêtre est trop grande, elle peut chevaucher entre différentes classes de couverture du sol, produisant par la suite une information spatiale erronée. Pour faciliter le choix d'une fenêtre optimale, une stratégie consiste à calculer le coefficient de variation moyen pour chaque classe en faisant varier la taille de la fenêtre. La taille de fenêtre retenue est celle pour laquelle le coefficient de variation commence à se stabiliser tout en restant faible. En suivant la stratégie précédente, nous avons trouvé que les fenêtres 3 x 3 sont raisonnables. Ceci signifie que des fenêtres plus grandes n'apportent pas d'amélioration en terme d'information texturale.

L'image de texture obtenue ne permet généralement pas de faire une partition de l'image en des classes distinctes, son histogramme ne présentant pas des modes (maximum) et des vallées (minimum) précis. Pour pallier cet inconvénient, une méthode originale de modification de l'histogramme est mise en oeuvre. Cette méthode consiste en une transformation de l'échelle des niveaux de gris par des opérateurs algébriques entre deux ou plusieurs images, ou entre une image et une constante selon l'une des expressions ci-dessous (équation 3) :

$$\begin{cases} I_T' = I_T * C \\ I_T' = a * I_T^2 + b * I_T + D \\ I_T' = a * I_T^3 + b * I_T^2 + c * I_T + E \\ I_T' = I_T + I_O \end{cases} \quad (3)$$

où,  $I_O$  représente l'image originale,  $I_T$  représente l'image de texture initiale et  $I_T'$  représente l'image de texture modifiée; C, D, E, a, b, c, sont des constantes de multiplication et d'addition qu'on obtient après plusieurs essais expérimentaux.

Dès que l'image de texture modifiée est obtenue, on procède au calcul de son histogramme, ce qui permet de choisir un seuil approprié pour la binarisation de cette image. Le seuil de binarisation est déterminé à partir des modes de l'histogramme. Il correspond au niveau minimum (vallée) de l'histogramme situé entre les modes (pics) consécutifs. Une détection de contours par la technique du gradient est ensuite appliquée à l'image binarisée et l'on obtient une image de contours à laquelle on applique la squelettisation. Une fois que l'image squelettisée est obtenue, on procède au calcul de la longueur du réseau routier. La longueur minimale et la longueur maximale du réseau sont évaluées en fonction de la taille du pixel de l'image. Une telle technique a déjà été utilisée avec succès dans le cadre d'une étude de cartographie des lignes de rivage (TONYÉ *et al.*, 2000). L'image HRV de SPOT a été binarisée, et elle a ensuite subi une opération de détection des contours par la technique du gradient.

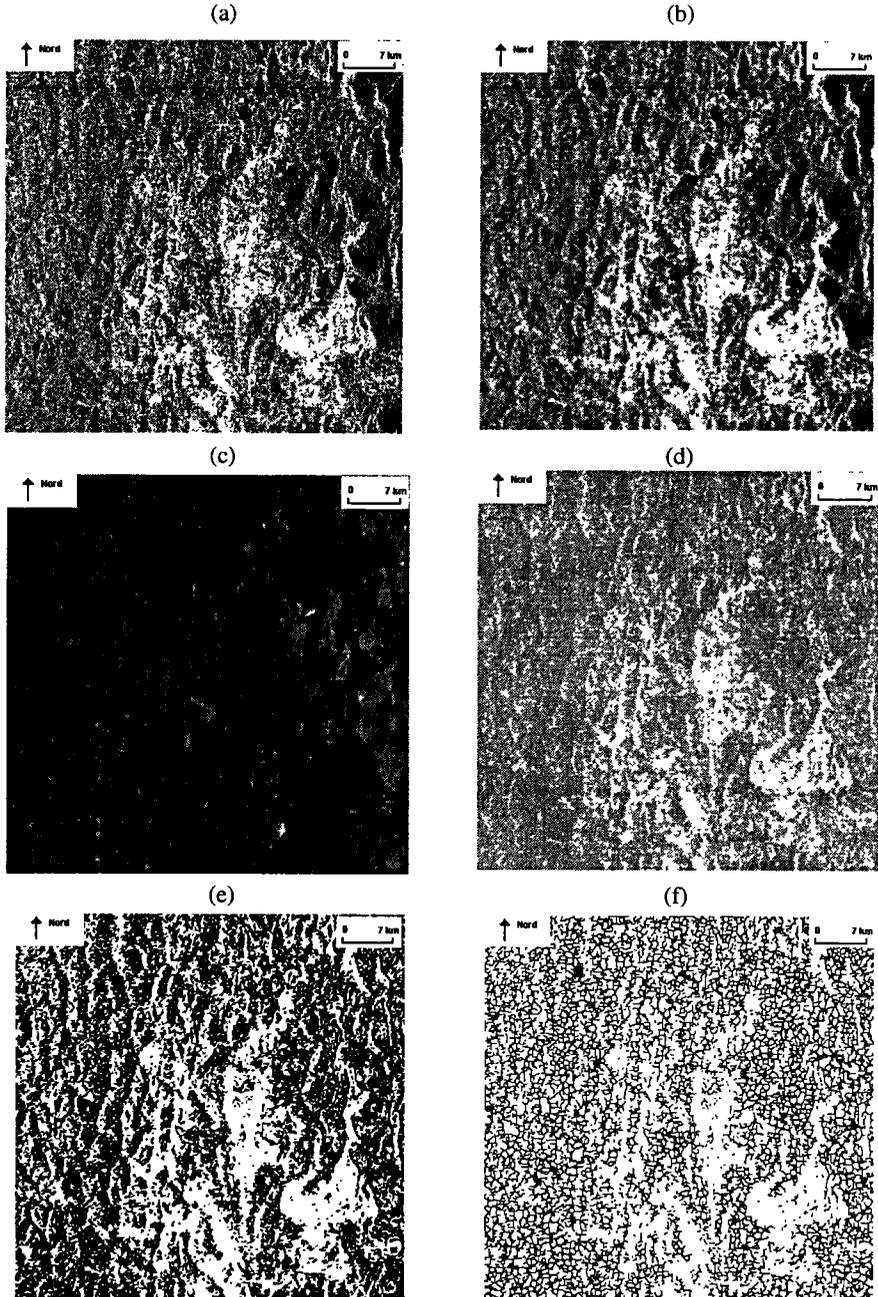
### 3. Résultats

L'image originale RSO est présentée sur la figure 2a et l'image originale filtrée par le filtre de Lee sur la figure 2b. Sur la figure 2c, on présente l'image de texture obtenue avec le paramètre poids des longues plages de faible niveau de gris. L'image de texture modifiée est présentée sur la figure 2d. Cette image de texture modifiée est obtenue par sommation de l'image de texture et de l'image originale filtrée. Sur la figure 2e, on présente l'image binarisée obtenue à partir de l'image de texture modifiée et sur la figure 2f, on montre l'image binarisée et squelettisée. Sur la figure 3a, on présente l'image HRV (XS3) de SPOT et, sur la figure 3b, l'image des contours issue de l'image HRV (XS3) binarisée. Cette figure présente quelques axes routiers.

La longueur minimale du réseau routier dans le sens sud-nord a été évaluée à 10 km et la longueur maximale à 15 km. Dans le sens est-ouest, la longueur minimale du réseau a été évaluée à 7 km et la longueur maximale à 10 km. La ville de Yaoundé a une superficie approximative de 15 km x 10 km, ce que reflète la carte de la figure 4 (15,5 km x 11 km).

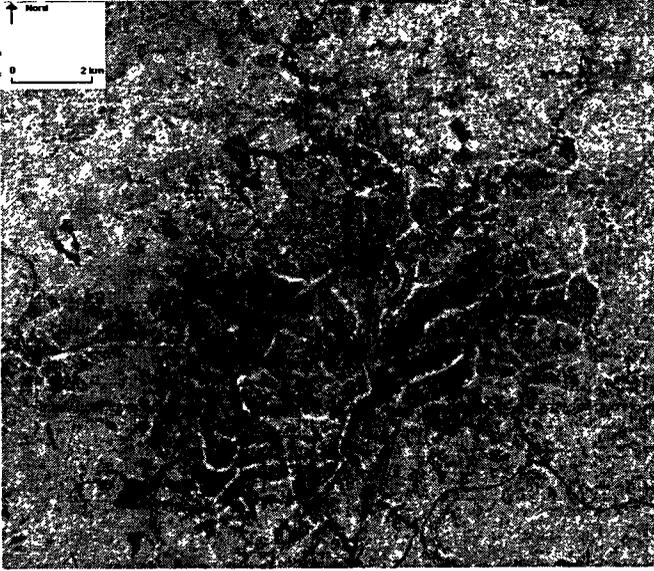
### 4. Discussion et conclusion

Les méthodes utilisées font bien ressortir la distinction entre l'urbain et le non urbain, de manière à permettre le tracé du périmètre de l'agglomération (GOUINAUD, 1996). Une comparaison visuelle des résultats obtenus avec une carte routière de la région d'étude (figure 4) montre que les résultats obtenus avec l'image HRV de SPOT sont plus proches de la réalité, comparativement aux résultats obtenus avec l'image RSO. Ceci est notamment

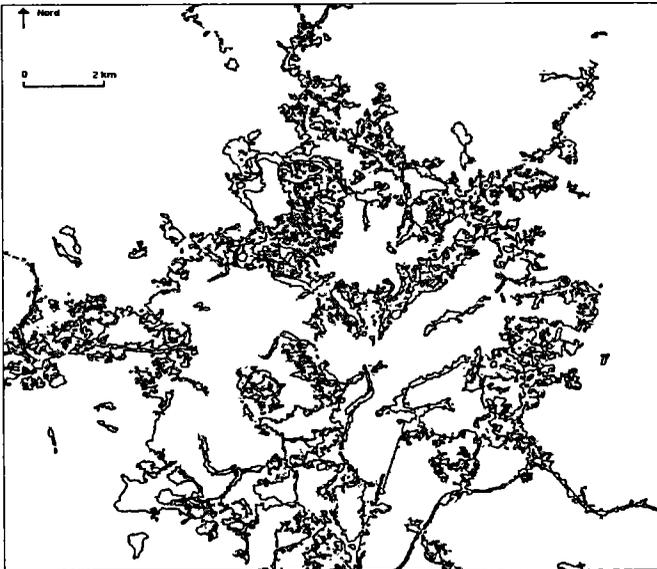


**Figure 2.** Image RSO de ERS-2 de la ville de Yaoundé : (a) image originale 512 x 512 pixels; (b) image originale filtrée par un filtre de Lee; (c) image de texture (poids des longues plages de faible niveau de gris); (d) somme de l'image originale filtrée (b) et de l'image de texture (c); (e) résultat de la binarisation de l'image (d); (f) image squelettisée issue de l'image binarisée (e)

(a)



(b)



**Figure 3.** Image HRV (XS3) de SPOT de la ville de Yaoundé : (a) image originale 773 x 800 pixels; (b) image des contours obtenue par la technique du gradient



## **5. Remerciements**

Ce travail a bénéficié du soutien financier des organismes suivants :

- l'Agence universitaire de la Francophonie (anciennement AUPELF-UREF) à travers le projet de Laboratoire associé francophone (LAF n° 601) et des bourses de stage doctorante et post-doctorale (Sherbrooke, 1996, 1997).

- l'Agence spatiale européenne à travers la fourniture d'images radar.

Nous les en remercions. Nous remercions également le professeur Jean-Paul RUDANT de l'Université de Marne-La-Vallée (France) pour sa coopération à nos projets.

## **6. Références**

- ASSAKO ASSAKO, R.J. et TONYÉ, E. 2000. Évaluation comparative des méthodes pour la délimitation d'un périmètre urbain par télédétection. *Télédétection*, vol. 1, n° 4, p. 20-41.
- BOVIK, A.C. 1988. On detecting edges in speckle imagery. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 36, n°10, p. 1618-1627.
- DASARATHY, B.V. and HOLDER, E.B. 1991. Image characterization based on joint gray level-run length distributions. *Pattern Recognition Letters*, vol. 12, p. 497-502.
- GOUINAUD, C. 1996. traitement d'images satellitaires pour la détection d'agglomérations. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des télécommunications de Paris, 243 p.
- HARALICK, R.M., SHANMUGAN, K. and DINSTEN, I. 1973. Textural features for image classification. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, p. 610-621.
- LEE, J.S. 1980. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 2, n° 2.
- LEMARCHAND, P. 1994. L'Afrique et l'Europe. Atlas du xx<sup>e</sup> siècle. Éditions Complexe, Bruxelles.
- SERRA, J. 1982. *Image analysis and mathematical morphology*. Academic Press, London, 628 p.
- TONYÉ, E., AKONO, A., NDINYOUNGUI, A., NLEND, C. et RUDANT, J.-P. 2000. Cartographie de la ligne de rivage par analyse texturale d'images radar à synthèse d'ouverture de ERS-1 et de E-SAR. *Télédétection*, vol. 1, n° 3, p. 1-21.
- TOUZI, R., LOPES, A. and BOUSQUET, P. 1988. A statistical and geometrical edge detector for SAR images. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, n°6, p. 764-773.



# 11

## **Intégration des données fournies par la télédétection et la photogrammétrie dans un système d'information du territoire en vue d'étudier et d'évaluer les catastrophes naturelles en milieu urbain : exemple de Bucarest**

FLOREA ZAVOIANU<sup>1</sup> et LIVIU DINULESCU<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Faculté de géodésie, Université technique de constructions de Bucarest, 124, boul. Lacul Tei, Sector 2, Bucarest, Roumanie; téléphone : + 40 01 242 12 08; télécopieur : + 40 01 242 07 81; courriel : fzavoian@pcnet.pcnet.ro*

### **Résumé**

Nous présentons les principes de base et les résultats préliminaires obtenus par le traitement des données fournies par la télédétection satellitaire, des photographies aériennes, des enregistrements vidéographiques et des données de terrain. Leur analyse dans le cadre d'un système d'information du territoire (SIT), pour une zone urbaine, a été faite en vue de surveiller les catastrophes naturelles (tremblements de terre, inondations, glissements de terrain, incendies, etc.) et d'en évaluer les effets à partir de ces données. Par photo-interprétation des stéréogrammes recueillis avant la catastrophe, on a construit un modèle tridimensionnel (3D) de référence pour toute la zone concernée de la ville de Bucarest. Ce modèle a été construit sur la base de photographies à l'échelle du 1 : 6 000 et a été complété avec des données obtenues par la numérisation des plans cadastraux à l'échelle du 1 : 2 000 et les levés de terrain. Pour chaque bâtiment, on établit un système d'informations techniques servant à l'évaluation détaillée des effets de la catastrophe. Après la catastrophe, par analyse des images satellitaires à haute résolution, on établit les zones affectées par celle-ci et pour lesquelles on construit un modèle 3D d'après la catastrophe. Pour la création

de ce modèle, on a utilisé les images vidéographiques SVHS prises en hélicoptère à 80 m, à 350 m et à 500 m d'altitude. Par l'analyse comparative des deux modèles 3D établis avant et après la catastrophe, on évalue les effets de celle-ci sur la zone urbaine testée.

## 1. Introduction

La surveillance des désastres naturels et l'évaluation de leurs effets constituent un problème complexe du fait de l'analyse d'un grand volume de données de nature et de précision diverses. Pour cette opération, il est nécessaire de construire une base de données techniques, dont l'analyse constituera le fondement des décisions administratives. Cette analyse sera plus ou moins détaillée en fonction du niveau auquel sera prise la décision. L'analyse de détails d'un modèle 3D à la quatrième dimension exige, d'une part, l'utilisation de sources de données homogènes pour des superficies étendues et, d'autre part, des possibilités de collecte précise, rapide et efficace. Un SIT 3D, établi pour une zone urbaine, comprend en outre le modèle 3D qui constitue la base technique de données cartographiques et informationnelles concernant : l'occupation et l'utilisation du sol, les ressources naturelles, la valeur du terrain. Ce modèle est complété avec d'autres bases de données portant sur : le système juridique, les sources de pollution, les agents atmosphériques et le climat local, les facteurs socio-économiques concernant la distribution, l'occupation et la structure de la population, les institutions administratives ainsi que les plans d'intervention rapide des divers services publics.

Pour la construction d'un tel système, il faut tenir compte de plusieurs facteurs, à savoir les conditions locales notamment : l'équipement informatique disponible, les systèmes de logiciels existants, le personnel technique qui le dessert, le mode d'intégration des diverses sources de données qui doivent être collectées, emmagasinées, organisées, traitées et analysées ensemble, les institutions et les organismes impliqués ainsi que la stratégie de développement socio-économique de la zone concernée. Les zones de changements significatifs sont mises en évidence sur la base de l'exploitation des données satellitaires à haute résolution, zones pour lesquelles le modèle 3D sera établi à grande échelle par voie photogrammétrique. Ce système d'organisation par niveaux d'information offre la possibilité d'intégrer les différentes sources de données tout en effectuant une analyse efficace et rapide des effets des catastrophes naturelles.

## 2. Méthodologie

Dans une première phase, l'établissement des zones endommagées par un désastre naturel n'exige pas une grande précision. Il peut s'effectuer dans le cadre d'un SIT en utilisant les images de télédétection à haute résolution (KNYIHAR and WINKLER, 1993). Pendant cette phase, on peut définir les périmètres affectés par le désastre, les implications sur les régions avoisinantes et sur le milieu ambiant. Les dégâts provoqués par une catastrophe sont établis en comparant le modèle 3D de référence construit avant la catastrophe par méthodes photogrammétriques (ZAVOIANU and NEDEELCU, 1997; ZAVOIANU *et al.*, 1997; GRÜN, 1996) et le modèle 3D construit après la catastrophe à partir des images vidéographiques prises en hélicoptère. Les changements constatés entre les deux modèles 3D sont analysés dans le cadre d'un système d'information 3D (SIT 3D). L'analyse détaillée des destructions (fissures intérieures, détérioration de l'ossature de bâtiments) ne

peut être effectuée que dans le cadre d'un système d'information technique 3D (SITh 3D) de référence (WEINDORF *et al.*, 1997) construit pour chaque bâtiment. Un tel système doit se trouver à la base de l'évaluation des dégâts provoqués par un désastre.

## **2.1. Création des modèles correspondant aux trois phases**

Le contenu en informations ainsi que le volume de données à traiter diffèrent d'une phase à l'autre. Compte tenu de ce fait et du déroulement des interventions en cas de catastrophe, les bases de données et les systèmes de gestion ont été organisés en fonction de ces phases.

### **2.1.1. Détection des changements à partir des images satellitaires**

Pour le premier niveau d'analyse des catastrophes naturelles en vue d'identifier les zones endommagées et d'étudier les effets de la catastrophe sur le milieu ambiant, on a utilisé des données satellitaires TM de Landsat et des données HRV de SPOT.

Il est indispensable, donc, de mettre en place un système mondial d'observation et de surveillance des désastres naturels qui a été proposé par KURODA and KOIZUMI (1996). La réalisation d'un tel système est réclamée par les nombreux dégâts provoqués par les désastres naturels dans toutes les zones géographiques de la Terre. Pour le traitement des images satellitaires, on a utilisé le logiciel Erdas Imagine et, pour l'établissement du SIT, le logiciel ARC/INFO. La technique de la détection des changements à l'aide des images satellitaires est bien connue. Les changements significatifs peuvent être mis en évidence par les méthodes suivantes : comparaison des images multidates d'un même capteur et régression de ces images multidates classifiées. C'est la première méthode qui a été utilisée après le traitement préliminaire des images multidates par rapport à une situation de référence constituée par la carte numérique. On y a mis en évidence les différences positives et négatives à l'aide d'un nouveau plan-image contenant les polygones à l'intérieur desquels des changements importants sont possibles. C'est dans ces polygones qu'il faut prendre les premières mesures d'intervention et de secours en vue de limiter les dégâts et d'éviter leur extension. Les résultats de l'analyse effectuée peuvent être facilement représentés sur une carte. Les tendances du phénomène ainsi que ses variations temporelles ne peuvent être mises en évidence car elles nécessitent plusieurs cycles de mesures en cas de glissements de terrain, d'inondations, d'incendies, etc. Il convient de signaler que l'efficacité de cette phase est limitée par la rapidité avec laquelle les images satellitaires parviennent à l'utilisateur.

### **2.1.2. Création des modèles 3D avant et après catastrophe**

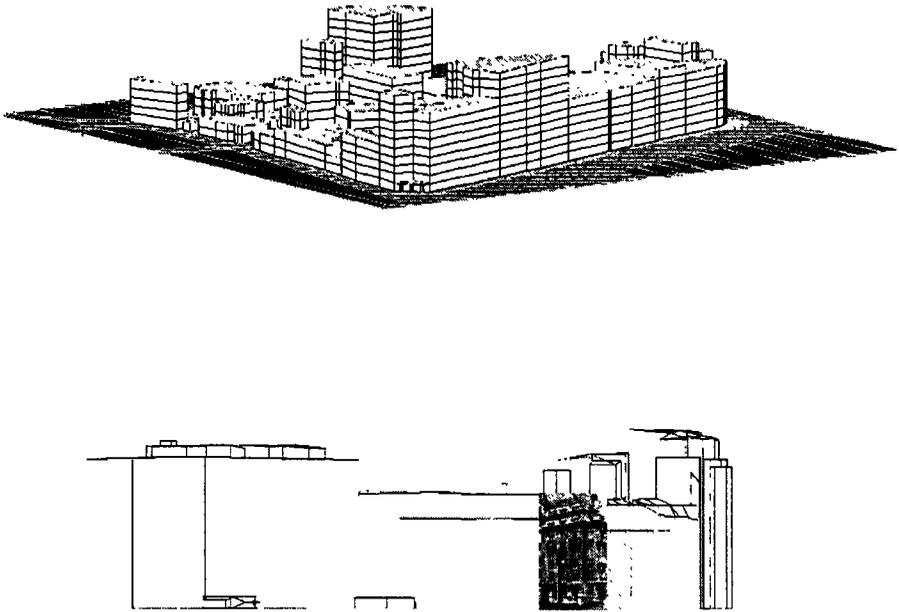
La phase ayant pour objet d'évaluer les dégâts se déroule sur la base du modèle 3D établi aussi bien avant qu'après la catastrophe. Le premier modèle, avant catastrophe, doit être établi pour toute la zone urbaine qui pourrait être affectée par un désastre naturel. Pour construire le modèle 3D, qui représente la situation de référence et qui peut être inséré dans le SIT 3D, on a eu recours à la photogrammétrie analytique sur la base de photographies analogiques. L'utilisation des images numériques ou numérisées peut être faite dans le cadre d'un processus automatisé ou semi-automatisé d'exploitation du stéréogramme. Dans notre cas, le modèle 3D a été créé à partir des photographies aériennes de 1994 à l'échelle du 1 : 6 000.

Les données obtenues en utilisant ces photographies ont été incomplètes car, dans les zones urbaines, les ombres et les contrastes des objets ne permettent pas d'identifier avec

précision tous les détails. Par la suite, ces données ont dû être complétées avec les données obtenues par numérisation des plans topographiques de la zone concernée à l'échelle du 1 : 2 000. Cette zone comprend trois grands ensembles du centre de la ville de Bucarest. Les bâtiments de cette zone, environ 120, de forme, de structure et de hauteur très diverses sont les plus anciens de la ville et leur ossature pourrait céder en cas de tremblement de terre. Les détails topographiques recueillis sur le stéréomodèle sont représentés par leur position planimétrique à laquelle sont ajoutés les éléments précisant les connexions et les voisins de chaque détail. Les attributs accompagnant chaque détail précisent ses caractéristiques. Les détails sont groupés par classes d'objets. Il y a ainsi des détails ponctuels, linéaires et de surface. La base de données est structurée topologiquement, les détails étant reliés entre eux par des entités comme les arcs, les noeuds et les faces. La base contient uniquement des données vectorielles. La création du modèle 3D après catastrophe doit s'effectuer en temps réel pour les zones où des changements importants ont eu lieu et ont été définis lors de la première phase. À cette fin, on doit utiliser les enregistrements vidéographiques réalisés à l'aide des moyens d'intervention rapide, soit hélicoptères ou avions légers de basse altitude. Afin d'établir le modèle 3D de la zone urbaine, les images vidéographiques exigent un traitement préliminaire et leur exploitation s'effectue automatiquement. Pour les travaux expérimentaux que nous avons entrepris dans le cadre de ce projet, on a effectué des prélèvements vidéographiques sur la zone testée en utilisant une caméra à haute résolution SVHS à trois altitudes : 80 m, 350 m et 500 m. Le processus technologique défini ainsi que les traitements afférents sont en cours de réalisation et de bons résultats sont à prévoir.

### **3. Détection des changements par la comparaison des deux modèles 3D**

En effectuant la comparaison entre le modèle 3D de référence et le modèle établi après catastrophe, les différences entre ces deux modèles ont conduit à l'établissement d'un nouveau modèle 3D avec des changements significatifs. Les changements positifs correspondent aux constructions ou aux reconstructions de la zone urbaine ou sont dus aux phénomènes naturels dans le cas des inondations. Les changements négatifs correspondent aux destructions provoquées par les tremblements ou autres phénomènes naturels. Ces changements doivent être analysés de façon détaillée en employant le modèle 3D à grande échelle. La précision avec laquelle on détermine les dégâts est liée à l'échelle des photographies utilisées. Le type de changements détectés se résume à des bâtiments ou à des parties de bâtiments écroulés; ils peuvent être directement déterminés par mesure sur stéréogrammes ou peuvent être déduits par photo-interprétation de l'image. Les phénomènes naturels (tremblements de terre et inondations) produisent des modifications profondes de la structure intérieure des bâtiments : fissures, déplacements, écroulement des parois, etc. Ces modifications seront mises en évidence en utilisant le SIT 3D construit pour chaque bâtiment. Pour l'établissement du système d'information SITH 3D, on doit utiliser les plans d'exécution, d'aménagement intérieur ainsi que les plans des divers réseaux (eau, chauffage, éclairage, téléphone, etc.) de chaque bâtiment. Ce SITH 3D sera complété avec les autres bases de données socio-économiques, démographiques, etc. L'analyse des modifications à ce niveau doit être effectuée par des travaux sur le terrain.



**Figure 1.** Le modèle 3D de la zone urbaine : a) représentation 3D d'un grand ensemble de la zone testée de la ville de Bucarest; b) exemple d'insertion de photographies terrestres des façades de bâtiments.

#### **4. Conclusion**

Dans cet article, on présente la méthodologie et les résultats préliminaires de l'évaluation des effets des catastrophes naturelles dans une zone urbaine. L'utilisation combinée des données fournies par la télédétection, des photographies aériennes et des levés sur le terrain permet une évaluation à la fois précise, rapide et efficace des effets des catastrophes naturelles. À l'avenir, nos préoccupations ont pour objet de mettre au point une méthodologie permettant d'établir le modèle 3D de façon automatique à partir des images vidéo-graphiques et de celles fournies par les satellites commerciaux à très haute résolution spatiale (0,82 m), reçues en temps réel.

#### **5. Remerciements**

Cette étude a été menée à la Faculté de géodésie de l'UTCB à l'aide du logiciel ERDAS et ARC/INFO mis à notre disposition par Geosystem Romania que nous remercions.

## 6. Références

- FRITZ, W.L. 1996. Commercial Earth Observation Satellites. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXI, Part B4, p. 273-282.
- GRÜN, A. 1996. Generierung und Visuelisierung von 3-D Stedtdmodellen. *OSIG/GISWISS Séminaire de Morges*, 16-17 avril, 1996, p. 31/1-31/14.
- KNYIHAR, A. and WINKLER, G. 1993. Environmental Information System and Remote Sensing. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 17, n° 3, p. 217-221.
- KONECNY, G. 1996. International Mapping from Space. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXI, Part B4, p. 465-468.
- KURODA, T. and KOIZUMI, S. 1996. Fifth International Research and Training Seminar on Regional Development Planning for Disaster prevention. 9-11 November 1991, Nagoya, Japan, 10 p.
- WEINDORF, M., VÖGTE, T. and BAHR, H.-P. 1997. An Approach for the Detection of Damages in Buildings from Digital Aerial Information. *in* F. Wenzel, D. Lungu and O. Novak (ed.). *Vrancea Earthquakes : Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*. Kluwer Academic Publishers, Karlsruhe, p. 341-348.
- ZAVOIANU, F., NEDELCU, C. et DINULESCU, L. 1997. Étude de la zone urbaine à l'aide du modèle 3D établi par des méthodes photogrammétriques. *Bulletin scientifique de l'Université technique de constructions de Bucarest*, n° 4, p. 31-43.
- ZAVOIANU, F. and NEDELCU, C. 1997. Urban Area 3-D Model Realized by Photogrammetric methods for Disaster Evaluation, Preliminary Results. *in* F. Wenzel, D. Lungu and O. Novak (ed.). *Vrancea Earthquakes : Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*. Kluwer Academic Publishers, Karlsruhe, p 333-339.