

Article

« Développement et défis de la télédétection urbaine »

Imane Sebari et Denis Morin

Cahiers de géographie du Québec, vol. 54, n° 151, 2010, p. 117-132.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/044369ar>

DOI: 10.7202/044369ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Développement et défis de la télédétection urbaine

Development and Challenges of Urban Remote Sensing

Desarrollo y desafíos de la teledetección urbana

Imane SEBARI et Denis MORIN
Département de géomatique appliquée
Université de Sherbrooke

Imane.Sebari@gmail.com
Denis.Morin@USherbrooke.ca

Résumé

La télédétection spatiale au Québec connaît ses débuts dans les années 1970. Elle va se développer grâce à trois principaux intervenants : le gouvernement, le secteur privé et les universités québécoises. Elle est appliquée dans plusieurs domaines dont l'étude du milieu urbain. L'objectif de cet article est de présenter les défis de la télédétection urbaine au Québec dans les années 1970 et 1980. Nous allons d'abord survoler l'histoire de la télédétection au Québec ainsi que les défis auxquels elle a dû faire face. Par la suite, nous abordons l'application de la télédétection urbaine au Québec avec présentation d'exemples d'études urbaines.

Mots-clés

Télédétection, milieu urbain, Québec.

Abstract

Remote sensing in Quebec appeared for the first time in the 1970s. It was developed mainly by three players; namely, the government, the private sector and the universities of Quebec. Remote sensing has several applications, among them the study of the urban milieu. The objective of this article is to describe the challenges of urban remote sensing in the 1970s and 1980s in Quebec. We begin with an overview of remote sensing in Quebec and the challenges it had to face; after, we show how urban remote sensing has been applied in the province, quoting examples drawn from urban studies.

Keywords

Remote sensing, urban area, Quebec.



Resumen

La teledetección en Quebec comienza en los años 1970 y se desarrolla gracias a tres participantes principales: el gobierno, el sector privado y las universidades quebequenses. Ella se emplea en varios dominios como en el estudio del medio urbano. El objetivo de este artículo es de presentar los desafíos que ese estudio tuvo que enfrentar en los años 1970 y 1980. Primeramente, hacemos un sobrevuelo de la historia de la teledetección en Quebec, luego abordamos la utilización de la teledetección urbana con ejemplos de estudios urbanos.

Palabras clave

Teledetección, urbano medio, Quebec.

L'histoire de la télédétection urbaine au Québec s'étudie en relation avec les développements technologiques qu'ont connus les capteurs satellitaires de télédétection. En effet, l'utilisation de la télédétection, au niveau international comme au Québec, progresse en fonction de l'évolution des performances techniques des capteurs satellitaires et de l'évolution des méthodes de traitement des images. Ainsi, la télédétection civile prend véritablement son orbite avec le lancement de Landsat en 1972. Pendant une dizaine d'années, la télédétection se développe à partir des images Landsat MSS issues de la première génération de satellites d'observation de la terre. Elle est utilisée principalement pour la gestion des ressources naturelles. Avec les capteurs Landsat TM et SPOT HRV, les résolutions spatiales et spectrales des données augmentent et leurs images sont utilisées dans une série d'applications autrefois réservées aux photographies aériennes, comme la cartographie topographique ou les études urbaines (Bonn et Rochon, 1992).

L'objectif de cet article est de présenter les défis de la télédétection urbaine au Québec dans les années 1970 et 1980. Nous allons d'abord survoler le contexte international et canadien lié au développement de la télédétection, avant de présenter la télédétection québécoise de cette période. Par la suite, nous aborderons la télédétection urbaine et les défis auxquels elle a fait face. Cette section sera suivie par la présentation de la contribution québécoise au développement de la télédétection urbaine, à l'aide d'exemples d'études réalisées sur le sujet.

La télédétection aux échelles internationale, canadienne et québécoise

Avant de parler de la télédétection urbaine au Québec dans cette période, il est utile de présenter les faits ayant marqué le développement de la télédétection en général dans les décennies 1970 et 1980, et ce, aux échelles internationale, canadienne et québécoise. Même si, dans cet article, nous nous intéressons à la télédétection satellitaire, il est intéressant de présenter le cheminement des développements qui ont conduit à l'utilisation de la télédétection en général, aérienne et satellitaire. Des détails enrichissants peuvent être trouvés dans Bonn et Rochon (1992), Provencher et Dubois (2007), Royer *et al.* (2007) ainsi que dans Morley (2009).



Contexte international

L'histoire de la télédétection commence par le développement de la photographie au début de XIX^e siècle, suivi par celui des plateformes aériennes d'acquisition des photographies, telles que les montgolfières. Ainsi, les premières photographies aériennes datent de 1858. Mais c'est en 1908 que des photographies sont prises à partir d'un avion, ce qui offre une vue plus globale des milieux. Des programmes de cartographie à l'aide de photographies aériennes sont mis en place. Un développement important va se produire à partir des années 1930 avec l'utilisation de la photogrammétrie et de la photointerprétation. La cartographie thématique du territoire débute au milieu des années 1960 dans la plupart des pays développés.

À partir de 1960, on assiste à l'apparition des photographies obtenues de plateformes orbitales comme les capsules Mercury, Gemini et Apollo. Dans la décennie suivante, la télédétection prend une nouvelle dimension avec le lancement, par la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), du satellite ERTS (devenu Landsat). Mis en service en 1972, ce satellite est muni d'un capteur MSS (*Multi Spectral Scanner*) qui produit des images avec une résolution spatiale de 80 m en quatre bandes spectrales. Il sera suivi par le satellite Landsat-4 et son capteur TM (*Thematic Mapper*) en 1982, et par le satellite français SPOT et son capteur HRV (Haute résolution visible) en 1986. Ces deux capteurs fournissent des images avec des résolutions spatiales plus fines. Ainsi, avec le capteur TM, la résolution spatiale est passée de 80 m à 30 m en mode multispectral (15 m en mode panchromatique) et les bandes spectrales explorées sont plus nombreuses (le visible, l'infrarouge proche, moyen et thermique). Le capteur HRV de SPOT offre une résolution de 10 m en mode panchromatique et de 20 m en mode multispectral (avec trois bandes spectrales). Le format numérique des images permet leur manipulation et leur traitement par des ordinateurs, chose qui n'était pas possible avec les photographies aériennes conventionnelles. Ainsi, des méthodes de traitement de ces données se développent principalement au début des années 1980. Ce développement coïncide avec celui de l'informatique, ce qui va profiter au traitement numérique des images. La télédétection satellitaire sera utilisée dans plusieurs domaines relatifs à la gestion des ressources naturelles, ainsi que pour certaines applications urbaines.

Contexte canadien

Le Canada se situe parmi les pays pionniers pour leur contribution au développement de la télédétection. Dès le début, le gouvernement canadien s'intéresse à la télédétection et à son développement en leur donnant un niveau de priorité élevé. Le Conseil des sciences du Canada considère même la télédétection comme un des six domaines de pointe où le pays peut assumer un rôle de premier plan à l'échelle internationale (Bonn, 1994).

Ainsi, plusieurs actions sont entreprises par le gouvernement du Canada qui, dans les années 1970 et 1980, investit des sommes importantes dans le développement des activités civiles de télédétection. Ces investissements sont affectés principalement à la recherche et au développement des nouvelles techniques de captage et de traitement des données (Rochon et Béné, 1989). Les principales utilisations de la télédétection par l'administration fédérale sont alors la surveillance des glaces, la



révision cartographique à moyenne et petites échelles, l'étude de l'occupation des terres ainsi que l'assistance technique et le transfert de technologie vers les pays en voie de développement.

C'est un comité national, le Comité consultatif canadien sur la télédétection, qui coordonne les efforts du gouvernement dans le développement de ces activités. En 1991, le Centre canadien de télédétection (CCT) est créé, contribuant à son tour au développement et à la promotion de la télédétection au Canada. Par la suite, des centres provinciaux de télédétection voient le jour en Ontario, au Manitoba, en Alberta et au Québec, pour participer à l'interprétation opérationnelle des données. À cause du sous-financement de ces organismes, leurs dirigeants essaient de convaincre les gestionnaires des ressources et de l'environnement d'utiliser les données de télédétection par l'intermédiaire de projets de démonstration (Morley, 2009). Plusieurs programmes de transfert de technologie mis en place par le CCT et les centres provinciaux visent principalement les utilisateurs chargés de la gestion des ressources naturelles (Bonn et Rochon, 1992).

Les investissements du gouvernement du Canada dans le développement et l'utilisation de la télédétection sont importants en comparaison de ses investissements dans d'autres domaines scientifiques (Rochon, 2007). Ils sont estimés à plus de 500 millions de dollars canadiens, du début des années 1970 à la fin des années 1980 (Rochon et Béné, 1989). Le concept de virage technologique est derrière une grande partie de ces investissements destinés aux universités et aux entreprises depuis 1980. Les efforts industriels au Canada portent sur la technologie des stations de réception, sur les systèmes de traitement d'images et sur l'industrie des services (Bonn, 1994).

La mise en marche du programme RADARSAT, en 1980, influence les activités de télédétection au Canada. Financé par plusieurs ministères fédéraux et certaines provinces, dont le Québec, ce programme est mis en place pour répondre à des besoins, dont la surveillance des glaces pour la navigation (Rochon, 2007). En 1989, l'Agence spatiale canadienne le prend en charge.

À la fin des années 1970, et dans le cadre de l'initiative canadienne de recherche et de développement pour évaluer la technologie *Pushbroom Imager*, les prototypes des systèmes aéroportés MEIS II et DAEDALUS MSS sont développés pour le Centre canadien de télédétection sous contrat avec McDonald Dettwiller et Associés de Vancouver. Le capteur MEIS II est le premier capteur à barrettes sur une plate-forme aéroportée. Il capte en huit bandes spectrales programmables. La possibilité qu'offre le capteur MEIS-II de choisir les bandes s'avère utile pour la recherche et le développement des systèmes de capteurs (Centre canadien de télédétection, 2008). Le capteur DAEDALUS MSS est exploité pour la thermographie aérienne et l'étude de l'isolation thermique des bâtiments (Bonn, 1981). Entre 1983 et 1986, près de 200 missions sont accomplies avec les capteurs MEIS II et DAEDALUS MSS, au Canada, aux États-Unis et en Australie. Depuis 1986, ces deux types de capteurs et l'appareillage électro-optique sont exportés par l'industrie, notamment Innotech Aviation Entreprise Limited de Montréal pour des applications commerciales (Jordi, 1996).

Pour l'imagerie hyperspectrale, le capteur CASI, produit en 1989 par ITRES Researches (Calgary, Canada), est le premier imageur à spectromètre commercial (Centre canadien de télédétection, 2008). Il enregistre 288 canaux programmables dans

les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge et utilise un système d'imagerie numérique à barrettes. La manipulation et le traitement des images hyperspectrales nécessitent des techniques adaptées (Edwards *et al.*, 1991). Dès son introduction, le système est utilisé dans le monde entier par les agences gouvernementales, les instituts éducatifs, les compagnies privées, les agences internationales de l'espace et les organismes militaires.

La télédétection au Québec

Les décennies 1970 et 1980 vont voir le début du développement de la télédétection au Québec. Plusieurs intervenants contribueront à ce développement : le gouvernement, les universités, le secteur privé et certains organismes francophones.

Le gouvernement québécois

Le gouvernement québécois s'intéresse très tôt aux retombées potentielles de la télédétection et manifeste une volonté pour le développement de cette technologie. En 1974, un coordonnateur provincial est désigné au ministère des Terres et Forêts. Le ministère de l'Énergie et des Ressources prend ensuite la relève et assume depuis la responsabilité de la télédétection auprès du gouvernement.

En 1976, est créé le Centre québécois de coordination de la télédétection (CQCT). Ce Centre se rattache au Service de la cartographie du secteur Terres du ministère de l'Énergie et des Ressources. Par des projets pilotes, il vérifie concrètement les capacités de la télédétection à répondre à des besoins spécifiques d'inventaire et de gestion du territoire (Centre de télédétection du Québec, 1992). Il assume aussi le rôle de conseiller auprès du gouvernement sur des dossiers administratifs touchant la télédétection. Malheureusement, le Centre n'obtient aucun mandat gouvernemental précis (Rochon et Béné, 1989). Ses ressources sont fort limitées, qu'elles soient humaines (trois personnes en 1988) ou financières (budget annuel inférieur à 250 000 \$). En 1991, l'organisme devient le Centre de télédétection du Québec.

Le gouvernement québécois participe également au développement du programme canadien RADARSAT. En effet, la mise en marche de ce programme nécessite une enveloppe de 450 millions de dollars. Le Québec y contribue pour 32 millions, en partie pour assurer l'exécution de certains contrats par SPAR Aerospace, dont le siège social est à Montréal (Rochon, 2007).

Les principaux clients de la télédétection sont les organismes gouvernementaux. Divers ministères y ont recours pour des projets d'application. Certaines sociétés d'État telles qu'Hydro-Québec, Rexfor, Soquem et Soquip manifestent aussi un intérêt grandissant pour l'utilisation de la télédétection (Rochon et Béné, 1989).

Il est à signaler que, dans la fonction publique fédérale, les Québécois sont presque totalement absents des activités relatives à la télédétection. Leur rôle dans l'évolution de cette technologie au sein du gouvernement canadien est marginal (Rochon et Béné, 1989). C'est le cas également au Centre canadien de télédétection, où les Québécois sont presque absents du personnel, avec toutefois une représentation dans la Division du développement des applications. Cette situation se reflète dans les contrats alloués au secteur privé (Rochon, 2007).



L'industrie

En effet, le développement des industries de télédétection au Québec est affecté par le déséquilibre important dans la répartition des contrats de recherche fédéraux en faveur de l'Ontario (Bonn et Rochon, 1992). Les entreprises œuvrant en télédétection au Québec sont présentes dans le domaine de la fabrication de satellites (SPAR), celui des services (DIGIM-Lavalin, SNC-Progert, SM-Aménatech) et celui des logiciels (ACDS, Octographe). La réussite de certaines d'entre elles est attribuable à des contrats à l'extérieur du Québec et à l'international. Les entreprises, surtout du domaine des services, s'orientent progressivement vers les marchés internationaux. La seule entreprise québécoise dont le chiffre d'affaires dépasse alors le million de dollars est Digim Inc. (Rochon et Bénéié, 1989).

Les universités

Les universités québécoises offrent des programmes de formation et de recherche de haut niveau en télédétection (Bonn et Howarth, 1986). Elles ont des activités et des ressources connexes qui les situent avantageusement dans le contexte canadien. Elles participent au développement de la télédétection depuis le début des années 1960. Le premier cours de télédétection au Québec se donne en 1965 au Département de géographie de l'Université McGill. Les autres universités suivent (Laval, Sherbrooke, Montréal, Centre Eau Terre Environnement (ETE) de l'NRS, UQAM et UQAC). Ainsi, divers cours de télédétection sont offerts à différents niveaux de formation selon les universités, principalement dans les départements de géographie. Un cheminement en télédétection apparaît dès 1988 au niveau de la maîtrise, suivi en 1989 par un doctorat en télédétection au Département de géographie (actuellement Département de géomatique appliquée) de l'Université de Sherbrooke.

En recherche, des concentrations en télédétection existent à l'Université Laval, à l'Université de Montréal, à l'Université de Sherbrooke et à l'INRS-ETE. Les domaines de recherche liés à la télédétection se diversifient. Ainsi, à l'Université Laval, la recherche porte sur le développement de méthodes de traitement numérique des images satellitaires, sur leur application aux ressources en eaux et en forêts de même que sur leur intégration dans des SIRS (système d'information à référence spatiale). À l'Université de Montréal, les travaux de recherche touchent principalement l'étude des milieux nordiques et la cartographie thématique. L'intégration de la télédétection au processus de gestion des eaux fait l'objet de plusieurs études à l'INRS-ETE. À l'Université de Sherbrooke, les axes de recherche concernent la modélisation atmosphérique et l'application à des mesures de réflectance spectrale, la télédétection par radar et application à l'identification des cultures, la thermographie, intégration de la télédétection dans les SIRS, etc. En 1985, le Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL) est créé. Il œuvre depuis dans les domaines du développement des outils et des méthodes d'analyse en télédétection. Ce centre de recherche, rattaché à la Faculté des lettres et sciences humaines de l'Université de Sherbrooke, est considéré comme l'organisme ayant les activités et les ressources en télédétection les plus importantes au Canada (Rochon et Bénéié, 1989). Plus d'un million de dollars de subventions et de contrats sont recueillis annuellement par cette institution.

Les chercheurs québécois participent à de nombreuses études régionales utilisant la télédétection. Ils bénéficient de subventions et de contrats de recherche. La recherche et la formation sont financées par les deux gouvernements, fédéral et provincial (Bonn et Howarth, 1986). Deux organismes, principalement appuient la formation et la recherche universitaire. Au niveau fédéral, le Conseil national de recherches, remplacé en 1978 par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), appuie la recherche et la formation avancée en milieu universitaire, dans le secteur des sciences naturelles et du génie. Au Québec, le Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR), créé en 1984, aide au développement scientifique et technologique du Québec. Des projets de coopération institutionnelle et internationale sont lancés. Les chercheurs reçoivent aussi une collaboration et un appui bien marqués de la part de la communauté de télédétection, particulièrement des États-Unis et de France, ce qui joue un rôle important dans le développement de la télédétection au Québec (Rochon, 2007). Des ententes de collaboration entre universités et entreprises privées existent. C'est le cas de l'Université Laval et l'Université de Sherbrooke avec l'entreprise Digim inc. spécialisée dans le traitement numérique des images et qui soutient le développement de logiciels.

Apport de la francophonie

La collaboration d'organismes francophones internationaux contribue aussi à l'essor de la télédétection au Québec. En effet, une place prioritaire est donnée à la télédétection en francophonie, et ce, dès 1967. Deux organisations sont impliquées : l'Agence de coopération culturelle et technique (ACCT) et l'Université des réseaux d'expression française (UREF). La première administre des projets destinés aux intervenants gouvernementaux et industriels des pays francophones. Quant à l'UREF, elle encourage les activités d'enseignement et de recherche avec la mise en place de réseaux thématiques, de programmes de bourses et de subventions à la recherche partagée (Bonn et Rochon, 1992).

Dans ce cadre de la francophonie, le Réseau télédétection de l'agence universitaire de la francophonie est fondé en 1988. Son siège social est à Montréal. Depuis sa mise en place, il a pour mission de favoriser les échanges entre les organismes francophones œuvrant dans le domaine de la télédétection et d'encourager les chercheurs à présenter à la communauté scientifique leurs résultats de recherche sur des thématiques importantes pour le Réseau. Entre 1988 et 1991, des Journées scientifiques se tiennent chaque année afin de créer le plus rapidement possible un lien entre les chercheurs (Dubois, 1997).

On note que, dès 1975, la Société québécoise de télédétection s'organise en association : l'Association québécoise de la télédétection (AQT), dont le but est de favoriser le développement de la télédétection par différents moyens d'action. L'AQT regroupe des membres de l'administration publique, de l'éducation et de la recherche ainsi que du secteur privé.

La télédétection urbaine au Québec

L'imagerie satellitaire représente une source intéressante d'information sur l'espace urbain. Elle fournit une vue d'ensemble du territoire, non schématique comme celle offerte par les cartes. La fréquence de passage du satellite constitue un avantage pour la



mise à jour des cartes d'utilisation du sol ainsi que pour le suivi de l'étalement urbain. Le format numérique des images permet leur traitement par ordinateur, et le recours à des méthodes numériques de traitement d'image offre un gain de temps considérable. L'imagerie satellitaire fournit une information sur la nature et les fonctions de l'utilisation du sol, son évolution dans le temps et dans l'espace. Ces aspects et bien d'autres montrent l'importance de la télédétection pour divers intervenants en milieu urbain, qu'ils soient urbanistes, planificateurs ou cartographes.

Néanmoins, durant les décennies 1970 et 1980, on a moins recours à la télédétection dans un contexte urbain que dans les autres domaines relatifs aux ressources naturelles. Les applications de la télédétection urbaine restent limitées. Deux principaux facteurs entravent l'utilisation des images satellitaires en milieu urbain : d'une part, les spécificités du milieu urbain et, d'autre part, les caractéristiques techniques des images disponibles en cette période.

Spécificités du milieu urbain et caractéristiques des images satellitaires existantes

Le milieu urbain se caractérise par la complexité et l'hétérogénéité de sa surface. Les objets ont des dimensions très variables, avec une densité et une diversité importantes. Les matériaux de construction sont hétérogènes : les objets d'une même classe, par exemple les bâtiments, peuvent être faits de différents matériaux. Par conséquent, on observe une grande confusion spectrale entre certaines classes d'occupation du sol, et la discrimination spectrale entre les classes s'avère difficile.

Donc, pour qu'on puisse identifier chaque classe, les images satellitaires doivent offrir le niveau de précision requis, tant géométrique que sémantique. La résolution spatiale optimale pour l'étude des constituants de l'espace urbain peut être choisie selon leur taille, leur densité et leurs contrastes. En Amérique du Nord, avec des agglomérations urbaines de grande taille et de faible densité, une résolution spatiale de 20 à 30 m est adéquate (Welch, 1982). Les caractéristiques techniques des premières images satellitaires existantes à cette période (décennies 1970 et 1980) n'encouragent pas leur utilisation dans les études urbaines. La faible résolution spatiale des images MSS (de l'ordre de 80 m) fournit un niveau de détail limité pour l'analyse de l'espace urbain. Il est difficile de réaliser des applications performantes dans ce domaine avec ces images. Celles-ci sont plus adaptées à l'analyse des espaces naturels, généralement vastes et homogènes. C'est donc avec les images de Landsat-4 TM qu'apparaissent les applications opérationnelles de la télédétection urbaine. Leurs résolutions spatiale (30 m) et spectrale (7 bandes) sont intéressantes et rendent possible des travaux comme la détection de l'emprise de l'urbanisation ou l'avancée du front urbain au détriment de l'espace agricole ou naturel (Donnay *et al.*, 2000). L'arrivée du capteur SPOT HRV au milieu des années 1980 permet à la télédétection urbaine de s'affirmer encore plus. Sa résolution spatiale de l'ordre de 10 m (en mode panchromatique) permet d'identifier plus de détails. Il présente des possibilités intéressantes pour une détection plus fine des classes d'occupation du sol et pour la révision des données cartographiques. Néanmoins, la résolution spectrale de SPOT est considérée faible (trois bandes spectrales comparativement à sept pour Landsat TM).

Traitement des images satellitaires

Du capteur MSS au capteur HRV de SPOT, en passant par TM, la résolution spatiale s'améliore nettement; cela permet d'observer un niveau de détail significativement plus important. Avec une interprétation visuelle, une résolution spatiale plus fine rend possible une meilleure identification et une meilleure discrimination de l'occupation du sol. Ainsi, une première méthode d'exploitation des images satellitaires est leur interprétation de manière conventionnelle par des photointerprètes thématiques, comme avec les photographies aériennes. L'utilisation de tables à numériser permet d'obtenir un résultat vectoriel d'interprétation sous format numérique. Des cartes d'occupation du sol sont élaborées de cette manière; on parle d'interprétation d'image assistée par ordinateur.

Le format numérique des images satellitaires offre la possibilité de traitement par ordinateur. Des méthodes appropriées sont développées dans ce sens, par exemple, la classification d'image, un traitement qui permet d'affecter chaque pixel de l'image à une classe thématique. Différentes méthodes de classification sont en voie d'élaboration.

Toutefois, cette apparition des images issues du capteur HRV de SPOT ou de Landsat-4 TM présente aux utilisateurs des défis méthodologiques importants (Bonn *et al.*, 1989). En effet, sur ces nouvelles images, la quantité d'information disponible est décuplée par rapport à Landsat MSS et la nature de cette information se trouve modifiée en comparaison de ce qu'on connaissait dans les satellites précédents (*Ibid.*). Un objet n'est plus représenté par un seul pixel, mais plutôt par un ensemble de pixels, et ceux-ci n'ont pas nécessairement la même valeur spectrale. La variabilité spectrale des surfaces est donc plus importante avec une résolution spatiale plus fine.

De ce fait, les méthodes de traitement d'image applicables jusque là à des images MSS ne donnent pas de résultats satisfaisants avec des images TM ou HRV pour l'étude du milieu urbain (Coulombe *et al.*, 1989). Elles ne sont pas adéquates pour classifier des environnements montrant une grande variance spectrale interne tels que l'environnement urbain. La grande variabilité spectrale présente dans ces images diminue la séparabilité statistique des classes de l'occupation du sol dans l'espace spectral, ce qui aboutit à une confusion plus importante entre les classes et, par conséquent, diminue les précisions de la classification. La quantité importante de détails crée de nouveaux problèmes pour l'extraction de l'information par des techniques automatiques de classification (Marceau *et al.*, 1990). Les valeurs spectrales à elles seules ne permettent pas la discrimination des différents types de surface. Des solutions plus adaptées à ce contexte sont proposées. Dans ce sens, certaines méthodes intègrent de nouvelles informations dans le traitement, comme l'information texturale (Coulombe *et al.*, 1989), ou utilisent des connaissances *a priori* (Thibault et Cavayas, 1989).

Quelques exemples d'études urbaines

Comme il a été dit auparavant, les applications de télédétection menées au Québec en cette période se focalisent plus sur l'inventaire et la gestion des ressources naturelles, particulièrement forestières, agricoles et relatives à l'eau. Les études urbaines exploitant les images satellitaires au Québec concernent principalement l'expansion urbaine, la cartographie du sol urbain et la mise à jour des cartes urbaines.



Mesure de l'évolution de l'emprise urbaine

Les villes, en général, connaissent des extensions et des changements en raison du développement urbain. Les images satellitaires constituent une source d'information intéressante pour suivre ce développement. Les premières utilisations avec les images Landsat concernent la détection de l'emprise de l'urbanisation ou l'avancée du front urbain (Donnay *et al.*, 2000). Ces images sont exploitées pour étudier l'expansion des villes, quantifier et suivre la progression des zones urbaines au détriment des zones rurales.

Dans cette optique, Charbonneau *et al.* (1986) ont étudié l'expansion urbaine de Montréal par l'interprétation et l'analyse des images Landsat MSS et TM entre 1972 et 1982. Leur objectif était de mesurer l'évolution de l'emprise urbaine, incluant ses variables locales, et d'estimer l'importance de l'urbanisation pour la région d'étude. L'apport des deux capteurs MSS et TM est complémentaire : l'analyse diachronique sur MSS permet de bien distinguer l'évolution de la zone urbaine ainsi que celle de la densification de l'occupation. La distinction des grandes unités fonctionnelles comme l'habitat résidentiel, les zones industrielles ou commerciales et les espaces verts, est réalisée avec les images TM.

L'étude s'est ensuite intéressée aux changements dans l'utilisation du sol à partir des images MSS de trois régions urbaines, Montréal, Ottawa et Québec entre 1972 et 1988 (Royer *et al.*, 1988). Elle a révélé des taux d'urbanisation de 70 % pour Montréal, 40 % pour Québec et 11 % pour Ottawa. Les chercheurs ont montré que cette urbanisation affecte le climat régional. Ainsi, les variations temporelles de l'albédo et de l'indice de végétation normalisé sont déterminées à partir des images Landsat MSS. L'analyse de ces paramètres avec les variations météorologiques a montré une diminution de l'albédo moyen annuel à cause du processus de l'urbanisation, de la déforestation et de la diminution des terrains agricoles. Les fluctuations annuelles de l'indice de végétation sont en relation avec les précipitations annuelles, l'évapotranspiration et la radiation solaire globale.

La thermographie aérienne

En 1978, le Bureau des économies d'énergie du gouvernement du Québec décide de réaliser un projet pilote de thermographie aérienne appliquée à l'isolation des maisons. La ville de Joliette (Québec) est choisie pour ce projet. L'interprétation est réalisée pour 1500 maisons, sous forme d'entrevues avec les propriétaires. Les images utilisées pour l'interprétation sont prises la nuit par le capteur DAEDALUS dans l'infrarouge thermique. Une couverture photographique du lendemain de l'acquisition des images satellitaires est réalisée pour faciliter la localisation des édifices. Résultat : 60 % des maisons présentent des défauts d'isolation visibles sur les thermographies. Même si l'analyse visuelle des thermographes est jugée difficile à cause de la connaissance imprécise des émissions, la thermographie aérienne des pertes de chaleur des maisons est un outil qui peut s'avérer utile pour un programme national d'économie d'énergie. Le coût de l'acquisition des données et de l'interprétation fait de la thermographie aérienne un outil adéquat pour le diagnostic de la qualité d'isolation des bâtiments d'une ville (Bonn, 1981).

Cartographie de l'occupation du sol

Au milieu des années 1980, la télédétection sert à assurer un suivi continu de l'occupation du sol urbain. Son utilisation permet la discrimination entre l'urbain et le périurbain ainsi que la cartographie des tissus urbains (résidentiel, commercial, etc.).

Dans l'étude menée par Carignan *et al.* (1987), le potentiel des images Landsat pour l'analyse du milieu urbain a été évalué. Les auteurs ont utilisé des images de la région de Montréal (Québec) datant de 1982 : une image prise par le capteur MSS de Landsat-3 et une autre acquise par le capteur TM de Landsat-4. Ils ont évalué le potentiel de ces images, d'une part, pour la photointerprétation des composantes urbaines et, d'autre part, pour la cartographie thématique du territoire par classification automatique. Dans le premier cas, les images utilisées étaient rehaussées, puis interprétées visuellement. En comparaison avec l'image MSS, le niveau de détail amélioré de l'image Landsat TM a permis la distinction du tissu urbain ainsi que les principales fonctions urbaines. Pour la classification automatique, la méthode maximum de vraisemblance a été utilisée. Les classes d'intérêt étaient celles correspondant aux principales fonctions urbaines de Montréal (commerciale, industrielle, résidentielle, publique et communication). Des surfaces caractéristiques de chacune de ces fonctions étaient choisies comme zones d'entraînement. Les résultats étaient confrontés aux données planimétrées du ministère des Affaires municipales (MAM). Ainsi, l'occupation urbaine globale a été bien identifiée et quantifiée (97 %). Cependant, la confrontation de chaque classe avec les données du MAM a révélé des écarts qui variaient de 8 % (surfaces végétales) à 60 % (fonction communication). La résolution spatiale du capteur TM n'a pas contribué à améliorer les résultats de la classification par rapport à ceux de MSS.

Les images SPOT HRV, avec leur résolution spatiale améliorée, sont prometteuses pour une cartographie de l'occupation du sol plus précise qu'avec les images Landsat. Toutefois, leur traitement avec les méthodes appliquées jusqu'ici sur les images Landsat produit des résultats insatisfaisants. Ces méthodes sont basées sur les valeurs spectrales des pixels de l'image et sont plus adaptées pour cartographier les zones dont la variance radiométrique est relativement stable. Des confusions importantes s'observent sur la classification des images SPOT du milieu urbain. Ainsi, dans les années 1980, les applications concernant la cartographie de l'occupation du sol à l'aide des images SPOT cherchent à élaborer des nouvelles méthodes pour atteindre une cartographie précise. Le recours à l'information à titre complémentaire se présente comme solution. L'analyse de texture apparaît mieux adaptée à ces images, notamment dans un environnement urbain. En effet, elle prend en considération la distribution spatiale des pixels à l'intérieur des images, une information jugée convenable pour caractériser le sol urbain (Lejeune *et al.*, 1987).

Coulombe et ses collaborateurs (1989), dans une étude sur la ville de Sherbrooke, proposent d'intégrer l'analyse de texture dans le processus de classification automatique des images SPOT. Leur but est de détecter l'utilisation du sol en milieu urbain. Les classes d'intérêt sont le commercial, le résidentiel, les espaces verts, la friche, la forêt, l'agriculture et l'eau. Ils utilisent des images satellitaires SPOT HRV en mode panchromatique et en mode multispectral acquises le 25 octobre 1986. Les images texturales sont créées par l'application d'une fenêtre mobile sur l'image panchromatique. Elles s'intègrent à l'image multispectrale à l'aide d'une classification dirigée.



Les résultats des classifications sont comparés aux cartes de données de terrain afin d'évaluer l'apport de l'intégration de la texture. Les résultats montrent une amélioration dans la discrimination des tissus urbains par rapport à une classification spectrale. Par exemple, les taux de classification pour le commercial et pour le résidentiel augmentent de près de 8 % et de 23 % respectivement. Cette méthode améliore la discrimination entre le commercial et le résidentiel et entre la zone urbaine et le périurbain. Mais la confusion entre classes est toujours présente.

Planification urbaine

La télédétection peut répondre à certains besoins des planificateurs urbains. Ainsi, elle contribue à la planification urbaine comme nouvelle source d'information. Des outils et des documents utiles pour l'administration municipale ont pu être développés et réalisés à partir d'images satellitaires. Le travail de Charbonneau *et al.* (1989) peut être cité comme exemple. Les auteurs de l'étude ont exploité des images satellitaires pour l'établissement d'une spatiocarte, un document qui superpose des informations cartographiques à une image satellitaire. La spatiocarte donne ainsi une fidèle représentation et une vue d'ensemble du territoire, la zone d'étude étant l'agglomération de Sherbrooke (Québec). Les chercheurs ont travaillé sur des images SPOT HRV en modes panchromatique et multispectral qu'ils ont considérées comme satisfaisant aux spécifications spatiales des études en aménagement urbain. Les images panchromatiques et multispectrales ont d'abord été fusionnées pour donner un produit de qualité visuelle améliorée pour la photointerprétation et la mise à jour des cartes d'affectation du sol. Les limites des secteurs de recensement pour la ville de Sherbrooke, sous format numérique, sont utilisées comme information cartographique à superposer aux données satellitaires. D'autres données statistiques ont été prises en compte, comme la population, la superficie, la densité, le nombre total de permis de construire, etc. La superposition des deux documents se fait par une correction géométrique. Le produit est considéré comme une source additionnelle d'information pour le monde municipal. Les fonctions urbaines y sont déduites à partir de l'interprétation des types de couverture du sol. L'analyse visuelle se réfère aux mêmes notions (teinte, forme, texture, arrangement spatial) que la photographie aérienne. La spatiocarte produite par l'intégration des données cartographiques à une image satellitaire s'avère un mode de représentation relativement nouveau nécessitant peu de manipulations numériques pour leur traitement.

Révision cartographique

Le potentiel cartographique des images satellitaires a fait l'objet de plusieurs études. Nous pouvons citer celle menée par Baudouin (1985) sur le potentiel cartographique des images SPOT, qui correspond aux critères de précision géométrique de la cartographie au 1 : 50 000. L'étude menée par Charbonneau *et al.* (1989) cherche aussi à évaluer l'apport des données SPOT au Programme canadien de révision cartographique, plus précisément pour l'extraction des éléments planimétriques des cartes topographiques au 1 : 50 000. Des images SPOT de la région de Sherbrooke sont utilisées : une image multispectrale acquise à l'été 1987, une autre acquise à l'automne 1986 en modes multispectral et panchromatique et une image panchromatique prise à l'hiver 1987. Les auteurs ont cherché à détecter les détails planimétriques présents

sur une carte topographique de 1 : 50 000. Dans cet objectif, ils ont présenté, pour chaque catégorie de détails planimétriques, des méthodes de rehaussement d'images adaptées en vue d'améliorer la qualité visuelle des images satellitaires et leur intégration à la carte topographique. Ils ont conclu que la détection des ensembles zonaux et linéaires ne présente pas de grandes difficultés. Ainsi, la détection des éléments comme « agglomération urbaine » ou « route » a été réalisée sur toutes les images sans nécessiter de traitements particuliers. Les problèmes se sont posés dans la mise au point de traitements spécifiques pour les détails de petite taille représentés par des variables ponctuelles, comme les bâtiments. La résolution spatiale a constitué une contrainte pour la détection de ces éléments.

Mise à jour cartographique automatique

La planification et la gestion urbaine nécessitent toujours une information fiable à jour pour une prise de décision efficace. En effet, il est important que les cartes et les divers documents soient le plus à jour et le plus exacts possible. Les images satellitaires participent à cette mise à jour. Elles ont l'avantage d'offrir une vue globale sur le milieu. Leur traitement dans un processus automatisé contribue à réduire les temps de réalisation et génère des produits améliorés.

L'étude menée par Thibault et Cavayas (1989) s'inscrit dans ce contexte d'utilisation de l'imagerie satellitaire pour la mise à jour cartographique. Elle s'inscrit aussi dans le cadre des travaux qui ont proposé de nouvelles solutions pour le traitement des images SPOT avec des systèmes basés sur des connaissances *a priori*. Ces derniers permettent de classifier les caractéristiques principales de l'image, d'utiliser une base de connaissances et de présenter les données classifiées de façon plus accessible.

Ainsi, Thibault et Cavayas ont cherché à mettre à jour les cartes d'occupation du sol à partir des images SPOT en proposant un processus automatisé. Ce processus consiste d'abord à détecter les changements produits et, par la suite, à identifier la nature de ces changements. La méthode de détection des changements est guidée par des documents cartographiques. Les différents types d'utilisation du sol se délimitent à partir de la carte dans un processus de numérisation. Les polygones ainsi définis servent à la segmentation de l'image. Les objets créés sont caractérisés par des paramètres spectraux et texturaux et par des mesures de forme. Les propriétés de chaque polygone sont comparées avec les propriétés de la classe d'occupation du sol. Un polygone est considéré changé s'il y a une différence entre ses propriétés et celles de la classe d'origine.

Pour identifier la nature des changements, un modèle de prévision des changements est utilisé. Il se base sur la nature du polygone, sa localisation, ses voisins et autres critères de contexte qui établissent une priorité probable de la nouvelle nature du polygone ayant subi des modifications. Les propriétés de ce dernier sont comparées à celles des classes les plus probables. La décision relève de l'interprétation de l'opérateur.

Comme dernier exemple d'application de la télédétection urbaine, citons le travail de Baudouin et Cavayas (1991) sur la mise à jour de cartes d'occupation du sol à partir d'images satellitaires. Leur travail n'entre pas dans la période d'intérêt de notre article (décennies 1970 et 1980), mais il est intéressant de voir l'évolution des méthodes de traitement d'image en milieu urbain. Ainsi, ces chercheurs ont développé un système



prototype d'interprétation automatique des images satellites en milieu urbain. Ils ont travaillé sur des images SPOT HRV panchromatiques des années 1987 et 1989 de Montréal. Leur objectif était de développer une méthode permettant l'identification, à partir d'images satellitaires, des différentes fonctions urbaines selon le système de classification utilisé par le Service de la planification du territoire de la Communauté urbaine de Montréal. Ce système est fondé sur l'analyse des images satellitaires, de documents cartographiques existants et d'informations contextuelles, principalement morphologiques, du milieu urbain. Beaudouin et Cavayas ont utilisé l'îlot comme unité élémentaire de traitement, au lieu du pixel. De plus, leur analyse reposait sur une série de règles d'interprétation plutôt que sur des règles de classification. Différentes informations ont été prises en compte : teinte, asymétrie, texture, etc. Ils ont utilisé un système de classification hiérarchisée. L'analyse de l'ensemble des données et attributs permet d'identifier la nature de l'occupation de chaque îlot. Le système comprend six modules : la base de données, l'extraction des entités, l'extraction des paramètres par îlot, la caractérisation des paramètres, l'étiquetage des îlots ainsi que la mise à jour. Avec leur système, 86 % des îlots ont été bien identifiés. L'exploration d'autres paramètres est envisageable pour résoudre les situations qui restent confuses. Les résultats obtenus montrent l'adéquation d'une telle approche avec la problématique étudiée.

Conclusion

Durant les années 1970 et 1980, la télédétection urbaine au Québec suit bien les tendances des pays développés, malgré les défis que cela représente. En comparaison de la détection en milieu naturel, l'utilisation de la télédétection pour l'étude du milieu urbain reste cependant timide. Elle est subordonnée aux caractéristiques des images satellitaires existantes à cette période et à leur capacité de représenter les détails urbains. Les méthodes de traitement numérique s'adaptent à ce contexte en intégrant de nouvelles informations et connaissances. Les applications urbaines de la télédétection satellitaire concernent principalement la cartographie de l'occupation du sol, le suivi de l'étalement urbain et la mise à jour cartographique.

De façon générale, la complexité de l'environnement urbain et la spécificité des images satellitaires disponibles rendent l'utilisation de la télédétection urbaine, au Québec comme ailleurs dans le monde, moins performante que d'autres domaines d'application. À partir des années 1990, cette application va toutefois connaître un développement remarquable. L'avènement des images à très haute résolution spatiale contribuera à une utilisation plus importante de la télédétection en milieu urbain avec des applications encore plus innovantes.

Bibliographie

- BAUDOUIN, Alain (1985) Le potentiel des images SPOT pour la cartographie topographique et numérique. *Société française de photogrammétrie et télédétection*, vol. 100, n°4, p. 67-78.
- BAUDOUIN, Yves et CAVAYAS, François (1991) Système prototype d'interprétation automatique des images satellites en milieu urbain. Dans Paul Gagnon (dir.) *Télédétection et gestion des ressources*, comptes rendus du septième congrès de l'Association québécoise de télédétection, Montréal, 23-25 octobre, p. 163-167.
- BERNIER, Monique, BONN, Ferdinand et GAGNON, Paul (1989) *Télédétection et gestion des ressources*. Comptes rendus du sixième congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke, 4-6 mai 1988.
- BONN, Ferdinand (1981) Thermographie aérienne et isolation des bâtiments : problèmes d'interprétation et limites de précision. *Photo-interprétation*, vol. 6, n° 1, p. 4-10.
- BONN, Ferdinand (1994) *Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone*. Québec, Presses de l'Université du Québec et Agence de coopération culturelle et technique.
- BONN, Ferdinand et HOWARTH, Philip J. (1986) *Les programmes d'enseignement de la télédétection au Canada*. Rapport soumis au Groupe de travail sur la formation, Ottawa, Comité consultatif canadien sur la télédétection.
- BONN, Ferdinand, CHARBONNEAU, Lise et BROCHU, Richard (1989) Analyse de l'utilisation du sol à partir des données SPOT et TM : aspects méthodologiques. Dans Jean-Marie Dubois et Pierre Lafrance (dir.) *Télédétection en francophonie : bilans régionaux et thématiques*. Actes des premières Journées scientifiques de l'AUPELF, Sherbrooke, 10-12 octobre 1988, Paris, Éditions John Libbey Eurotext/AUPELF, p. 83-92.
- BONN, Ferdinand et ROCHON, Guy (1992) *Précis de télédétection, vol. 1 – Techniques et méthodes*. Québec et Montréal, Presses de l'Université du Québec/AUPELF.
- CARIGNAN, Maurice, MORIN, Denis, BROCHU, Richard et ROYER, Alain (1987) Évaluation du potentiel de la télédétection spatiale pour l'étude du milieu urbain : le cas de Montréal. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 14, p. 111-117.
- CENTRE CANADIEN DE TÉLÉDÉTECTION (2008) *Tutoriel : Notions fondamentales de télédétection. Plats-formes et capteurs*. [En ligne.] www.ccrs.rncan.gc.ca.
- CHARBONNEAU, Lise, MORIN, Denis et ROYER, Alain (1986) Interprétation et analyse de l'évolution du paysage urbain de l'agglomération de Montréal (Canada) à l'aide des données Landsat. *Photo-interprétation*, vol. 5, n°1, p. 1-4.
- CHARBONNEAU, Lise, COULOMBE, Alain, MORIN, Denis et BROCHU, Richard (1989) Développement d'une spatio-carte orientée vers la planification urbaine : résultats préliminaires. *Cahiers de géographie du Québec*, vol. 33, n°88, p. 23-36.
- COULOMBE, Alain, CHARBONNEAU, Lise, BROCHU, Richard, MORIN, Denis et RHEAULT, Michel (1989) Révision cartographique et analyse de texture : essais méthodologiques sur la frange urbaine. Dans Monique Bernier, Ferdinand Bonn, et Paul Gagnon (dir.) *Télédétection et gestion des ressources*. Comptes rendus du sixième congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke, 4-6 mai 1988.
- CTQ (1992) Le centre de télédétection au Québec. *Numerimage*, vol. 1, n° 1, p. 2-3.
- DUBOIS, Jean-Marie M. (1997) Bilan du Réseau Télédétection – Les journées scientifiques, objectif, évaluation et organisation. *Bulletin du Réseau Télédétection de l'AUF*, vol. 35.



- DONNAY, Jean-Paul, COLLET, Claude et WEBER, Christiane (2000) La télédétection urbaine à l'aube de la très haute résolution spatiale. Dans Jean-Marie Dubois, Régis Coloz et Paul Gagnon (dir.) *La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives*. Agence universitaire de la francophonie, p. 3-13.
- EDWARDS, Geoffrey, JATON, Annick et THOMSON, Keith P. B. (1991) La manipulation des données hyperspectrales. Dans Paul Gagnon (dir.) *Télédétection et gestion des ressources*. Comptes rendus du septième congrès de l'Association québécoise de télédétection, Montréal, 23-25 octobre, p. 295-299.
- JORDI, R. (1996) *La télédétection multibande aéroportée MEIS II et DAEDALUS MSS appliquée à la cartographie forestière de la station Simoncouche*. Chicoutimi, Université du Québec à Chicoutimi, mémoire de maîtrise en ressources renouvelables.
- LEJEUNE, J.-C., BONN, Ferdinand, ROUX, Christian et ODOUX, B. (1987) Apport de l'information de texture à la segmentation des images du satellite SPOT en milieu urbain. Dans IEEE (dir.) *Proceedings of the Montech 87, Conférence Comprint 87*. Montréal, 9-12 novembre, p. 173-177.
- MARCEAU, Danielle J., HOWARTH, Philip J., DUBOIS, Jean-Marie M. et GRATTON, Denis J. (1990) Evaluation of the Grey-Level Co-Occurrence Matrix Method For Land-Cover Classification Using SPOT Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, n° 4, p. 513-519.
- MORLEY, Larry W. (2009) *La télédétection d'hier à aujourd'hui*. Ottawa, Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada, [En ligne.] http://ccrs.nrcan.gc.ca/org/history/morley_f.php
- PROVENCHER, Léo et DUBOIS, Jean-Marie M. (2006) La photointerprétation au Québec : histoire et perspectives. *Télédétection*, vol. 6, n° 1, p. 57-70.
- PROVENCHER, Léo et DUBOIS, Jean-Marie M. (2007) *Précis de télédétection, vol. 4 Méthodes de photo-interprétation et d'interprétation d'image*. Québec, Presses de l'Université du Québec.
- ROCHON, Guy et BÉNIÉ, Goze B. (1989) Situation de la télédétection au sein des institutions francophones canadiennes. Dans Jean-Marie Dubois et Pierre Lafrance (dir.) *Télédétection en francophonie : bilans régionaux et thématiques*. Actes des 1res Journées scientifiques de l'AUPELF, Sherbrooke, 10-12 octobre 1988, Paris, Éditions John Libbey Eurotext/AUPELF, p. 47-58.
- ROCHON, Guy (2007) Hommage à Ferdinand Bonn et à son œuvre au Québec, au Canada et dans le monde. *Télédétection*, vol. 7, nos 1-2-3-4, p. 11-14.
- ROYER, Alain, CHARBONNEAU, Lise et BONN, Ferdinand (1988) Urbanization and Landsat MSS albedo change in the Windsor-Quebec corridor since 1972. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, n° 3, p. 555-566.
- ROYER, Alain, BECKER, François et GAGNON, Paul (2007) Trente-cinq ans d'observation de la terre : de la photographie à l'électromagnétométrie. *Télédétection*, vol. 7, nos 1-2-3-4, p. 65-88.
- THIBAUT, Diane et CAVAYAS, François (1989) Extraction automatique des données cartographiques des images SPOT pour la mise à jour des inventaires d'utilisations/occupations des sols en milieu urbain et périurbain. Dans Marcelle Berner, Ferdinand Bonn et Paul Gagnon (dir.) *Télédétection et gestion des ressources*. Comptes rendus du sixième congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke, 4-6 mai 1988, p. 83-101.
- WELCH, Roy (1982) Spatial resolution requirements for urban studies. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 3, p. 139-149.