
Potentialités des nouveaux capteurs à très haute résolution spatiale pour l'extraction des réseaux de rues urbains

Renaud Péteri^{*,**} — Thierry Ranchin^{*}

^{*} Groupe Télédétection & Modélisation - Ecole des Mines de Paris
Rue Claude Daunesse, B.P. 207 - 06904 Sophia Antipolis cedex, France

^{**} Institut de Recherche en Informatique et Automatique (SZTAKI)
Académie des Sciences de Hongrie - 1111 Budapest, Kende u.13-17., Hongrie
renaud.peteri@mines-paris.org, thierry.ranchin@ensmp.fr

RÉSUMÉ. La disponibilité d'images satellites à très haute résolution spatiale au dessus de zones urbaines est récente. Elle constitue potentiellement un très grand apport pour la cartographie des villes à des échelles de l'ordre du 1 :10 000. La très haute résolution spatiale de ces nouveaux capteurs permet une représentation réelle des rues sur une carte, mais engendre une augmentation significative des artefacts. Dans cet article, une méthode complète d'extraction de la voirie urbaine à partir d'images à très haute résolution spatiale est tout d'abord proposée. Un protocole innovant d'évaluation quantitative des résultats par comparaison à l'interprétation humaine est présenté. La méthode est ensuite appliquée et évaluée pour une scène urbaine du satellite Quickbird. Les évolutions futures de la méthode, permettant d'exploiter encore plus pleinement les potentialités des nouveaux capteurs, sont enfin discutées.

ABSTRACT. The availability of very high spatial resolution satellite images over urban areas is recent. It potentially represents an important contribution to urban mapping at scales of 1:10 000. The very high spatial resolution of these sensors enables a real representation of streets on a map, but generates in return a significant increase of artefacts. In this article, a complete extraction method of the urban street network from very high spatial resolution images is first proposed. A novative protocol for quantitatively assess the results compared to human interpretation is presented. The method is then applied and assessed for an urban scene from the Quickbird satellite. Future evolutions enabling to better exploit the potentialities of these new sensors are finally discussed.

MOTS-CLÉS : télédétection, très haute résolution spatiale, cartographie urbaine, réseaux de rues, contours actifs, analyse multi-échelle, évaluation quantitative.

KEYWORDS: remote sensing, very high spatial resolution, urban cartography, street networks, active contours, multi-scale analysis, quantitative assessment.

1. Nouveaux capteurs, nouvelle échelle cartographique

1.1. Introduction

La cartographie de la voirie en milieu urbain correspond à un besoin social et économique important. Du point de vue des collectivités publiques, il est primordial pour les villes d'avoir une cartographie à jour de leur réseau routier (aménagement urbain, collecte des eaux usées, pollution, ...). Au delà de la gestion de la voirie, les applications connexes sont nombreuses (utilisation des cartes pour les réseaux de télécom, le géo-marketing, les bases de données pour la navigation, les services WAP...).

Il existe ainsi une demande dans la création ou la mise à jour de cartes. Actuellement, la cartographie du réseau de rues est essentiellement effectuée par interprétation d'images avec un apport de mesures de terrain. Cette procédure est un travail long et fastidieux et demande à être ré-effectuée à chaque mise à jour du réseau.

Il est désormais disponible dans le domaine civil des images satellites à très haute résolution spatiale (par exemple les satellites SPOT 5, Ikonos, Quickbird ou EROS). Le terme «très haute résolution» est relatif au contexte d'étude. Ici, la très haute résolution spatiale signifiera des résolutions inférieures à 5 m dans le canal panchromatique. La disponibilité d'images urbaines à très haute résolution spatiale constitue un apport indéniable pour l'étude du milieu urbain et sa cartographie [PUI 02]. Toutes les échelles pour étudier le milieu urbain peuvent ainsi être atteintes par des images de télédétection : les images aériennes pour les échelles les plus grandes et les images satellites pour les échelles plus basses.

Les moyens satellites peuvent être utilisés dans les cas nombreux où l'accès aux sites d'intérêt est difficile : problèmes administratifs (autorisation de survol), éloignement géographique, catastrophes naturelles, états de conflits ou de guerres ... De plus, ils s'avèrent significativement moins onéreux que les campagnes aériennes ou les relevés de terrain.

1.2. Du linéique au surfacique

L'automatisation de l'extraction du réseau routier à partir d'une image satellite n'est pas un problème récent et a fait l'objet de nombreux travaux en traitement d'images et en télédétection depuis plus de vingt ans [MEN 03]. Cependant, l'extraction automatique ou semi-automatique de routes est toujours, à cause de sa complexité, un thème actif de recherche. Avant l'apparition de la très haute résolution spatiale, les méthodes d'extraction développées dans la littérature portaient sur les images satellites dont la résolution est au mieux de 10 m. A ces résolutions, les routes sont représentées par des lignes d'une épaisseur de 1 à 3 pixels, et ces méthodes amènent à une extraction d'un réseau de type linéique. Les routes visibles sur ce type d'images sont les voies de communication principales du réseau routier telles que les routes nationales, les autoroutes ou les boulevards en ville. Les routes secondaires ne sont pas visibles ou ont un aspect fragmenté dans l'image.

Lorsque ces travaux sont appliqués à la cartographie urbaine, on parle de méthodes d'extraction de *rues*. Avec l'apparition de la très haute résolution spatiale en milieu urbain, la perception des rues passe du linéique au surfacique (plus de 3 pixels de large). Par surfacique, nous entendons que la rue n'est plus représentée par un ligne d'une certaine épaisseur, mais par deux contours parallèles définissant une surface souvent inhomogène en radiométrie (particulièrement dans le cadre urbain).



Figure 1. *Vue de Strasbourg par le satellite Quickbird (résolution spatiale 70 cm en mode panchromatique). © DigitalGlobe*

La figure 1 illustre le niveau de détails des capteurs actuels du domaine civil sur des scènes urbaines. Elle provient du satellite Quickbird dont la résolution est ici de 70 cm en mode panchromatique. On peut noter le grand nombre de détails observables (véhicules, marquages au sol, . . .). Sur de telles images, la rue, dont les deux bords sont visibles, est localisable avec une très grande précision.

A la résolution spatiale submétrique que permettent d'atteindre les images aériennes, les rues ont une représentation surfacique. Pourtant, très peu de méthodes ont été développées en milieu urbain. Ceci peut s'expliquer par l'utilisation de telles images pour la cartographie : elles étaient principalement utilisées pour l'établissement de cartes au 1/25 000. Selon les principes de généralisation cartographique, la représentation des rues à ces échelles est telle que l'axe de la rue est bien positionné, mais que sa largeur sur la carte est supérieure à son emprise réelle (figure 2.a). L'IGN belge¹ dispose depuis peu de cartes au 1/10 000 pour l'ensemble de son territoire. A cette échelle (figure 2.b), la rue est représentée en tant que surface, et sa largeur en représentation cartographique correspond à son emprise réelle au sol.

1. <http://www.ign.be>

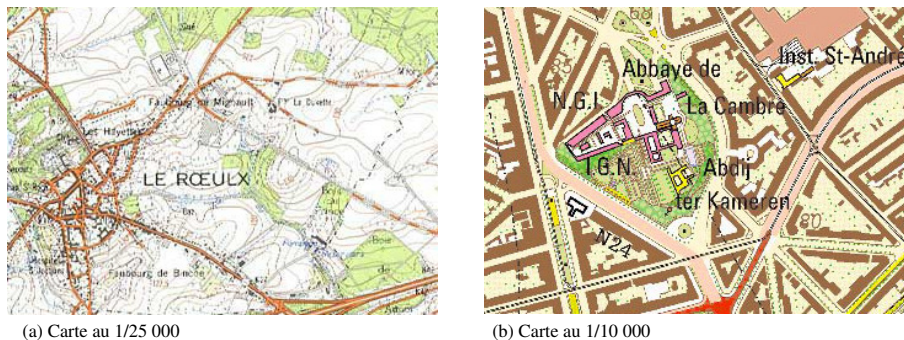


Figure 2. Deux exemples de représentation cartographique des rues © IGN-Belgique

1.3. Une meilleure précision mais aussi de nouveaux types d'artefacts

Le peu de méthodes développées en milieu urbain est aussi lié à la très grande difficulté d'une approche tout automatique en milieu urbain, principalement pour l'extraction automatique et fiable des amorces de rues. En effet, le contexte urbain et la très haute résolution spatiale de l'image induisent une forte augmentation du bruit et des artefacts.

Cette augmentation significative du bruit dans l'image rend l'extraction plus difficile. On peut remarquer sur l'image de la figure 1, quelles sortes d'artefacts engendrent à la fois le contexte urbain et la très haute résolution spatiale. Les véhicules, le marquage au sol ou les ombres portées vont perturber le procédé automatique d'extraction. D'autres types d'artefacts rencontrés sont les arbres, les surfaces bitumées (parking, aéroport) ou les bâtiments avec des radiométries similaires à celles des rues et ayant un contraste important avec leur environnement. L'augmentation de la résolution spatiale va permettre d'extraire la rue avec une plus grande précision géographique, de mieux identifier les différents types de voies de communication (typologie selon la largeur), et de caractériser l'emprise du réseau de rues.

1.3.1. Nécessité d'une nouvelle méthode

Ce passage d'une représentation linéique à une représentation surfacique du réseau nécessite le développement de méthodes différentes de celles employées pour l'extraction de réseaux linéiques, les modèles de rues utilisés n'étant plus applicables pour la très haute résolution spatiale [SHI 02]. De plus, ces méthodes doivent prendre en compte la particularité du milieu urbain. Le domaine urbain est un milieu très bruyé, dans lequel existe une grande variété typologique des rues (rues principales, voies rapides, ruelles, ...). Nous proposons dans la suite de cet article une nouvelle méthode d'extraction de la voirie urbaine à partir des images à très haute résolution spatiale.

2. Une nouvelle méthode d'extraction de rues à partir des images à très haute résolution spatiale

2.1. Description

Le but de nos travaux est de fournir une assistance à l'interprète d'images satellites lors de la saisie du réseau de rues, ainsi que de caractériser le réseau extrait. La méthode proposée dans ce but est modulaire (figure 3).

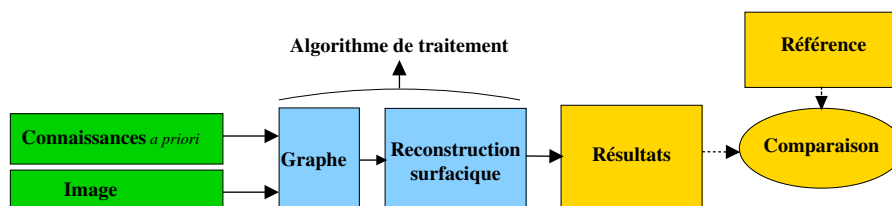


Figure 3. Schéma global de la méthode

Les entrées de l'algorithme, en plus de l'image satellite à très haute résolution, sont des modèles de rues (comme le parallélisme local des bords de rues) et les propriétés topologiques du réseau (comme la connexité). De plus, quatre classes de largeur de rues ont été définies (suivant les spécifications du [Cen88]). L'algorithme de traitement se compose de deux parties séquentielles et exploite la coopération entre la représentation linéique de la rue et sa représentation surfacique. Tout d'abord, un graphe topologiquement correct du réseau de rues est extrait, donnant les relations spatiales entre les différentes rues ainsi qu'une approximation de leur localisation. L'étape suivante est la reconstruction du réseau de rues. Du fait de la très haute résolution spatiale des images utilisées, la rue est reconstruite en tant qu'élément de surface. Cette étape utilise le résultat de l'extraction du graphe du réseau comme initialisation. Une référence, basée sur l'interprétation d'image, permet d'évaluer quantitativement le résultat final. Les différents modules de la méthode sont décrits dans les paragraphes suivants. Pour une description détaillée, on pourra se référer à [PET 03c].

2.2. Module du graphe

Il s'agit dans cette phase d'extraire un graphe topologiquement correct du réseau de rues. Le module du graphe comprend deux phases.

Extraction des polygones du graphe. Cette partie est basée sur l'algorithme de suivi de lignes de [AIR 95]. Cet algorithme est semi-automatique au niveau de l'amorce du suivi, l'opérateur fournissant un point et une direction de propagation. Le principe de l'algorithme de suivi est de générer un arbre de recherche de chemins possibles, puis de sélectionner le meilleur chemin, correspondant à la rue à détecter, qui

minimise une fonction de coût. Cette fonction de coût évalue l'homogénéité de la texture locale dans les directions de propagation possibles. Cette homogénéité de texture se traduit par une variance minimale dans la direction correspondant à l'orientation de la rue. La robustesse de l'algorithme est assurée par une optimisation du critère d'homogénéité directionnelle sur une distance assez grande (la profondeur de l'arbre de recherche).

Obtention du graphe complet par raccordement des polygones extraites. Une rue est définie d'une intersection à une autre et est représentée dans le graphe du réseau par une polyligne. Les rues se connectent entre elles aux intersections, et définissent les nœuds du graphe. De par leur différence de forme et de topologie, les rues et les intersections doivent être traitées séparément, tant pour leur détection que pour leur extraction. Un cercle d'intersection, défini par l'opérateur et représenté sur la figure 4, va délimiter les deux types de traitement à effectuer : traitement des tronçons à contours parallèles et traitement des intersections. Son diamètre est tel qu'il englobe la totalité de l'intersection. Son centre sera le nœud du graphe définissant une intersection.

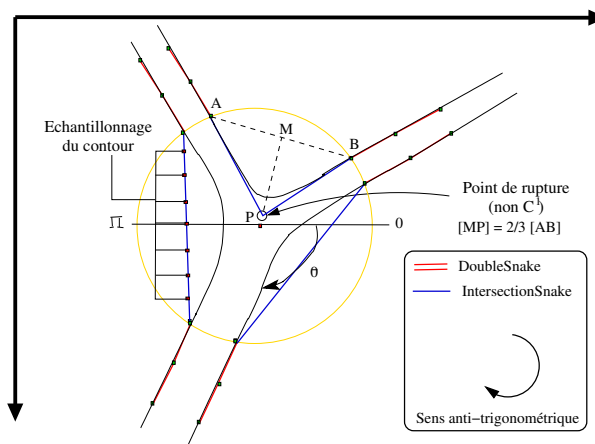


Figure 4. Initialisation des contours actifs d'intersection

La topologie du graphe du réseau va ensuite être reconstruite à partir des différentes polygones (non connectées) obtenues par l'algorithme de suivi. Les polygones sont alors raccordés aux centres des cercles d'intersection qu'elles traversent.

Après cette étape, le graphe extrait est topologiquement correct mais les différentes polygones ne sont pas nécessairement bien recalées et le réseau n'est représenté que de manière linéique. A partir du graphe extrait, les polygones sont alors échantillonnées et propagées suivant la direction de leur normale afin d'initialiser le module de reconstruction surfacique.

2.3. Module de reconstruction

2.3.1. Description

Le but de ce module est d'extraire les rues comme des éléments de surface à partir du graphe fourni à l'étape précédente. Ce module fait intervenir des contours actifs spécifiques (*snakes*) combinés avec une analyse multi-échelle. Les contours actifs, introduits par [KAS 87], sont des modèles déformables qui permettent d'introduire des connaissances *a priori* sur l'objet à extraire. L'utilisation combinée de l'analyse multi-échelle va permettre d'augmenter la robustesse de l'algorithme en réduisant l'effet du bruit (véhicules, marquage au sol, ...).

Deux étapes séquentielles composent cette phase de reconstruction : l'extraction des tronçons de rues avec des bords parallèles et l'extraction des intersections de rues. C'est le cercle d'intersection qui constitue la frontière entre les deux étapes.

2.3.2. Extraction des tronçons de rues à bords parallèles

Afin d'extraire les portions de rues à bords parallèles, un nouvel objet a été défini : le *DoubleSnake*. Il est composé de deux contours actifs ouverts (appelés *brins*) possédant les contraintes d'évolution des contours actifs simples, tout en inter-agissant pour garder un parallélisme local entre eux. Un nouveau terme $E_{//}$ a été introduit afin de prendre en compte la notion de parallélisme entre ces deux brins. De plus, ses extrémités sont contraintes de minimiser leur énergie en restant sur le cercle d'intersection (figure 4).

La fonctionnelle d'énergie qui contrôle l'évolution du *DoubleSnake* est définie comme :

$$E_j = \sum_i \left[\alpha^i E_{cont}^i + \beta^i E_{curv}^i + \gamma^i E_{2^j image}^i + \delta^i E_{//}^i \right] \quad [1]$$

où i représentent le point i d'un des brins.

E_{cont}^i et E_{curv}^i sont des énergies internes qui contrôlent la forme du *DoubleSnake*.

Une attention particulière est portée sur le terme d'énergie image $E_{2^j image}^i$, car c'est ce terme qui va attirer le *DoubleSnake* vers l'objet à extraire. La transformée en ondelettes permet d'obtenir une représentation multi-échelle des contours d'une image ([MAL 92]). L'énergie image est alors calculée à différentes échelles j , en utilisant les coefficients de la transformée en ondelettes :

$$E_{2^j image}^i = -\sqrt{|W_{2^j}^1 f(i)|^2 + |W_{2^j}^2 f(i)|^2} \quad [2]$$

avec $W_{2^j}^1 f(i)$ les coordonnées de la transformée en ondelettes à l'échelle j .

2.3.3. *Extraction des intersections*

Le traitement des intersections intervient une fois que la phase d'extraction des contours parallèles est terminée. Le contour actif utilisé (*IntersectionSnake*) au cours de cette étape consiste en un contour ouvert. Il est initialisé en reliant par des segments les extrémités des *DoubleSnakes* puis est échantillonné. Un point intermédiaire de «rupture» est introduit par l'algorithme si l'angle θ entre deux extrémités est inférieur à $\frac{3\pi}{5}$ (voir figure 4).

2.3.4. *Déroulement de l'algorithme de reconstruction*

La figure 5 représente le déroulement de l'algorithme de reconstruction à partir du graphe du réseau.

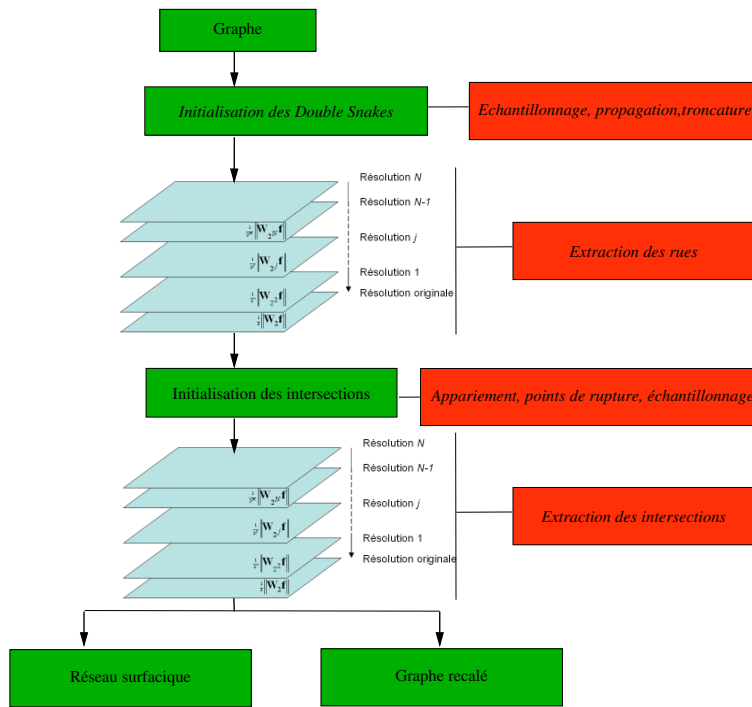


Figure 5. *Algorithme de reconstruction surfacique*

A partir de l'image à la résolution originale, une analyse multi-échelle est effectuée, décomposant hiérarchiquement l'image en une série de plans de contexte et une série de plans d'ondelettes [MAL 97]. Les *DoubleSnakes* évoluent sur tous les plans de contexte successifs, de la résolution la plus basse fixée par la classe de la rue, jusqu'à évoluer sur l'image de résolution initiale. Pour chaque plan de contexte, une énergie image est calculée à partir du plan d'ondelettes associé. Cette énergie va at-

tirer les contours actifs vers les détails présents à la résolution du plan de contexte considéré.

Une fois que les *DoubleSnakes* ont tous minimisé leur énergie, les *IntersectionSnakes* sont initialisés et leur extraction s'effectue dans le même processus multi-échelle. Deux contraintes s'ajoutent lors de leur évolution : les extrémités sont fixes et le contour actif est contraint à ne jamais sortir du cercle d'intersection. A la fin des différentes itérations, tous les contours actifs se trouvent alors dans un état d'équilibre.

2.4. *Propriétés de cette approche.*

L'algorithme de traitement a la particularité d'utiliser les deux modes de représentation des rues : la représentation linéique et la représentation surfacique. La séparation du traitement permet aussi à l'utilisateur d'effectuer une vérification intermédiaire, et si nécessaire une correction, entre la phase d'extraction du graphe du réseau et la phase de reconstruction. On vise ainsi un contrôle continu de la qualité d'extraction.

Si nous proposons dans cet article des algorithmes pour ces deux modules, on peut aussi envisager l'utilisation d'autres méthodes pour chacune des étapes. Par exemple, on peut inclure pour l'étape du graphe, tout algorithme permettant une extraction linéique du réseau, quitte à diminuer artificiellement la résolution de l'image. La méthode est donc ouverte aux développements futurs.

2.5. *Évaluation des résultats*

Dans un contexte applicatif, une évaluation quantitative est essentielle. Elle permet de caractériser les résultats produits par un algorithme automatique et aussi d'en donner une mesure de fiabilité. Une référence est nécessaire pour comparer les résultats obtenus et ainsi obtenir des critères quantitatifs d'évaluation.

Il a été montré dans [PET 02, PET 03a] qu'une référence extraite de l'image numérique et basée sur une seule interprétation humaine n'était pas fiable pour une scène à très haute résolution spatiale présentant des artefacts. Une méthode basée sur la saisie vectorielle de la référence par plusieurs interprètes d'images et permettant de réduire la variabilité des interprétations a alors été proposée. A partir de la référence moyenne des interprétations, plusieurs critères sont utilisés pour comparer une rue extraite automatiquement à la référence : Distance de Hausdorff, comparaison entre les longueurs et comparaison entre les surfaces.

Une zone de tolérance est aussi définie, représentative de la variabilité d'interprétation entre les différents interprètes d'images. L'évaluation quantitative est faite en calculant le pourcentage du contour extrait situé dans cette zone.

On pourra se référer à [PET 03a] pour une description précise de cette référence et à [PET 04] pour les différents critères quantitatifs de comparaison possibles.

3. Application : image Quickbird de la zone de Fredericton, Canada

3.1. Description de la scène

La scène suivante provient du satellite Quickbird de la société DigitalGlobe. Ce satellite acquiert des images en mode panchromatique à 0,61 m. L'image présentée a été rééchantillonnée à 70 cm. Cette image a été acquise le 31 août 2002 au dessus de la ville de Fredericton au Canada (figure 6). La ville de Fredericton est typique des villes nord-américaines, où le réseau de rues est quadrangulaire.



Figure 6. Image Quickbird du centre ville de Fredericton, Canada © DigitalGlobe

On peut noter la présence d'artefacts sur la chaussée, comme des véhicules ou le marquage au sol (cas des rues 6 et 9 notamment). Il y a aussi un grand nombre d'occlusions partielles des rues, principalement les arbres et les ombres portées des bâtiments (rue 2, 3, 5 et 10).

Enfin, il y a 4 intersections, 3 en «X» et une en «Y» (entre les rues 5, 7 et 8).

Les sections suivantes présentent les différentes étapes d'extraction de ce réseau de rues, ainsi que son évaluation quantitative.

3.2. Extraction du graphe

La figure 7 présente le résultat du suivi de rues. Cinq points d'amorce (en vert sur la figure 7) ont été fournis par l'opérateur, ainsi que les directions initiales de propagation. Il résulte 5 polygones de suivi, dont certains traversent plusieurs intersections. Sur tout le suivi, il y a eu trois cas où l'opérateur a dû corriger la trajectoire (points en jaune). Ces erreurs sont dues à l'occlusion par les ombres portées sur les rues 6 et 11, et à l'homogénéité radiométrique du bâtiment sur la rue 10.



Figure 7. Après l'extraction de polygones par l'algorithme de suivi

L'étape suivante consiste en l'extraction de la topologie du graphe à partir de cet ensemble de polygones obtenu et des cercles d'intersection. Comme décrit à la section 2.2, les polygones dont les points extrêmes sont localisés dans un cercle d'intersection vont être tronquées, puis vont être raccordées au centre de ce cercle (figure 8). Lorsque les polygones traversent plusieurs intersections, elles sont «découpées» en plusieurs tronçons. Le graphe est ensuite sous-échantillonné en ne retenant qu'un point des polygones sur trois (figure 9).

A ce stade, le graphe du réseau est complet et topologiquement correct mais les polygones du graphe ne sont pas parfaitement centrées sur l'axe de la rue (par exemple pour les rues 2, 4 ou 11). Ce graphe va ensuite permettre d'initialiser l'étape de reconstruction surfacique.



Figure 8. *Obtention du graphe topologique*



Figure 9. *Sous-échantillonnage du graphe topologique*

3.3. Etape de reconstruction surfacique.

A partir du graphe obtenu, les polygones du graphe sont échantillonnées et propagées à la distance définie par la classe des rues. Ici, les rues sont les artères principales de Fredericton et sont considérées comme de classe 3 (voir [PET 03c]). Les coefficients régissant l'évolution des contours actifs sont définis par l'opérateur et sont fixes sur toute l'image.

La figure 10 présente le résultat après l'extraction des tronçons de rue à bords parallèles et l'initialisation des intersections.



Figure 10. Initialisation des intersections après l'extraction des tronçons à bords parallèles

Enfin, la figure 11 présente le résultat final d'extraction.

On s'aperçoit visuellement que l'algorithme a réussi à extraire des rues mal initialisées (comme la rue 4). Ceci est dû aux termes de régularisation et à l'énergie de parallélisme. Grâce à l'utilisation des différents plans d'ondelettes, l'algorithme montre une bonne robustesse vis-à-vis du bruit sur la chaussée comme les véhicules (cas des rues 7 ou 9) ou le marquage au sol (rue 9). Il a aussi réussi à passer plusieurs occlusions causées par les arbres (rue 2) ou les ombres portées (rues 3, 6, et 7).

Certains tronçons ont été moins bien extraits : aux abords de l'intersection avec les rues 1, 10 et 9, les bords de la rue 2 s'écartent progressivement. Ceci est dû à la présence du parking et de nombreuses occlusions. Pour la rue 11, l'initialisation loin de l'axe de la rue associée avec le grand nombre d'ombres portées ont fait «dériver» le *DoubleSnake*, qui a toutefois gardé une largeur correcte.

Pour les intersections, certaines sont un peu «coupées» alors que d'autres ont été extraites correctement.



Figure 11. *Résultat final après l'extraction des intersections*

La figure 12 présente un zoom sur l'intersection en «X» entre les rues 5, 7 et 8.

Cet exemple illustre l'introduction ou non des points de ruptures (voir l'initialisation des intersections sur la figure 10). Visuellement sur la figure 12, les intersections ont été bien extraites, et les termes de régularisation ont permis de passer les occlusions ou les zones de faible contraste. De plus, l'introduction de points de rupture a permis une bonne extraction des angles droits de l'intersection.



Figure 12. Résultat final d'extraction : zoom sur l'intersection entre les rues 5, 7 et 8

3.4. Evaluation quantitative

Suivant le protocole d'évaluation défini dans [PET 04], il a été demandé à 8 interprètes de saisir sur cette scène le réseau de rues. Le résultat est présenté figure 13. La complexité de la scène a engendré de la variabilité d'interprétation, particulièrement pour certains tronçons (cas des rues 4, 6, 8 et 10) ainsi que pour presque toutes les intersections.

Sur la figure 14 est représenté un zoom sur l'intersection entre les rues 6, 7, 9 et 11. La zone de tolérance (en bleu) et la référence (trait pointillé rouge) sont extraites à partir de ces interprétations (section 2.5). La largeur de la zone de tolérance traduit la différence importante de jugement entre les différents interprètes d'images.

Le contour extrait par l'algorithme est représenté en trait plein vert. Cet exemple est représentatif des différents résultats que l'on obtient : à cause d'une initialisation trop éloignée et de la présence d'ombres portées, la rue 11 est décalée par rapport à la référence et est entièrement hors de la zone de tolérance. A l'inverse les rues 6 et 7 ont été très exactement extraites, sont proches de la référence et entièrement incluses dans la zone de tolérance. La rue 9 conjugue les 2 cas : le bord droit n'a pas été extrait correctement à cause de l'ombre portée trop étendue, engendrant une mauvaise initialisation de l'intersection. Le bord gauche a été extrait très précisément, et a permis une bonne initialisation de l'intersection. On peut aussi observer figure 14 que certaines intersections sont un peu coupées alors que d'autres ont été extraites correctement.

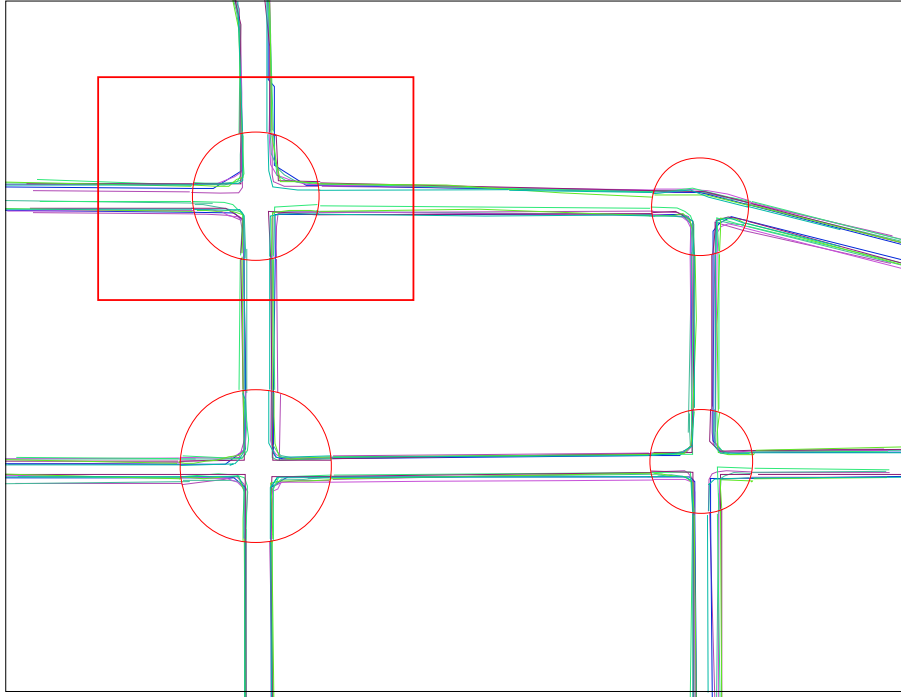


Figure 13. *Superposition des 8 interprétations de la scène*

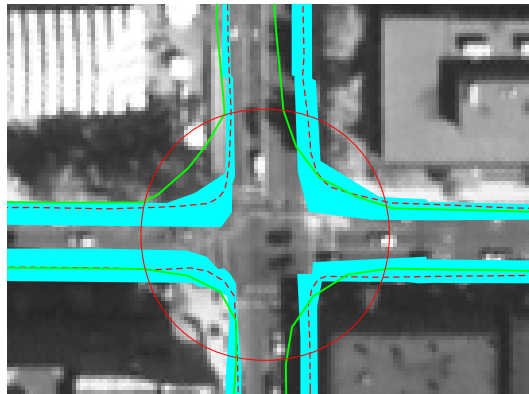


Figure 14. *Rues extraites (trait plein vert), référence (trait pointillé) et zone de tolérance (bleue)*

Les impressions visuelles sont confirmées par les valeurs numériques issues de la référence et de la zone de tolérance. Les critères géométriques, reportés dans la tableau 1, montrent globalement une bonne correspondance entre le réseau extrait et la référence. Les longueurs du réseau extrait et de celui de référence sont similaires (de l'ordre de 4% de différence relative). La différence sur les surfaces est faible pour les tronçons de rue (2,2%). Elle est de 16,9% sur les intersections qui ont été plus difficiles à extraire.

	Longueur		Surface	
	Différencel	Différence relative	Différencel	Différence relative
Tronçons	36 m	1,9 %	294 m ²	2,2 %
Intersections	69 m	11 %	1156 m ²	16,9 %
Cumulée	105 m	4,1 %	1410 m ²	7,0 %

Tableau 1. Critères géométriques de longueur et de surface

La distance de Hausdorff, traduisant le maximum sur les écarts par rapport à la référence, est en moyenne de 2,8 mètres pour les tronçons et de 4,9 mètres pour les intersections.

Du point de vue de la zone de tolérance (tableau 2), plus de 70 % des bords de rue se trouvent à l'intérieur, ce qui est un bon résultat au vu de la complexité de la scène et du bruit présent. Le taux de 52,5 % pour les intersections traduit la dépendance des *IntersectionSnakes* par rapport à l'initialisation fournies par les *DoubleSnakes* et encore plus en amont par l'algorithme de suivi. En effet, un décalage au niveau des points des *DoubleSnakes* situés sur le cercle (voir figure 14) va engendrer un décalage final sur le résultat d'extraction des intersections.

	Rue extraite
Tronçons de rue	71,3%
Intersections	52,5%

Tableau 2. Pourcentage de la rue inclus dans la zone de tolérance

3.4.1. Gain de temps.

Les différents interprètes ont été chronométrés lors de la saisie de la scène. Il leur a fallu sur certaines rues très occultées plusieurs ajustements successifs. L'algorithme permet, en incluant le temps éventuel de rectification, un gain de temps pouvant être estimé à un facteur 10 par rapport à une saisie manuelle, ce qui est très intéressant dans une optique opérationnelle.

4. Conclusion, perspectives

Dans cet article, nous avons proposé une méthode globale d'extraction des réseaux de rues en milieu urbain à partir des images à très haute résolution spatiale. Son objectif est de répondre à la forte demande dans la création et la mise à jour automatisée de cartes.

Cette méthode d'extraction est modulaire, et exploite la coopération entre une représentation surfacique de la rue (module du graphe) et une représentation surfacique (module de reconstruction). Son application et son évaluation pour le cas d'une image urbaine du satellite Quickbird ont permis de montrer son bon comportement, même en présence d'artefacts sur la chaussée. La méthode a aussi été appliquée dans [PET 03b] à des quartiers péri-urbains moins bruités, et le taux d'inclusion dans la zone de tolérance atteint alors les 90% pour les rues et 80% pour les intersections. Même si il conviendrait de tester la méthode sur un grand nombre de cas pour étudier ses limites et la sensibilité aux paramètres, l'algorithme permet un gain de temps significatif pour l'opérateur (d'un facteur entre 6 et 10 suivant la complexité de la scène).

Un des avantages de la méthode est de n'utiliser que très peu de sources d'information. Cependant, sa modularité permet l'incorporation de données externes. Par exemple, l'intégration des travaux de [BOI 00], qui propose une extraction précise à partir d'une base de données des différents types d'intersection, rond-points compris, pourrait être bénéfique. L'information d'élévation permettrait de lever certaines incertitudes. On pourrait envisager son utilisation à la fin de l'extraction pour distinguer le haut des bâtiments du bord de la chaussée. L'utilisation de plusieurs canaux spectraux pourrait aussi améliorer les résultats d'extraction. Ainsi, l'indice de végétation peut permettre de masquer les arbres le long des rues et restreindre ainsi la zone d'extraction. Les images thermiques peuvent fournir des indications sur les véhicules en mouvement circulant sur la chaussée, et donc sur la présence de la rue. Il convient de veiller toutefois à ce que l'introduction de ces données externes n'augmente pas la complexité et le temps de traitement de manière trop importante, et que le gain de précision et de fiabilité soit en accord avec les besoins opérationnels.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par une bourse CNRS/DGA du ministère de la Défense. Les auteurs remercient Sylvain Airault de l'Institut Géographique National pour avoir fourni les sources de son programme. L'image Quickbird de la ville de Fredericton a été gracieusement mise à notre disposition dans le cadre du programme Géoide² et du projet AutoMap.

2. <http://www.geoide.ulaval.ca>

5. Bibliographie

- [AIR 95] AIRAULT S., JAMET O., « Détection et restitution automatique du réseau routier sur des images aériennes », *Traitement du Signal*, vol. 12, n° 2, 1995, p. 189-200.
- [BOI 00] BOICHIS N., « Extraction automatique des carrefours routiers par interprétation d'images aérienne guidée par une base de données cartographiques », PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, France, 2000, 142 pages.
- [Cen88] Centre d'Études des Transports URbains, 8 avenue Aristide Briand 92220 Bagneux, France, « Guide général de la voirie urbaine : Conception, Aménagement, Exploitation », 1988.
- [KAS 87] KASS M., WITKIN A., TERZOPOULOS D., « Snakes : Active Contour Models », *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision*, London, England, 1987, p. 259-268.
- [MAL 92] MALLAT S., ZHONG S., « Characterization of Signals from Multiscale Edges », *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 40, n° 7, 1992, p. 2464-2482.
- [MAL 97] MALLAT S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, AP Professional, London, UK., 1997, 577 pages.
- [MEN 03] MENA J., « State of the art on automatic road extraction for GIS update : A Novel Classification », *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, n° 16, 2003, p. 3037-3058.
- [PET 02] PETERI R., RANCHIN T., « Assessment of object extraction methods from satellite images : reflections and case study on the definition of a reference », BENES T., Ed., *22nd EARSeL Annual Symposium "Geoinformation for European wide integration*, Prague, Czech Republic, 4-6 June 2002, Millpress, Rotterdam, Netherlands, p. 141-147.
- [PET 03a] PETERI R., RANCHIN T., « Evaluation quantitative de méthodes d'extraction de rues : choix d'une référence », *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, vol. 170, n° 2, 2003, p. 23-29.
- [PET 03b] PETERI R., RANCHIN T., « Urban street mapping using Quickbird and IKONOS images », *Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. III, Toulouse, France, July 2003, p. 1721-1723.
- [PET 03c] PETERI R., « Extraction de réseaux de rues en milieu urbain à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale », PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, formation "Informatique, Temps Réel, Robotique et Automatique", décembre 2003, 152 p.
- [PET 04] PETERI R., COULOIGNER I., RANCHIN T., « How to assess quantitatively road extracted from high resolution imagery ? », *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 70, n° 12, 2004, p. 1449-1456.
- [PUI 02] PUISSANT A., WEBER CH., « The utility of very high spatial resolution images to identify urban objects », *Geocarto International*, vol. 17, n° 1, 2002, p. 31-41.
- [SHI 02] SHI W., ZHU C., « The line segment match method for extracting road network from high-resolution satellite images », *IEEE. Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, n° 2, 2002, p. 511-514.