



HAL
open science

Reconnaissance de formes dans des images de télédétection du milieu urbain

Isabelle Couloigner

► **To cite this version:**

Isabelle Couloigner. Reconnaissance de formes dans des images de télédétection du milieu urbain. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Nice Sophia-Antipolis, 1998. Français. NNT: . pastel-00948036

HAL Id: pastel-00948036

<https://pastel.hal.science/pastel-00948036v1>

Submitted on 17 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

A toi qui est toujours présente...

Remerciements

Je voudrai, en premier lieu, remercier M. Albert PAPIERNIK, responsable du DEA 'PTT'* , d'avoir accepté de présider mon jury de thèse après m'avoir permis de m'inscrire en doctorat au sein de sa formation doctorale.

Je remercie sincèrement mon directeur de thèse, M. Lucien WALD - responsable du groupe Télédétection & Modélisation de l'Ecole des Mines de Paris - pour m'avoir accueillie au sein de son groupe et pour m'avoir guidée tout au long de ma thèse. Par sa disponibilité et ses conseils, parfois difficiles à accepter mais toujours judicieux *a posteriori*, cette thèse s'est bien déroulée, et mes rapports, articles, communications et, pour finir, mon manuscrit sont scientifiquement rigoureux.

Je suis reconnaissante à M. Thierry RANCHIN - responsable scientifique associé au groupe T&M - d'avoir également suivi cette thèse. Par sa très grande disponibilité, par ses précieux conseils sur les ondelettes et par les différents brainstorming que nous avons effectués, mes travaux de thèse n'ont jamais connu de temps mort et ont été menés à bien.

Je voudrai vivement remercier Mme Christiane WEBER - du département Image et Ville de l'Université de Strasbourg - et M. Jean-Paul DONNAY - responsable du département SURFACES^{2*} à l'Université de Liège (Belgique) - qui ont participé au suivi de ma thèse, qui m'ont donné de précieux conseils sur la géographie et cartographie urbaine, et qui, en compagnie de Mme Marie-José LEFÈVRE - Responsable du service "Projets et Développement de Recherche" au département Q.T.I.S.^{3*} du Centre Spatial de Toulouse -, ont accepté d'exercer le rôle de rapporteurs et de participer à mon jury de thèse.

Je tiens à remercier M. René COLLOREC - responsable du DEA STIR^{4*} de l'Université de Rennes I - d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse après m'avoir accueillie au sein de l'option Image lors de mon DEA.

Je tiens également à remercier Mme Marie-Catherine MOUCHOT - maître de conférences à Télécom Bretagne - d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse, et avec elle, tous les membres (M. Christian ROUX - responsable du département -, enseignants-chercheurs et doctorants) du département Image et Traitement de l'Information qui ont accepté de participer à mes diverses présentations de travaux de thèse au sein de leur département.

Je suis également honorée de la présence de M. Michel-Henri CARPENTIER, un de mes anciens professeurs de traitement de signal radar, qui a, gentiment, accepté de venir assister à ma thèse.

Mes remerciements vont également aux divers membres (responsables scientifiques, doctorants - anciens ou nouveaux -, ingénieurs de recherche ou stagiaires) du groupe T&M qui m'ont soutenu et aidé tout au long de ces trois années.

Je remercie également les responsables scientifiques et les nouveaux ou futurs docteurs du Centre d'Energétique d'avoir bien voulu participer, bien que cela ne soit pas leur domaine de recherche, aux divers présentations d'avancement de mes travaux de thèse.

* PTT : 'Propagation, Télédétection & Télécommunications'

2* SURFACES : 'Service Universitaire de Recherches Fondamentales et Appliquées en Cartographie et en Etudes Spatiales'

3* Q.T.I.S. : 'Qualité et Traitement de l'Imagerie Spatiale'

4* STIR : 'Signal, Télécommunications, Image, Radar'

Merci également aux doctorants, ils se reconnaîtront, du Centre des Mises en Forme des Matériaux, du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, pour les agréables et nécessaires pauses-café de l'après-midi.

Merci également à ma famille et à mes amis - bien que loin géographiquement, ils sont toujours près de moi (vive le mail et le téléphone !!) - qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ces trois années de thèse.

Résumé Applicatif

Reconnaissance de formes dans des images de télédétection du milieu urbain

Enjeux :

L'objectif de notre étude est de rechercher un ensemble de traitements numériques pour extraire le réseau routier en milieu urbain à partir d'images satellitaires. Ces traitements doivent être génériques, c'est-à-dire qu'ils doivent savoir s'adapter à différentes résolutions spatiales, allant de 0,8 m (imagerie aérienne) à 10 m (canal panchromatique de SPOT-HRV). Ils sont adaptés à des villes possédant de larges structures urbaines et un réseau routier quadrangulaire.

L'objectif de ces traitements est d'apporter une aide aux photo-interprètes dans leurs travaux de cartographie du milieu urbain, par l'automatisation partielle des tâches.

Technologies mises en oeuvre :

La nouvelle méthode que nous avons développée est basée sur les outils mathématiques suivants : l'analyse multirésolution et la transformée en ondelettes. Cette méthode est semi-automatique : l'utilisateur doit initialiser l'extraction des différentes classes de rues du réseau routier urbain étudié.

Positionnement du sujet :

Les travaux concernant l'extraction des réseaux routiers, ferrés ou fluviaux ont été initiés dans les années soixante-dix. Les publications sont nombreuses et les approches variées. Cependant peu de travaux concernent le milieu urbain, malgré la similitude, en première approximation, entre route et rue.

Résultats :

- définition d'un modèle générique et explicite de «rues» basé sur des propriétés géométriques, radiométriques et typologiques.
- définition d'un modèle de «réseau routier» basé sur des propriétés de connexion simplifiée et de hiérarchie. Ce modèle est simple et, peut être complété.
- développement d'une méthode semi-automatique pour extraire, hiérarchiquement, le réseau routier urbain à partir d'images de télédétection (aéroportées ou satellitaires) de haute résolution spatiale.
- définition de critères quantitatifs pour évaluer la méthode et fixer ses limites.
- application à des images de 0.8, 1.63, 2 et 10 m de résolution spatiale.

L'évaluation quantitative de ces applications a montré que, quelle que soit la résolution spatiale ou spectrale des images, la méthode extrait de manière similaire les différentes classes de rues. En effet, quelle que soit la résolution spatiale de l'image originale, l'emprise des rues est extraite avec une erreur en position de 1 pixel, voire 2 pixels, pour les rues à terre-plein(s), et de 2 pixels, voire 3 pixels, pour les autres rues. Les terre-pleins présents sont, quant à eux, extraits avec une erreur en position de 1 pixel. Les résultats obtenus par notre méthode sont donc très bons. L'échelle cartographique associée est également facile à déterminer à partir de ces résultats quantitatifs et de la résolution spatiale de l'image originale.

Par conséquent, l'objectif d'établir un traitement numérique générique est atteint, de même que celui d'apporter une aide aux photo-interprètes par une automatisation partielle des tâches de cartographie du milieu urbain.

Applications et/ou mots clés :

Utilisation possible dans un système d'information géographique ou dans un système de photo-interprétation assistée par ordinateur par exemple.



Sommaire

Sommers

| | |
|--|----|
| Chapitre 1 - Introduction | 15 |
| Chapitre 2 - Extraction de routes : Etat de l'art | 19 |
| 2.1. Méthodes employées pour extraire les routes des images de télédétection | 22 |
| 2.1.1. L'extraction de lignes | 23 |
| 2.1.2. Le suivi de lignes | 26 |
| 2.1.3. Utilisation des données multispectrales et traitement appropriés | 30 |
| 2.1.4. Traitement multirésolution | 31 |
| 2.2. Résultats obtenus | 31 |
| 2.3. Conclusion | 32 |
| Chapitre 3 - Une nouvelle méthode d'extraction du réseau routier urbain | 35 |
| 3.1. Les données | 37 |
| 3.2. Analyse des données | 38 |
| 3.3. Les modèles | 44 |
| 3.4. La stratégie proposée | 46 |
| 3.5. Les outils mathématiques utilisés | 47 |
| 3.5.1. La transformée en ondelettes | 47 |
| 3.5.2. L'analyse multirésolution | 49 |
| 3.5.3. Analyse multirésolution et transformée en ondelettes | 50 |
| 3.5.4. L'algorithme «à trous» | 50 |
| 3.6. Extraction hiérarchique des rues | 52 |
| 3.6.1. Mise en évidence de l'emprise des rues : extraction des bords | 52 |
| 3.6.2. Mise en évidence des caractéristiques de rues | 54 |
| 3.6.3. Un exemple d'applications | 56 |
| 3.7. Extraction du réseau routier urbain | 58 |
| 3.8. Conclusion | 58 |
| Chapitre 4 - Méthode d'évaluation des résultats | 61 |
| 4.1. Evaluation de l'emprise des rues | 63 |
| 4.2. Evaluation du positionnement des rues | 64 |
| 4.3. Evaluation du réseau routier urbain | 65 |
| 4.3.1. Mesures de la taille et de la forme du réseau routier urbain | 65 |
| 4.3.2. Indicateurs de la topologie du réseau routier urbain | 66 |
| 4.3.3. Conclusion | 67 |
| 4.4. Conclusion | 67 |

| | |
|--|----|
| Chapitre 5 - Applications et évaluation de la méthode | 69 |
| 5.1. Jedda | 71 |
| 5.1.1. Jedda-KVR | 71 |
| 5.1.2. Jedda-SPOT | 82 |
| 5.2. Nîmes | 86 |
| 5.2.1. Analyse visuelle | 86 |
| 5.2.2. Evaluation quantitative | 87 |
| 5.3. Nancy | 89 |
| 5.3.1. Analyse visuelle | 89 |
| 5.3.2. Evaluation quantitative | 89 |
| 5.4. Conclusions | 90 |
| Chapitre 6 - Conclusions et perspectives | 93 |
| Bibliographie | 99 |

Annexes105

Annexe 1. Un exemple de cartographie de la voirie urbaine107

Apport de SPOT 5 à la cartographie urbaine, *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n°145, pp. 33-38, 1997.

Annexe 2. Apport de la fusion de données à la cartographie de la voirie urbaine115

Benefit of the future SPOT 5 and of data fusion to urban mapping. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n°8, 1998, pp. 1519-1532.

Chapitre 1

INTRODUCTION

Chapter 1

INTRODUCTION

L'observation du milieu urbain depuis l'espace a pris un certain essor depuis l'apparition d'images satellitaires civiles à résolution spatiale décimétrique (Landsat TM, SPOT-HRV). La résolution spatiale des images satellitaires s'accroît encore pour tendre vers le mètre (canal panchromatique de IRS-1C à 5,8 m de résolution spatiale, du capteur russe KVR-1000 à 2 m, du futur SPOT 5 à 5 m, voire à 2,5 m, ou de différents programmes nord-américains à 3 m, voire 1 m). La qualité des détails visibles sur des telles images a éveillé un grand intérêt de la part des personnes impliquées dans l'étude du milieu urbain, que ce soient des cartographes ou des urbanistes. Cet intérêt est d'autant plus grand que les principaux avantages des images satellitaires sont :

- un coût d'obtention (acquisition, traitement) nettement moins élevé que celui des campagnes de photographies aériennes (Weber, 1995) ;
- une fréquence d'observations (fonction de la couverture nuageuse) d'un site particulier plus élevée.

Aussi, la cartographie urbaine à partir d'images satellitaires civiles devrait être un marché porteur de l'observation de la Terre pour les prochaines années.

Notre étude se place dans cet environnement. Son objectif est de rechercher un ensemble de traitements numériques pour extraire le réseau routier en milieu urbain à partir d'images satellitaires. Ces traitements devront être génériques, c'est-à-dire qu'ils devront savoir s'adapter à différentes résolutions spatiales, allant de 0,8 m (imagerie aérienne) à 20 m (canaux multibandes de SPOT-HRV). L'objectif de ces traitements est d'apporter une aide aux photo-interprètes dans leurs travaux de cartographie du milieu urbain, par l'automatisation partielle des tâches. Ceci devrait permettre un gain de temps et un gain de productivité.

Pour lors, l'analyse des informations du milieu urbain issues des images satellitaires ou aéroportées est essentiellement effectuée par photo-interprétation avec un apport des mesures-terrain. La complexité des paysages urbains rend difficile la réalisation d'algorithmes performants et fiables. Car, "l'adéquation entre la résolution spatiale et la discrimination des éléments va varier en fonction de la taille, de l'organisation et de la densité des objets urbains (bâtiments, réseaux routiers, ...)" (Weber, 1995 - page 98). Les "pixels urbains" résultent donc d'une combinaison des différentes réflexions d'objets urbains hétérogènes (toits des bâtiments, asphalte, béton, eau, végétation, ...) présents dans le champ de vue des CCDs du capteur (de Keersmaecker, 1989 ; Forster, 1985).

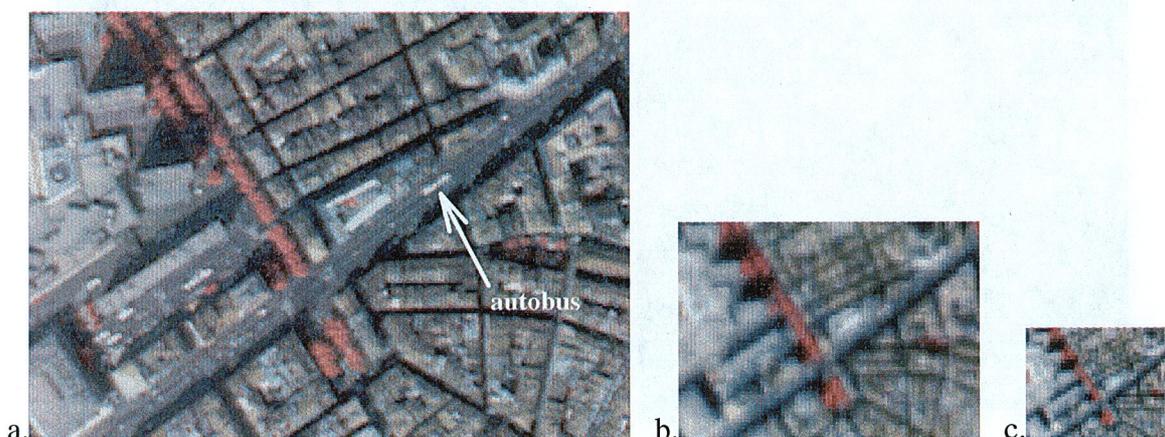


Figure 1.1. Compositions colorées (R=B3, V=B2 et B=B1) d'un extrait des images simulées SPOT-5 acquises sur Marseille (France) à 1,67 m (a), 5 m (b) et à 10 m (c) de résolution spatiale (CNES © 1993).

La résolution spatiale des images intervient bien sûr fortement dans l'observation de cette hétérogénéité. Ainsi, plus la résolution spatiale est fine, plus la discrimination de deux objets urbains voisins est aisée (Forster, 1985). Et, plus la résolution spatiale des images est fine, plus il est aisé, pour un photo-interprète, de distinguer des éléments urbains de petite taille. Ainsi, Couloigner *et al.* (1996) montrent qu'à 5 m de résolution spatiale (figure 1.1b), la voirie de la ville de Marseille est presque totalement visible quelle que soit l'orientation des rues, leur largeur, la hauteur des bâtiments les bordant et la signature spectrale des rues et de leur environnement proche. Des rues de largeur inférieure à la taille des pixels (3-4 m) y sont même perceptibles. A 10 m de résolution spatiale (figure 1.1c), les rues ne sont perceptibles qu'à partir de 8-10 m de large et de 14-16 m dans les quartiers très denses.

Cependant, même si cette amélioration de la résolution spatiale des images satellitaires amène une quantité de détails nécessaire à un enrichissement de la cartographie du milieu urbain (essentiellement effectuée par photo-interprétation actuellement), elle entraîne également l'insertion de «bruit» au niveau des structures à détecter dans les images : la présence de véhicules sur la chaussée ou des arbres bordant les rues peut gêner l'extraction de la voirie, par exemple. La figure 1.1a, représentant une partie de la ville de Marseille à 1,67 m de résolution spatiale, illustre bien ce problème : les véhicules (voitures et autobus) présents sur la chaussée de la Canebière (avenue traversant la figure en diagonale) sont bien perceptibles (visualisés par des points et des rectangles blancs). Ils risquent donc de gêner une détection automatique de la voirie. Par contre, ils n'apparaissent plus sur la figure 1.1b présentant la même zone à 5 m de résolution spatiale, ni bien sûr à 10 m. La détection automatique peut donc, paradoxalement, être plus difficile sur les images à haute résolution spatiale. Il est donc nécessaire de trier toutes les informations visibles pour ne conserver que l'information pertinente.

L'infrastructure de la ville étudiée joue également un grand rôle dans l'analyse du milieu urbain. Ainsi, les villes caractérisées par des structures urbaines espacées et par un réseau urbain quadrangulaire (villes d'Amérique du Nord par exemple) sont relativement faciles à analyser (pour cartographier le réseau urbain par exemple) et ceci, même avec des images de résolution spatiale décimétrique. En revanche, les anciennes villes européennes ou asiatiques aux trames serrées et au réseau routier tortueux nécessitent une résolution spatiale plus fine et sont plus complexes à analyser (Weber, 1995 ; Welch, 1982).

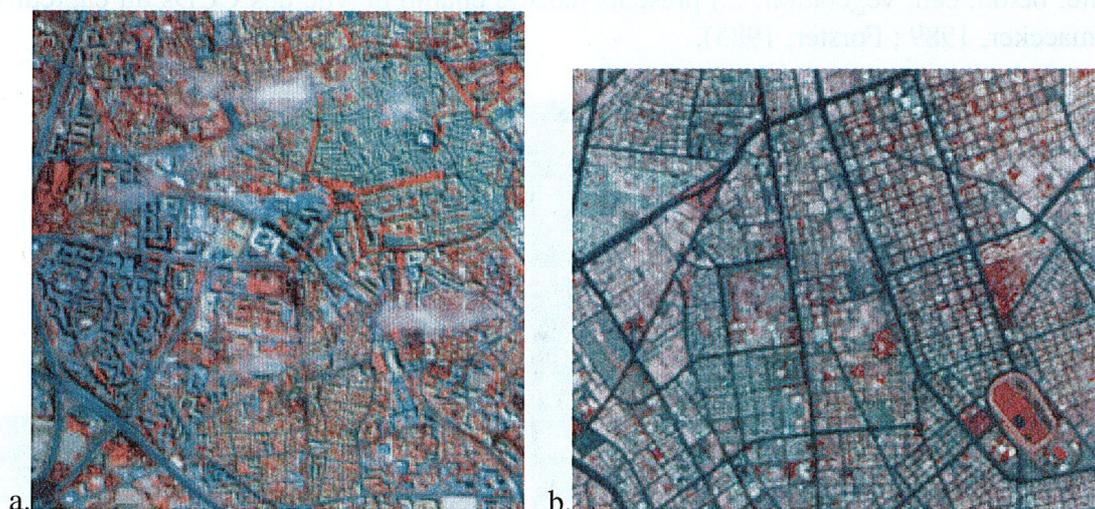


Figure 1.2. Compositions colorées (R=B3, V=B2 et B=B1) des images SPOT acquises sur Aix en Provence (France) à 10 m (CNES © 1993) et sur Riyadh (Arabie Saoudite) à 20 m de résolution spatiale (CNES © 1986). Les tâches blanches sur l'image d'Aix en Provence correspondent à des nuages.

La figure 1.2a présente ainsi une ville française très ancienne, Aix en Provence, à 10 m de résolution spatiale où le réseau routier est difficilement perceptible dans sa globalité. Dans la partie la plus ancienne de cette ville, en haut à droite de la figure, les rues sont très étroites et donc peu visibles. Par contre, sur la figure 1.2b présentant la ville de Riyadh (Arabie Saoudite) à 10 m de résolution spatiale, le réseau routier quadrangulaire de cette ville est très bien dessiné et facilement détectable.

Cette thèse se place dans le cas le plus simple, c'est-à-dire sur des villes avec de larges structures urbaines et un réseau quadrangulaire. Plus précisément, elle se situe dans le cadre de l'étude de villes où il n'existe pas ou peu de plans à jour. Il est difficile dans certains pays d'élaborer des campagnes de mesures-terrain pour aider le photo-interprète dans son travail de cartographie urbaine. Peu de moyens sont disponibles pour des campagnes de photographies aériennes qui peuvent, par ailleurs, rencontrer de très fortes résistances administratives. Et s'il existe un plan d'extension des villes pour ces pays, le schéma d'aménagement privilégié est généralement celui de villes à réseau routier quadrangulaire.

Le **chapitre 2** présente un état de l'art des diverses méthodes employées pour extraire, automatiquement ou semi-automatiquement, les routes des images de résolution spatiale décimétrique, métrique ou sub-métrique (*i.e.* images satellitaires ou aéroportées). Si certains auteurs utilisent des outils génériques de traitement d'images, d'autres ont développé des techniques plus spécifiques à l'extraction des routes à partir d'images de télédétection. Une analyse de ces méthodes et de leurs performances nous a permis de cerner les différentes difficultés rencontrées lors de l'extraction, toute ou semi-automatique, d'une route des images de télédétection et de préciser leurs avantages et leurs limites.

Au regard des problèmes rencontrés, des caractéristiques des villes étudiées et de l'analyse des diverses méthodes proposées dans la littérature, nous définissons, dans le **chapitre 3**, les modèles de "rue" et de "réseau routier" que nous allons employer. Ces modèles permettent de bien définir la problématique et donc, la stratégie adéquate au type de villes choisi et au type d'images disponibles. Ce chapitre présente également la nouvelle méthode semi-automatique d'extraction des bords et des caractéristiques (terre-pleins centraux et secondaires) des rues que nous avons élaborées. Les traitements privilégiés sont ceux qui s'appliqueront à toutes sortes d'images (*i.e.* de différentes résolutions spatiales et spectrales) de télédétection de villes à réseau urbain quadrangulaire.

Le **chapitre 4** introduit les différentes techniques d'évaluation de la qualité des résultats. Une analyse visuelle des rues extraites et du réseau extrait par notre méthode est effectuée. Cependant, elle n'est pas suffisante pour évaluer ses limites. Aussi, nous définissons, dans ce chapitre, des critères quantitatifs d'évaluation des résultats issus de l'application de notre méthode. Les critères quantitatifs d'évaluation, que nous avons créés ou trouvés dans la littérature, sont basés sur :

- l'emprise des rues extraites ;
- le positionnement des bords et des caractéristiques des rues extraites ;
- des indices de connectivité du réseau de la voirie urbaine.

Les taux d'erreur issus de ces critères quantitatifs permettront alors de fixer les limites d'utilisation de la méthode développée.

Enfin, le **chapitre 5** présente différentes applications de cette nouvelle méthode d'extraction semi-automatique du réseau de la voirie urbaine. Les évaluations qualitatives et quantitatives des différents résultats sont présentées et analysées afin de fixer les limites de

cette méthode. Ainsi, les cartographes urbains pourront fabriquer, à partir de l'application de cette méthode semi-automatique, les plans de différentes villes quadrangulaires aux échelles cartographiques adéquates par exemple.

Le **chapitre 6** conclut ce travail. Il rassemble les différents résultats. Une réflexion sur cette nouvelle méthode semi-automatique y est présentée. Cette réflexion permet de définir et cerner ses domaines d'applications et son utilité pour des utilisateurs potentiels. Enfin, nous finissons ce chapitre par les suites à mener à ces travaux pour améliorer la qualité des résultats ou l'automatisation de la méthode.

Chapitre 2

EXTRACTION DE ROUTES : ETAT DE L'ART

Chapitre 2

EXTRACTION DE ROUTES : ETAT DE L'ART

Les travaux concernant la télédétection et l'extraction des réseaux routiers, ferrés ou fluviaux à partir des images satellitaires ou aéroportées ont débuté dans les années soixante-dix. Les publications sont nombreuses sur ce sujet et les approches variées. Même si la plupart de ces travaux concernent les routes, la similitude entre route et rue est suffisamment grande pour que nous profitons de ces travaux.

Nous allons commencer par nous intéresser au modèle de route utilisé par les différents auteurs. Puis, nous aborderons les différentes méthodes appliquées pour extraire le réseau routier à partir d'images satellitaires et aéroportées. Pour finir, nous analyserons les différents résultats obtenus.

Une route est, par définition, une voie carrossable reliant des villes ou des villages (dictionnaire Larousse). En général, une route est un objet linéaire de largeurs et de courbures prédéfinies. De plus, elle est généralement plane. Mais ces définitions ne suffisent pas pour caractériser complètement ce qu'est une route dans les images. Pour qu'un système de traitement d'image numérique puisse reconnaître et localiser des objets spécifiques dans une image (satellitaire ou aéroportée), celui-ci doit posséder un modèle, éventuellement implicite, des objets à extraire ainsi que l'apparence de ces objets dans l'image.

La nature spectrale des données est également importante lors de la détection des routes sur les images. En effet, sur certaines bandes spectrales (SPOT panchromatique ou Landsat TM 1, 2 et 3 par exemple), les routes apparaissent comme des lignes brillantes par rapport à leur environnement, alors que sur d'autres bandes (Landsat TM 4 et 5 par exemple), elles se présentent comme des lignes sombres. Il faut donc tenir compte de la bande spectrale dans laquelle l'image a été acquise pour avoir une idée de l'apparence d'une route par rapport à son environnement sur cette image. Cependant, un seul profil de radiométrie ne peut être utilisé pour représenter une route. En effet, la réponse spectrale d'une route varie en fonction de ses différents revêtements ou de ses différents états de surface (route neuve bien lisse, route avec portions abîmées, ...). Mais, une route est caractérisée par une bonne homogénéité de sa radiométrie le long de son axe et par de forts ou faibles contrastes avec son environnement dans la direction perpendiculaire à son axe.

Les routes possèdent également une courbure connue *a priori*. On peut trouver des courbures faibles et variant peu pour des routes départementales en plaine ou pour des autoroutes par exemple, comme des courbures prononcées au niveau des intersections ou pour des routes de montagne par exemple. Il en va de même pour les rues d'une ville.

Sur les images satellitaires traitées dans la littérature, la résolution spatiale est supérieure ou égale à 10 m. Aussi, les routes visibles sur ce type d'images sont les voies de communication principales du réseau routier telles que les routes départementales ou les autoroutes. Les routes à deux voies y sont représentées par des lignes, tandis que les routes à multiples voies y apparaissent comme des éléments linéaires de 2 à 3 pixels de large formés de deux contours parallèles. La résolution spatiale des images est donc très importante dans la caractérisation des différents types de routes perceptibles dans les images.

Ainsi, la détection des routes sur les images satellitaires revient à rechercher des éléments linéaires dans les images ayant :

- un profil radiométrique local tel que présenté dans le tableau 2.1,
- une largeur de 2 à 3 pixels maximum,
- deux contours antiparallèles (figure 2.1) pour les routes à voies multiples,
- une courbure connue *a priori* amenant à une certaine liberté angulaire dans la détection des routes.

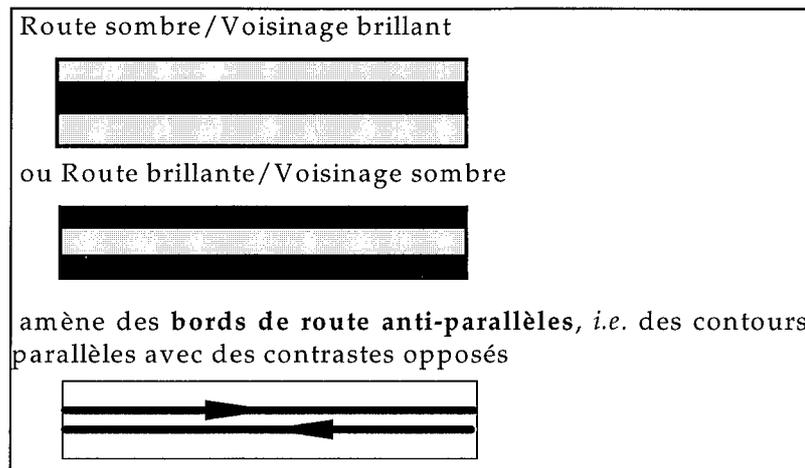


Figure 2.1. Définition des contours antiparallèles pour une route.

Tableau 2.1. Profils radiométriques locaux des routes.

| Style de routes / perception visuelle | routes à deux voies | routes à multiples voies |
|--|---------------------|--------------------------|
| lignes brillantes | | |
| lignes sombres | | |

Sur les images aéroportées, la résolution est métrique ou sub-métrique. Aussi, la perception des routes passe du linéique (1 à 3 pixels de large) au surfacique. Les routes sont alors représentées par des éléments linéaires de largeur rarement inférieure à 5 ou 6 pixels. Les caractéristiques définies précédemment sont toujours valables pour les modèles employés pour spécifier les routes sur les images aéroportées.

La détection des routes sur de telles images revient donc à rechercher des éléments linéaires, dont la ou les largeur(s) sont connues *a priori*, et qui sont constitués de bords antiparallèles (figure 2.1). Cependant, dans ce type d'images, les routes recherchées auront un profil radiométrique représentant, localement, une vallée ou un plateau de largeur connue, comme pour les routes à multiples voies sur les images décimétriques.

Maintenant qu'un modèle de "route" a été défini, nous allons nous intéresser aux différents travaux effectués pour détecter et extraire le réseau routier à partir d'images satellitaires ou aéroportées.

2.1. Méthodes employées pour extraire les routes des images de télédétection

Dans la littérature, une plus grande importance est donnée à la résolution spatiale lors du choix des images satellitaires à traiter. La nature multispectrale des données n'est pas souvent prise en compte dans les diverses méthodes appliquées à l'extraction du réseau routier. Ainsi, les traitements sont les plus souvent appliqués aux données panchromatiques du satellite SPOT. En effet, c'est ce canal qui possède la résolution spatiale la plus fine (10 m) dans le jeu de données utilisé dans la littérature (voir tableau 2.2). Quelques méthodes ont cependant été développées pour des données multispectrales issues de Landsat TM (à 30 m ou rééchantillonnées à 15 m de résolution spatiale) et les bandes XS de SPOT (à 20 m ou rééchantillonnées à 10 m de résolution spatiale).

Tableau 2.2. Données utilisées dans la littérature dans l'extraction du réseau routier à partir d'images satellitaires.

| Capteur | Bande Spectrale | Résolution Spatiale |
|------------|--------------------|--------------------------------|
| Landsat TM | TM 1,2,3,4,5 et 7 | 30 m et rééchantillonnées à 15 |
| SPOT HRV | Panchromatique | 10 m |
| | XS 1,2 et 3 | 20 m et rééchantillonnées à 10 |
| IRS-1A | proche infra-rouge | 36.25 m |

Les traitements appliqués aux images aéroportées s'effectuent, quant à eux, sur des images panchromatiques de 25 cm à 2 m de résolution spatiale.

La plupart des auteurs utilisent une seule image pour extraire les routes à partir des images de télédétection, *i.e.* qu'ils n'emploient qu'un seul canal en entrée de leur algorithme. Ils effectuent donc un traitement monocanal. Même les auteurs utilisant la nature multispectrale des données à leur disposition appliquent un traitement monocanal ; le canal d'entrée étant, dans ce cas-là, une combinaison de plusieurs canaux.

Quel que soit le type d'image considérée, les méthodes appliquées pour en extraire le réseau routier sont développées en deux opérations : l'extraction de lignes et le suivi de routes. Ces deux opérations peuvent être combinées ou non. Ces différentes méthodes sont généralement précédées d'un filtrage afin d'éliminer le bruit et/ou rehausser les contrastes. Ces méthodes peuvent être tout ou semi-automatiques.

Nous allons commencer par nous intéresser aux différentes approches employées pour extraire les lignes à partir des images de télédétection. Les diverses méthodes utilisées dans les algorithmes de suivi de route seront abordées dans une seconde partie.

2.1.1. L'extraction de lignes

Certains auteurs utilisent des traitements génériques tels que des outils de filtrage ou de morphologie mathématique. D'autres préfèrent employer des méthodes plus spécifiques en utilisant des formalismes provenant d'autres disciplines telles que les champs de Markov.

2.1.1.1. La morphologie mathématique

Destival (1987) et Serendero (1989) emploient des outils de morphologie mathématique pour extraire les lignes, brillantes par rapport à leur environnement, supposées correspondre à une route, des images panchromatiques (SPOT-HRV) à leur disposition. La transformation dite du «chapeau haut de forme» suivi d'un seuillage est appliquée afin d'obtenir une image binaire de pixels supposés appartenir au réseau routier.

Cette transformation permet de ne conserver de l'image originale que les pics ou les crêtes qui «entrent» (au moins dans l'une des directions) dans le chapeau supposé de hauteur infinie. Le résultat dépend de la largeur et/ou de la hauteur des sommets à conserver.

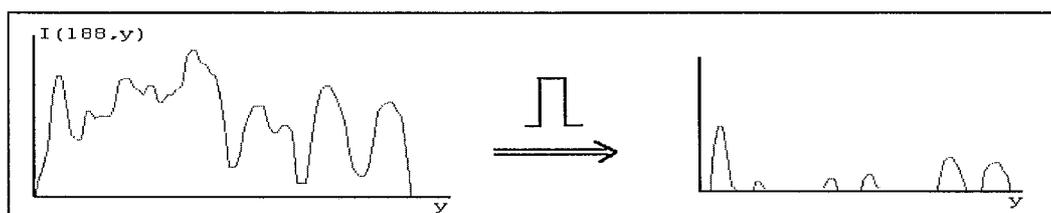


Figure 2.2. A gauche : exemple de profil transversal d'une rue. On supprime les pics qui entrent dans le chapeau haut de forme. A droite : par différence avec le profil d'origine, les pics apparaissent (les minima sont ramenés à zéro).

La transformation dite du «chapeau haut de forme» est définie, pour le traitement des colonnes, par :

$$G(x, y_0) = \left\{ x / \left[F(x, y_0) - F_B(x, y_0) \right] \geq t_x \right\} \quad (2.1)$$

où $G(x, y)$ est l'image résultat, (x, y) étant la position du point considéré en ligne et en colonne.

y_0 est la position de la colonne considérée,

$F(x, y)$ est l'image à traiter,

$F_B(x, y)$ est l'ouvert, *i.e.* le dilaté de l'image érodée par un même élément structurant B ,

t_x est la valeur seuil pour les lignes.

L'intérêt de cette méthode est donc d'extraire les zones claires de l'image en fonction des critères de forme (définis par l'élément structurant) et du contraste relatif des pixels par rapport à leur voisinage.

2.1.1.2. Le filtrage linéaire

Wang et Howarth (1987) et Wang *et al.* (1996) appliquent des masques directionnels à leurs images pour détecter et extraire les routes représentées par des lignes (minces ou épaisses) sur des images satellitaires à 30 m et 10 m de résolution spatiale respectivement.

L'application de filtres directionnels (Wang *et al.*, 1996) permet de détecter les routes quelles que soient leurs directions (horizontales, verticales ou diagonales) ou leur courbure (faible ou prononcée) dans les images. La taille de ces filtres dépend alors de l'épaisseur de la ligne recherchée. Quelques exemples sont présentés à la figure 2.3. Douze filtres sont utilisés au total, ce qui permet d'extraire d'une image panchromatique à 10 m de résolution spatiale, par convolution et selon différents critères de détection, les routes présentes jusqu'à 2 à 3 pixels de large.

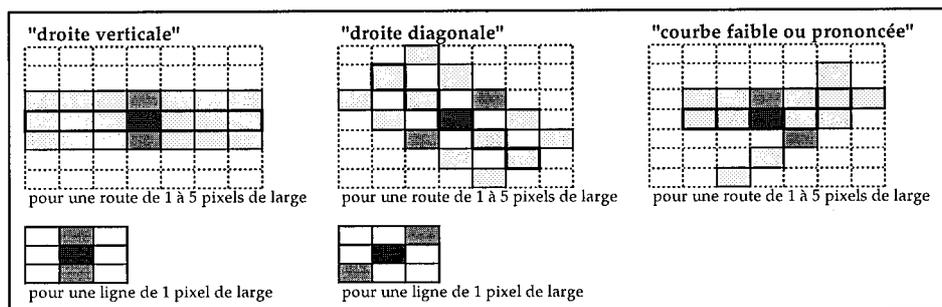


Figure 2.3. Opérateurs utilisés dans le détecteur de lignes de Wang *et al.* (1996) (fenêtres 7x7) basés sur les masques 3x3.

Les masques construits par Wang et Howarth (1987) représentent les 8 directions possibles à suivre pour une ligne (figure 2.4).

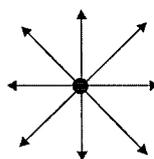


Figure 2.4. Les 8 directions possibles à suivre pour une ligne (entre 2 pixels).

La convolution de ces masques avec une image Landsat à 30 m de résolution spatiale et quelques critères de sélection (la ligne représente une route ou non) permettent d'extraire les points de départ (pixels et direction à suivre) de l'algorithme de suivi de routes qui fait suite à cette première étape de leur algorithme d'extraction du réseau routier.

Wang et Liu (1994) préfèrent utiliser un algorithme analysant le profil de route dans la direction prise par le gradient de l'image. Cet algorithme est appliqué à des images décimétriques de Landsat TM (30 m de résolution spatiale) et SPOT XS (20 m). Son principe est le suivant :

- en chaque pixel, la direction du gradient maximal est calculée. Si une ligne passe par le pixel considéré, l'orientation de la ligne sera perpendiculaire à la direction du gradient.
- un profil dans cette direction est défini par un nombre fini de pixels appartenant à la direction du gradient et centrés sur le pixel considéré (figure 2.5).
- une approximation polygonale est effectuée sur cette liste de pixels.
- le pixel considéré comme appartenant à la ligne sera celui où la fonction présentera un extremum (figure 2.5). Ainsi, si la ligne recherchée est brillante, l'algorithme recherchera la valeur maximale de la fonction d'approximation et, si la ligne est sombre, ce sera la valeur minimale du profil qui sera prise en compte.

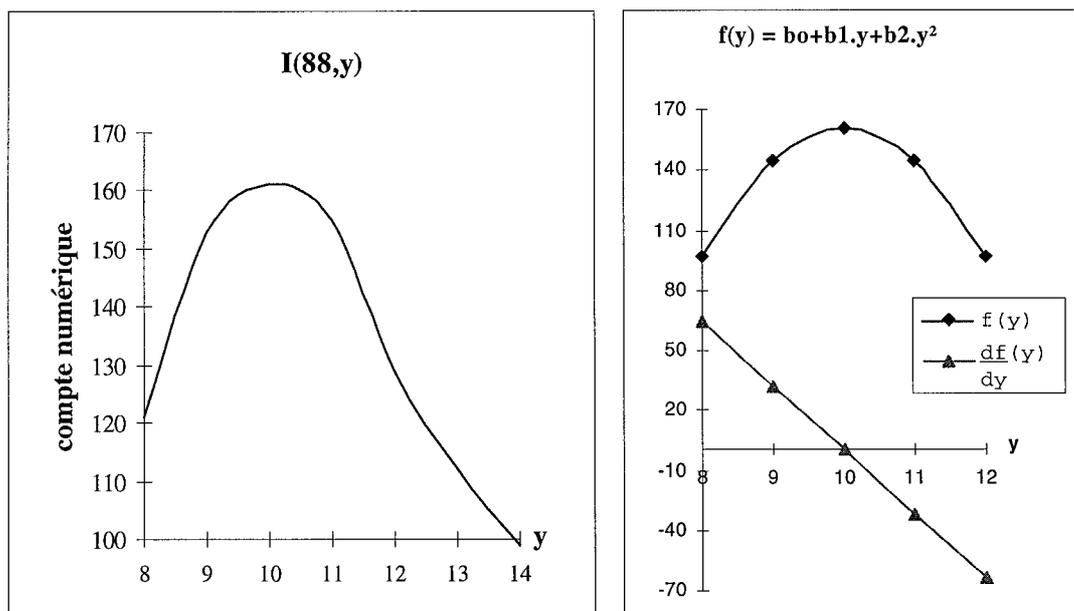


Figure 2.5. Principe utilisé par l'algorithme de Wang et Liu (1994).

A gauche : profil dans la direction du gradient autour de $y_0=10$

A droite : fonction d'approximation du profil et recherche de l'extremum de la fonction \Rightarrow
 y_0 appartient bien à la route.

Pour détecter les éléments linéaires dans les images panchromatiques (SPOT-HRV) à 10 m de résolution spatiale, Khatir (1988) utilise l'image gradient de son image originale. Un seuillage de cette image permet d'obtenir une image binaire des contours présents dans l'image originale (rivières, bordures des champs, routes, ...). L'application de quelques critères d'appartenance (directions possibles, nombre de pixels-contour dans la fenêtre de balayage, ...) permet alors de créer une image binaire des éléments linéaires et l'image des directions correspondant à ces éléments linéaires détectés.

2.1.1.3. Utilisation des champs de Markov

Merlet et Zerubia (1993, 1996) établissent leur détecteur de lignes sur une méthode de segmentation basée sur l'algorithme de Fischler qui utilise les champs markoviens en une programmation dynamique. L'algorithme de Fischler permet d'obtenir, par construction, des lignes minces et continues. Cet algorithme est étendu à des cliques d'ordre supérieur pour tenir compte du contraste route/environnement, et à des voisinages d'ordre supérieur pour introduire la notion de courbure. De plus, un modèle dynamique permet d'utiliser cette information de courbure d'une manière plus globale et naturelle. Ce détecteur de lignes est appliqué à une image panchromatique à 10 m de résolution spatiale. C'est un traitement semi-automatique où les points de départ de l'algorithme sont définis manuellement.

2.1.1.4. Utilisation des réseaux de neurones

Bhattacharya et Parui (1997) conçoivent l'extraction de routes sur les images de télédétection comme un problème de classification où les pixels doivent être classés en 'route' ou en 'non-route'. Pour ce faire, ils ont développé une méthode basée sur un réseau de neurones : le perceptron multicouches. Ce réseau est à apprentissage supervisé : le système apprend à reconnaître des classes prédéfinies. Ainsi, les poids synaptiques sont «appris» en présentant des exemples de chaque classe au réseau de neurones lors de l'apprentissage. Ils ne sont donc pas déduits d'une connaissance *a priori* sur les formes à reconnaître. Les règles de décision se «forment» dans les poids synaptiques au cours de l'apprentissage.

L'entrée du perceptron multicouches est une fenêtre glissante de $(n \times n)$ pixels. La taille de cette fenêtre est importante pour la réussite de l'apprentissage du réseau de neurones. Elle ne doit pas être plus petite que la largeur des routes à extraire et doit être suffisamment large pour contenir 1 pixel 'route' ainsi que des pixels 'non-route'.

Pour l'apprentissage de ce réseau, 25 fenêtres contenant 1 pixel de chaque classe ont été choisies manuellement. Ces fenêtres-test représentent les différentes possibilités existant pour la classe 'route' et la classe 'non-route' sur les images.

La méthode ainsi développée a été appliquée sur des images acquises en bande proche infrarouge par le capteur LISS du satellite IRS-1A et en panchromatique par le capteur HRV de SPOT. Ces images ont une résolution spatiale de 36,25 m et 10 m respectivement. Ces bandes spectrales ont été choisies pour le fort contraste existant entre les pixels 'route' et les pixels environnants.

Cette méthode d'extraction de routes permet d'extraire les routes existant sur différentes images-test à partir des petits échantillons fournis pour l'apprentissage du réseau de neurones.

L'opération consistant à détecter les lignes dans les images est souvent précédée par un filtrage permettant d'atténuer le bruit et de rehausser les contrastes (Khatir, 1988 ; Wang et Liu, 1994 ; Wang *et al.*, 1996) et est suivie par un chaînage des alignements de pixels de longueur suffisante (Wang et Liu, 1994 ; Serendero, 1989 ; Bhattacharya et Parui, 1997).

2.1.2. Le suivi de lignes

Pour extraire le réseau routier des images de télédétection, de nombreux auteurs leur appliquent différents algorithmes de suivi de lignes/routes. Ces algorithmes se regroupent en quatre grandes familles. Le suivi peut se faire par :

- la recherche du chemin optimal parmi plusieurs hypothèses,
- l'utilisation d'outils de morphologie mathématique,
- un filtrage de Kalman,
- des techniques plus spécifiques utilisant des approches hiérarchiques.

2.1.2.1. Recherche du chemin optimal

Le suivi de routes s'effectue ici par la recherche, dans un arbre de possibilités, du chemin optimal que doit suivre la route considérée dans l'image. Ainsi, l'algorithme de suivi de routes revient à résoudre un problème d'optimisation avec des hypothèses de départ (pixels de la route et direction, amorces de routes) et des contraintes portant sur la liberté angulaire que peut prendre la direction à suivre par la route par exemple. Plusieurs algorithmes d'optimisation sont proposés dans la littérature pour extraire le réseau routier à partir des images de télédétection.

Wang et Howarth (1987) effectuent une recherche dans un graphe où chaque noeud représente la direction d'un segment de route en ce point (figure 2.6). Les noeuds sont reliés si l'angle entre les noeuds est inférieur ou égal à $\pi/4$.

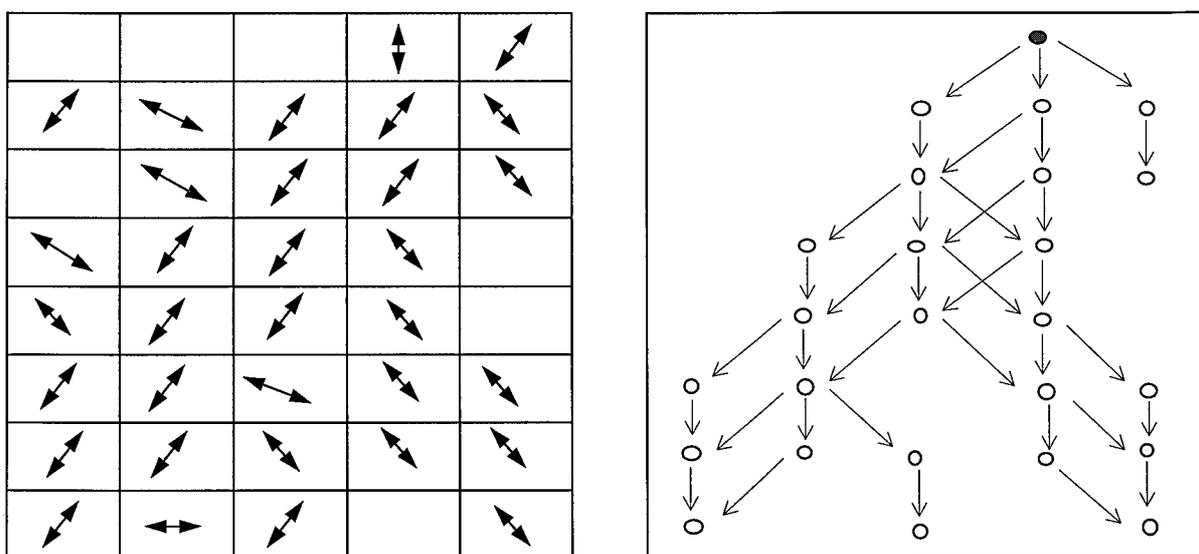


Figure 2.6. Interprétation du graphe pour le suivi de lignes de Wang et Howarth (1987).

A gauche : directions des segments dans l'image.

A droite : graphe généré à partir des directions trouvées et démarrant au noeud grisé.

Les tronçons de route servant d'amorces de départ à l'algorithme sont trouvés automatiquement par un détecteur de lignes qui a été présenté à la section précédente.

Jedynak *et al.* (1991, 1995) adaptent le jeu des « vingt questions » à la reconnaissance de formes. Cet algorithme utilise un arbre de décision où chaque branche représente une direction possible pour un segment de la route recherché en fonction du segment détecté précédent. Ici, le problème consiste à déterminer la stratégie optimale pour minimiser le nombre moyen de questions (branches) nécessaires à la recherche de la solution vraie (direction suivie par la route).

L'algorithme utilisé par Airault *et al.* (1994, 1995-A, 1995-B) est une aide à la saisie du réseau routier. Il est appliqué à des images aériennes de 60 cm de résolution dans le cadre d'une base de données topographiques (BDtopo) de l'Institut Géographique National. Cet algorithme cherche à extraire précisément l'axe des routes. Sa stratégie est basée sur deux étapes :

- une étape de **détection**. Elle est basée sur l'optimisation d'un critère d'homogénéité directionnelle. Cette étape est assurée par un algorithme de suivi de routes. Celui-ci recherche le chemin optimal parmi un arbre de chemins possibles (chaque nouveau pas a

une liberté angulaire de $\pm 45^\circ$ pour tenir compte des intersections à angle droit). Cette étape assure seulement que le tracé de l'axe se situe entre deux bords anti-parallèles. Les paramètres tels que la radiométrie, la largeur ou l'orientation des routes sont mis à jour dynamiquement.

- une étape de **restitution**. Elle permet de recalibrer le résultat de la précédente étape avec précision. Elle utilise pour ce faire un graphe du réseau et une liste de points de passage.

L'algorithme de suivi de routes peut aussi être développé selon une programmation dynamique de la recherche du chemin optimal (Gruen et Li, 1995). Les paramètres de contraste, de courbure et des points déjà détectés comme appartenant à la route permettent de définir le point suivant de la route. Ce suivi de routes est précédé par un rehaussement local des contrastes effectué à l'aide d'une transformée en ondelettes spécialement construite pour cette opération.

Alparone *et al.* (1992) évaluent, quant à eux, les différents chemins possibles à l'aide d'une fonction coût, fonction qui dépend des propriétés locales de la ligne traitée. Le chemin optimal est alors celui qui a le coût le plus élevé. Leur algorithme ne possède que trois directions possibles à suivre à partir d'un pixel appartenant à la ligne recherchée (figure 2.7.a). Ces trois directions délimitent donc les chemins à suivre (figure 2.7.b).

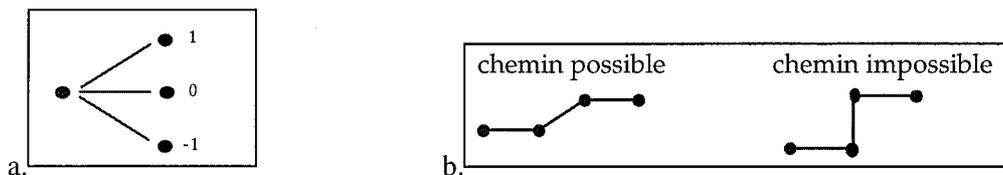


Figure 2.7. Pixels candidats (Alparone *et al.*, 1992) à partir d'un pixel appartenant à la ligne recherchée (a) et les possibilités de chemins qui en découlent (b).

L'algorithme de suivi de routes développé par Serendero (1989) a pour objectifs principaux de connecter les amorces de lignes obtenues par le détecteur de lignes (décrit à la section précédente) et de détecter un chemin à partir d'une amorce isolée. Une fonction coût est associée à chaque chemin possible, fonction dépendant d'un seuil de fiabilité et d'un seuil de dégradation. Ainsi, seuls les chemins ayant le plus fort coût sont supposés appartenir au chemin optimal, la meilleure stratégie étant d'aller le plus droit possible.

2.1.2.2. Morphologie mathématique

Ici, le suivi de lignes consiste à connecter les amorces entre elles lorsqu'elles ont des orientations similaires et si elles ne sont pas trop éloignées les unes des autres. Pour ce faire, Destival (1987) applique des outils de morphologie mathématique tels que la dilatation de taille n de l'image binaire des amorces détectées par un détecteur de lignes (décrit au paragraphe précédent) suivi d'une squelettisation. L'application de ces outils permet de reconstituer les éléments linéaires à partir d'éléments isolés.

2.1.2.3. Filtrage de Kalman

Véran (1993) et Vosselman et de Knecht (1995) basent leur algorithme de suivi de routes sur le filtrage de Kalman.

L'algorithme utilisé par Véran est initialisé par un point de la route donné par l'opérateur. Il est basé sur un filtrage de Kalman étendu et tient compte d'un ou des deux bords de la route pour son suivi. Ces bords de routes sont détectés par l'opérateur de contours de Canny-Deriche. En fait, son suivi revient à considérer la poursuite d'un véhicule supposé circuler au

milieu de la chaussée à une vitesse constante. La direction de la route est estimée par la direction du maximum d'homogénéité dans un voisinage du pixel concerné. L'auteur applique son algorithme sur des images aéroportées de 1 m de résolution spatiale.

Vosselman et de Knecht utilisent un filtrage récursif de Kalman pour leur algorithme de suivi de routes. Celui-ci estime les paramètres décrivant la position et l'état de la route suivie à un instant donné. Ces paramètres sont estimés en comparant le profil d'intensité de la route suivie à l'instant k , avec un profil d'intensité moyen de segment de route. Le modèle de route prend en compte la radiométrie (luminosité et contraste) et la géométrie (largeur et modification de largeur) des routes. Cet algorithme est initialisé par un opérateur qui positionne des petits segments appartenant à la route recherchée. L'application de ce processus a été effectuée sur des images aéroportées de 1,6 m de résolution spatiale.

2.1.2.4. Approches hiérarchiques

Certains auteurs préfèrent utiliser des méthodes plus complexes tenant compte de critères *a priori* de reconnaissance de routes et se basant sur le principe de pensée d'un photo-interprète face à une recherche d'objets particuliers dans une image de télédétection.

Dans son algorithme d'extraction du réseau routier, Khatir (1988) assimile les amorces de lignes détectées à des composantes connexes. La recherche des composantes qui peuvent représenter des routes s'effectue selon certains critères basés sur une vision générale des routes. L'algorithme utilise les trois critères suivants :

- les routes mènent à des zones urbaines/villages,
- les routes ont une courbure régulière,
- les routes ont une radiométrie (en général) plus claire que leur environnement.

A ces trois critères sont associées des probabilités de validité. Grâce à une phase d'apprentissage utilisant comme vérité-terrain la carte correspondant à la zone étudiée, une composante connexe peut être définie comme un certain type de route avec une certaine probabilité. Le seuillage de ces différentes probabilités permet de ne conserver que les composantes connexes représentant sûrement des routes. L'application de cet algorithme s'effectue sur une image panchromatique (SPOT-HRV) à 10 m de résolution spatiale sur une zone relativement plate.

McKeown et Denlinger (1988) préfèrent utiliser une méthode de coopération de plusieurs algorithmes de suivi de routes. Chaque algorithme possède ses propres hypothèses sur le concept "route". Les deux algorithmes les plus utilisés par leur méthode sont le suivi par corrélation de surface et le suivi des bords de la route considérée.

L'algorithme de suivi par corrélation de surface utilise comme points de départ un pixel appartenant à la route, la direction et la largeur de la route considérée. Il est basé sur la corrélation qui existe entre la portion à examiner et une surface de référence de la route. Si la correspondance entre les deux sections est pauvre, la recherche se poursuit dans une autre direction à partir du même point de départ jusqu'à trouver une bonne correspondance. Un modèle des trajectoires possibles de la route donne les points permettant de créer la, ou les, section(s) à analyser.

L'algorithme de suivi des bords de route permet de lier les points possédant une forte amplitude et une forte orientation du gradient dans la direction prévue pour la route. Cet algorithme est basé sur la méthode de détection de routes de Neviata et Babu (1980). La direction de la route recherchée est prévue par une extrapolation parabolique des directions prises par les sections analysées précédemment.

Ces deux algorithmes permettent d'établir, indépendamment l'un de l'autre, un modèle de l'axe de la route, de sa largeur et autres propriétés locales de la route.

Un module intermédiaire permet alors d'établir le taux de réussite de chaque algorithme de suivi et d'extraire les différentes propriétés de la route considérée. Ce module permet également de suspendre un algorithme de suivi en cas d'échec et de le relancer à partir du modèle de route trouvé par un autre algorithme de suivi.

Pour finir, un module, dit de haut niveau, permet une description symbolique de la route en terme de position de l'axe, de la largeur, du revêtement de la route considérée, de la présence ou non de véhicules sur la chaussée, de ponts, ...

Cette méthode a été appliquée sur des images aéroportées de 1 à 3,5 m de résolution spatiale.

Garnesson *et al.* (1989, 1991) ont choisi d'utiliser un système-expert, appelé MESSIE, de type tableau noir pour extraire les routes sur des images aéroportées de 40 et 85 cm de résolution. Ce système utilise le principe suivant :

- détection des contours basée sur une segmentation sélective de l'image (recherche de régions claires par exemple),
- chaînage sur l'image binaire des contours et élimination des chaînes trop courtes,
- approximation des chaînes par des segments de droite,
- groupement perceptuel => extraction des routes en se basant sur des attributs de proximité, de similarité, de continuation et de symétrie.

2.1.3. Utilisation de données multispectrales et traitements appropriés

Wang et Liu (1994) utilisent la nature multispectrale des données satellitaires (Landsat TM ou SPOT XSi) pour extraire le réseau routier. La stratégie employée est la suivante :

1. combinaison de différentes bandes spectrales par des opérations arithmétiques sur les images et/ou par une analyse en composantes principales des bandes. Les bandes spectrales combinées sont choisies par photo-interprétation de telle façon que les routes soient nettement visibles sur les images,
2. application d'un détecteur de lignes à chaque image disponible (originale et combinée),
3. analyse des différentes images résultantes par l'utilisateur afin de ne conserver que celles qui lui semblent les plus probantes,
4. combinaison des images choisies par l'utilisateur => obtention d'une carte du réseau routier (un amincissement est nécessaire pour que le réseau fasse un pixel de large).

Une méthode semi-automatique de détection de la voirie urbaine (Couloigner *et al.*, 1997) a été appliquée à des images multispectrales issues des canaux multibandes HRV des données simulées de SPOT 1-3 (20 m de résolution spatiale) et du futur SPOT 5 (10 m de résolution spatiale). Cette méthode est basée sur une classification ascendante hiérarchique des canaux multibandes des données. Le dépouillement visuel de l'arborescence hiérarchique des classes présentes dans les images-test permet de ne conserver que les classes estimées appartenir au réseau routier urbain. En final de cette détection, un squelette incomplet de la voirie est créé.

Les résultats de cette méthode ont été améliorés par l'utilisation d'une méthode de fusion de données (Couloigner *et al.*, 1998). Cette méthode, appelée ARSIS (amélioration de la résolution spatiale par injection de structures), a permis d'améliorer la résolution spatiale des canaux multibandes par injection des structures provenant du canal panchromatique de meilleure résolution spatiale. Les images multibandes synthétisées par cette méthode ont alors une résolution spatiale de 10 m pour SPOT 1-3 et de 5 m pour le futur SPOT 5.

2.1.4. Traitement multirésolution

Un traitement multirésolution a été employé par Mayer et Steger (1996) et Baumgartner *et al.* (1996) pour extraire le réseau routier sur des images aéroportées. En effet, ils effectuent un sous-échantillonnage sur une image à 25 cm de résolution (appelée image haute résolution) pour obtenir une image à 2 m de résolution (appelée image basse résolution). Ils appliquent des traitements différents selon la résolution de l'image traitée. Ainsi, l'image basse résolution permet d'extraire l'axe central des routes (de largeur inférieure à 3-5 pixels). De l'image haute résolution, sont extraits les bords anti-parallèles des routes. Une combinaison des deux résultats permet d'éliminer les fausses routes détectées par le traitement haute résolution et d'obtenir une cartographie du réseau routier en final.

2.2. Résultats obtenus

Toutes ces méthodes ont été appliquées sur des zones où le réseau routier apparaît clairement. Cependant, ces routes peuvent être masquées par la végétation ou par un environnement de radiométrie similaire (champs, bâtiments, ...), ou elles peuvent aboutir dans un village. Aussi, les algorithmes ont quelques difficultés à bien détecter les lignes et à remplir de larges espaces entre les chaînes de pixels. Le réseau final est donc quelque peu tronqué et troué, et parfois, la route peut se terminer brutalement.

Par contre, si la zone à analyser devient plus complexe (zone urbaine, image avec un faible contraste, image fortement texturée, ...), l'application de ces méthodes aboutit à un réseau encore plus partiel. La figure 2.8 présente un exemple d'extraction du réseau routier à partir d'une image panchromatique à 10 m de résolution de SPOT-HRV de la ville de Sherbrooke (Canada) et de sa banlieue. L'image comprend des tronçons de route d'environ 4 pixels de large, des boulevards de 2 à 3 pixels de large et des rues de 1 pixel de large, ainsi que de nombreuses intersections. L'image résultat de l'algorithme d'extraction du réseau routier montre que le réseau n'est que partiellement détecté.

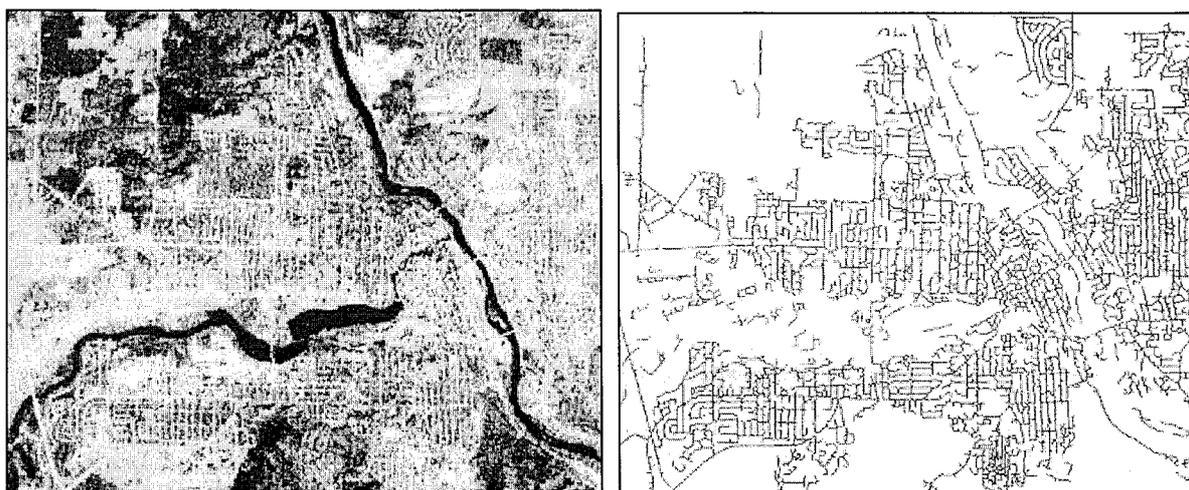


Figure 2.8. A gauche : zone d'étude utilisée par Wang *et al.* (1996) (SPOT HRV Panchromatique à 10 m de résolution).

A droite : réseau routier extrait par leur algorithme appliqué à cette zone (© Wang *et al.*, 1996).

La représentation du réseau routier est assez conforme à celle que l'on peut trouver dans une saisie manuelle de la BDtopo lorsque la méthode de Airault *et al.* (1994, 1995-A, 1995-B) est appliquée sur des images en zone résidentielle. Cependant, cette méthode rencontre des difficultés lorsque les intersections ont des angles trop aigus ou lorsque la courbure de la route est plus prononcée que celle prévue dans les paramètres des algorithmes de traitement.

L'utilisation du principe de Kalman dans un algorithme de suivi de routes donne de bons résultats. Cependant, le filtre de Kalman est sensible aux petites perturbations rencontrées lors du suivi de routes : problème au niveau des intersections à angle droit, au passage des ponts. L'algorithme de Vosselman et de Knecht permet également un bon suivi même lorsque la largeur de la route change.

L'application de MESSIE à la détection des routes permet de relativement bien détecter les bords des routes principales que l'on soit en zone industrielle ou en zone boisée. Les routes secondaires sont également relativement bien détectées.

Les traitements multirésolutions utilisés pour extraire le réseau routier des images satellitaires ont été appliqués sur une zone résidentielle et sur une zone urbaine. Leurs applications permettent d'obtenir de meilleurs résultats que l'application d'un traitement monocanal. Ainsi, les réseaux routiers extraits sont plus complets, bien que toujours partiels, lorsque la nature multispectrale des données est prise en compte.

Le traitement multirésolution a été appliqué sur des images d'une zone rurale incluant un village, des champs et une forêt. Les routes sont parfaitement visibles. Le traitement basse résolution aboutit à une extraction du réseau correcte. Les petites perturbations dues à la présence de voitures sur une route, de champs de radiométrie similaire à celle de la route les longeant ou à l'ombre portée des arbres bordant la route ne sont pas une gêne sur une image à 2 m de résolution. Cependant, la précision géométrique des axes est relativement faible. Le traitement haute résolution est, quant à lui, plus sensible à ces perturbations. Dans ce cas, les bords des routes ne sont pas détectés. On obtient donc un réseau incomplet. La fusion des résultats précédents permet d'éliminer les routes faussement détectées et de remplir quelques occlusions dues aux petites perturbations. Cependant, toutes les occlusions ne sont pas remplies. Le réseau final est donc relativement correct, mais avec quelques tronçons non détectés.

L'utilisation d'un réseau de neurones à apprentissage supervisé donne de bons résultats sur des images décimétriques présentant des routes fortement contrastées en milieu rural. Cependant, la qualité des résultats dépend fortement des échantillons représentant les diverses possibilités des pixels 'route' et 'non route' qui sont utilisés lors de l'apprentissage du réseau. Lorsque la route et son environnement possèdent une radiométrie voisine, la méthode échoue. De même, si une possibilité est oubliée dans le choix des échantillons d'apprentissage, certaines portions de routes ne pourront pas être détectées.

2.3. Conclusion

La littérature propose différentes méthodes pour extraire le réseau routier à partir des images de télédétection (satellitaires ou aéroportées). Comme nous avons pu le constater, ces méthodes sont basées soit sur des outils génériques de traitement d'images, soit sur des outils plus spécifiques. La plupart d'entre elles s'organisent selon les deux opérations suivantes, qu'elles soient combinées ou non : l'extraction de lignes et le suivi de routes. Cependant, quelques méthodes utilisent une technique, plus ou moins complexe, de classification.

Pour la plupart des images satellitaires, ces méthodes sont appliquées à des images issues du canal panchromatique de SPOT. En effet, c'est ce canal qui proposait la meilleure résolution spatiale, *i.e.* 10 m, dans les données satellitaires jusqu'à présent.

Certaines composantes de la scène peuvent apparaître dans certaines bandes spectrales et être peu ou prou visibles dans d'autres bandes. L'utilisation de la nature multispectrale des données pourrait donc être un atout dans l'extraction du réseau routier des images de

téledétection, avec sans doute une complexité accrue des algorithmes. Très peu de travaux ont été publiés prenant en compte la nature multispectrale des données (Landsat ou SPOT).

La littérature nous apporte peu d'informations sur l'extraction du réseau routier en milieu urbain, ce qui est notre objectif. Peu d'auteurs s'y sont intéressés. Les seules applications au milieu urbain, trouvées dans la littérature, se rapportent à des villes possédant des structures urbaines espacées et un réseau routier quadrangulaire bien perceptible dans des images décimétriques (figure 2.8). Il est vrai que le milieu urbain est un paysage très complexe. Il est donc peu aisé de détecter exactement et complètement le réseau routier en milieu urbain.

La résolution spatiale des données intervient également. En effet, plus la résolution spatiale des données s'affine, plus la discrimination entre deux objets urbains s'améliore. Ainsi, plus la résolution spatiale sera fine, plus la cartographie de la voirie urbaine sera riche (Couloigner *et al.*, 1998). Cependant, la haute résolution spatiale, en introduisant des petits détails (présence de véhicules sur la chaussée, arbres bordant les rues, ...), introduit des perturbations qui nuisent à l'extraction automatique des rues. Ces perturbations disparaissent sur des images de plus basse résolution spatiale (Heipke *et al.*, 1996). L'utilisation de la multirésolution dans les méthodes d'extraction du réseau routier en milieu urbain à partir d'images à très haute résolution spatiale offre donc un grand potentiel.

Au vu de toutes ces informations, nous élaborons, dans un premier temps, un modèle de «rue» adapté à des données de différentes résolutions spatiales et un modèle de «réseau routier». Ces modèles sont basés sur les propriétés radiométriques, géométriques des modèles de "route" définis dans la littérature et sur les connaissances *a priori* des différentes classes de rues présentes dans nos données. Puis, dans un deuxième temps, nous développons une nouvelle méthode d'extraction du réseau routier en milieu urbain.

Chapitre 3

*UNE NOUVELLE METHODE D'EXTRACTION
DU RESEAU ROUTIER URBAIN*

Chapitre 3

UNE NOUVELLE METHODE D'EXTRACTION
DU RESIN AU ROUTIER URBAIN

Avant d'élaborer une méthode pour extraire le réseau routier urbain des images satellitaires, il convient d'établir un modèle explicite des concepts «rue» et «réseau routier» dans notre cas d'étude. Ces modèles permettront alors d'établir la stratégie adéquate à l'extraction du réseau routier en milieu urbain.

3.1. Les données

Notre étude va se concentrer sur l'extraction du réseau routier urbain de villes possédant des structures urbaines espacées et un réseau routier quadrangulaire. Pour le développement de la méthode, nous disposons de deux jeux de données sur deux villes d'Arabie Saoudite : Riyadh et Jeddah (tableau 3.1).

Tableau 3.1. Les données utilisées dans notre étude.

| Capteur | KVR-1000 | SPOT panchromatique |
|---------------------|----------|------------------------|
| résolution spatiale | 2 m | 10 m |
| Riyadh | oui | non |
| Jeddah | oui | oui |

Ces villes présentent un réseau routier bien perceptible quelle que soit l'image étudiée. Les images de haute résolution spatiale représentant ces villes ont été acquises dans l'après-midi par le capteur russe KVR-1000 en mars 1991 pour Jeddah et en septembre 1991 pour Riyadh. Ce capteur est analogique et les données ont été numérisées à 2 m de résolution spatiale.

La majorité du réseau routier de ces villes est quadrangulaire. Ce réseau est standardisé et se divise suivant les quatre classes de rues distinctes :

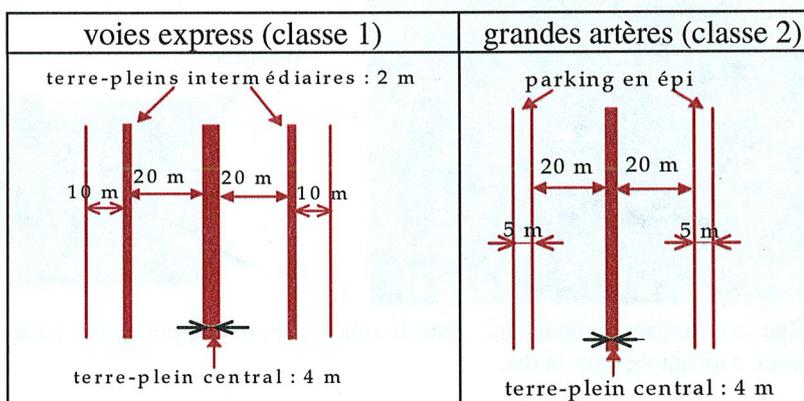


Figure 3.1. A gauche : rue de classe 1 (68 m de large environ)
A droite : rue de classe 2 (54 m de large environ)

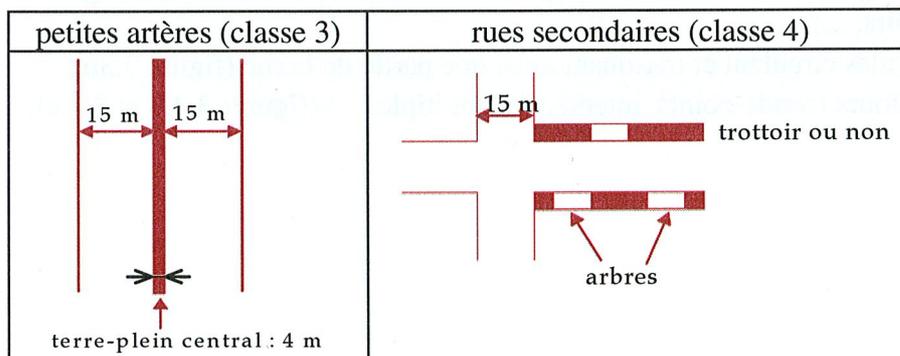


Figure 3.2. A gauche : rue de classe 3 (34 m de large environ)
A droite : rue de classe 4 (15 m de large environ).

3.2. Analyse des données

L'analyse visuelle des images montre que les rues apparaissent clairement sur les images à 2 m de résolution spatiale quelle que soit leur classe d'appartenance. Cette perceptibilité des rues dépend fortement de la qualité des images originales. Ainsi, l'image de Riyadh ne présente pas une aussi bonne qualité que l'image de Jedda : le film est fréquemment rayé et l'effet de moiré est très prononcé. Cependant, les images ne présentent aucune distorsion. Les formes des objets urbains sont donc préservées sur ces images.

L'analyse bibliographique a montré que les rues ne possèdent pas toujours la même réponse spectrale. Cette réponse dépend aussi bien du type de revêtement des rues que de leur état par exemple. L'observation des images montre cependant que le contraste rue-environnement est assez important pour que les voies express, les grandes et les petites artères du réseau étudié soient bien perceptibles. Ce contraste est plus faible pour les rues secondaires qui sont ainsi plus difficilement visibles.

L'analyse des images et l'étude bibliographique permettent également d'identifier différentes perturbations que peuvent rencontrer les algorithmes d'extraction du réseau routier urbain sur des images à haute résolution spatiale. Ces perturbations sont de plusieurs ordres :

- ♦ des perturbations dues à la perception naturelle des objets urbains à détecter (les rues), comme par exemple :
 - ombre portée (qui varie en fonction de l'heure solaire d'acquisition et de l'angle de visée du capteur) des bâtiments (figure 3.3.b) ou des arbres,
 - des arbres masquant une partie de la rue,
 - ponts et toboggans masquant une partie de la rue,
 - tunnels ou voies sans issue interrompant brusquement la rue (figure 3.3a).

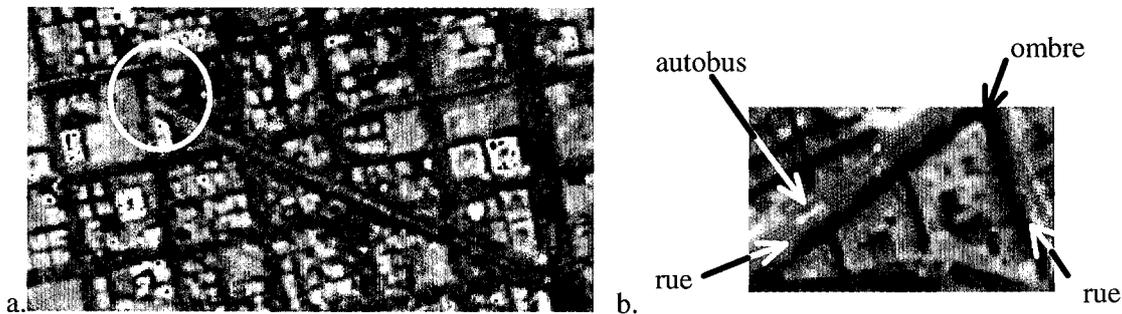


Figure 3.3. (a) Rue se terminant abruptement - dans le rond - ; (b) ombre portée des bâtiments sur les rues et présence d'un autobus sur la rue.

- ♦ des problèmes influençant la complexité algorithmique :
 - voisinage de radiométrie similaire à la rue à détecter (bâtiments (figure 3.4a), parkings, trottoirs, ...),
 - véhicules circulant et masquant ainsi une partie de la rue (figure 3.3b),
 - carrefours (ronds-points, intersection multiple, ...) (figures 3.4.b et 3.4.c).

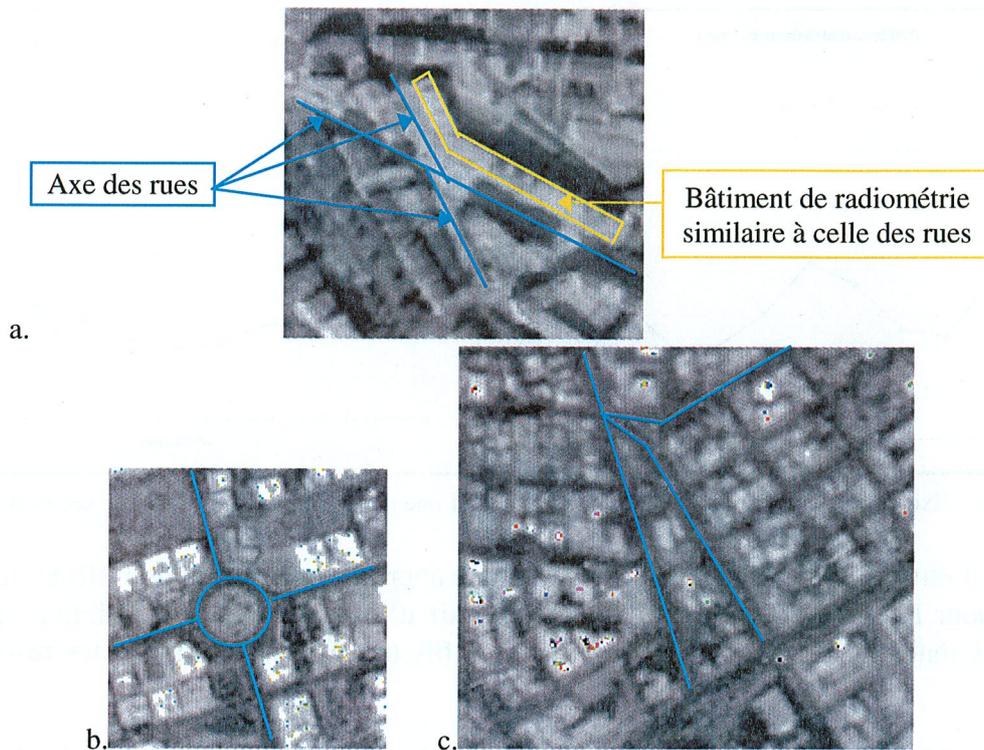


Figure 3.4. Radiométries très proches entre rue et son environnement (a) ; rond-point à quatre branches (b) ; intersection complexe de trois rues (c).

Enfin, l'analyse des images montre que le profil transversal local d'une rue dépend de sa classe d'appartenance. Ainsi, les voies express présentent trois terre-pleins représentés par des maxima locaux sur leurs profils transversaux (figure 3.5.a). Les grandes et les petites artères présentent des profils transversaux similaires avec un terre-plein central représenté par un maximum local sur ceux-ci (figure 3.5b et figure 3.6a). La seule différence entre ces deux classes de rues est la largeur des rues. Les rues secondaires, quant à elles, ne présentent qu'un minimum local sur leurs profils transversaux (figure 3.6b).

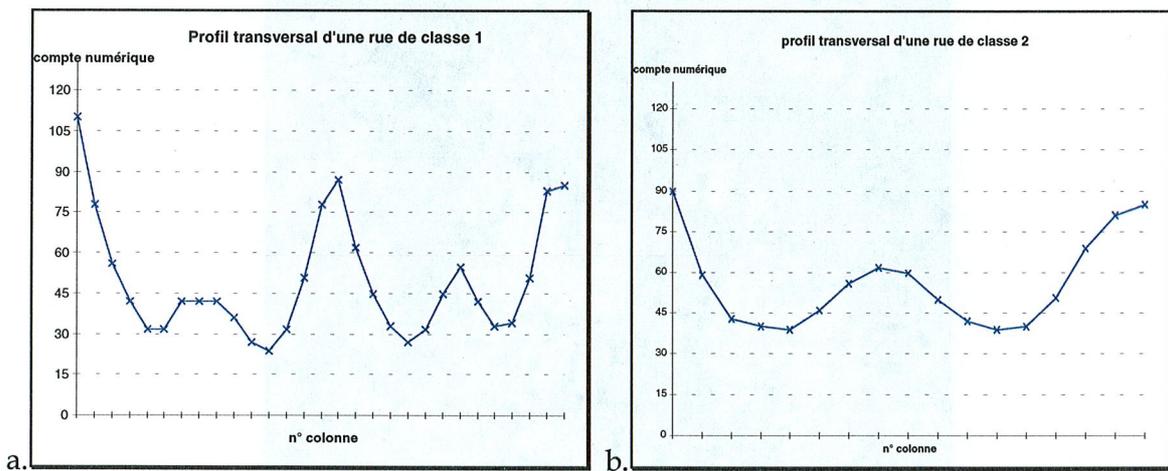


Figure 3.5. Exemples de profil radiométrique transversal local d'une voie express (a), d'une grande artère (b).

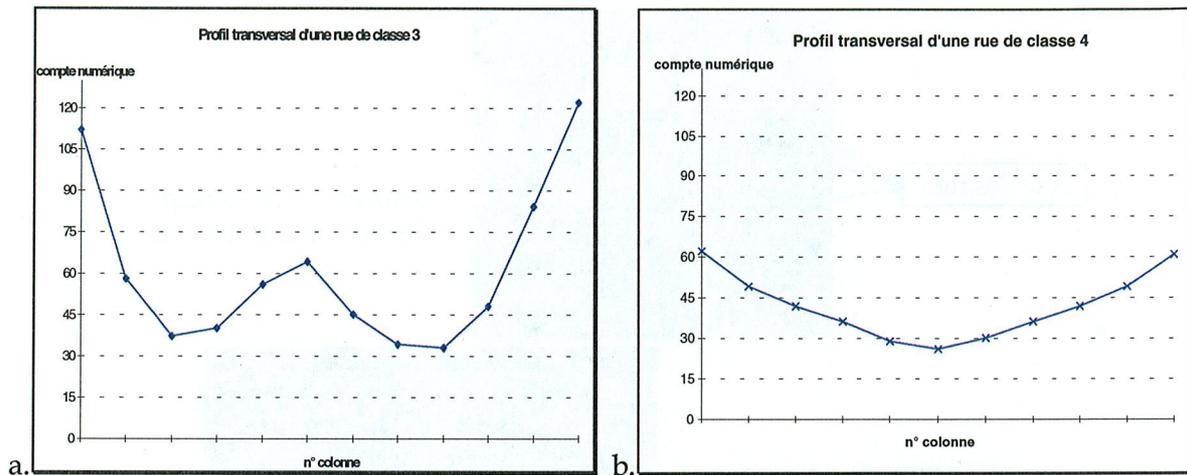


Figure 3.6. Exemples de profil radiométrique transversal d'une petite artère (a) et d'une rue secondaire (b).

Puisque l'étude bibliographique a montré qu'une approche multirésolution offrait un grand potentiel pour l'extraction du réseau routier à partir d'images de haute résolution spatiale, nous allons maintenant observer ces différents profils transversaux à différentes résolutions spatiales.

La figure 3.7 présente une partie de la ville de Jeddah (Arabie Saoudite) à 2 m de résolution spatiale. Une voie express (classe 1) peut être observée dans la partie droite de l'image, allant du nord au sud. Sur cette image sont aussi visibles une grande artère (classe 2) perpendiculaire à la voie express et une petite artère (classe 3) parallèle à la voie express (dans la partie gauche de l'image), ainsi que de nombreuses rues de classe 4.



Figure 3.7. Extrait du canal panchromatique du capteur russe KVR-1000 à 2 m de résolution spatiale sur la ville de Jeddah (Arabie Saoudite).

Les figures 3.8a à 3.8d représentent les approximations (au sens de l'analyse multirésolution) successives de la figure 3.7. Brièvement dit, ces approximations sont obtenues par l'application successive de filtres passe-bas. Ceci sera détaillé par la suite.

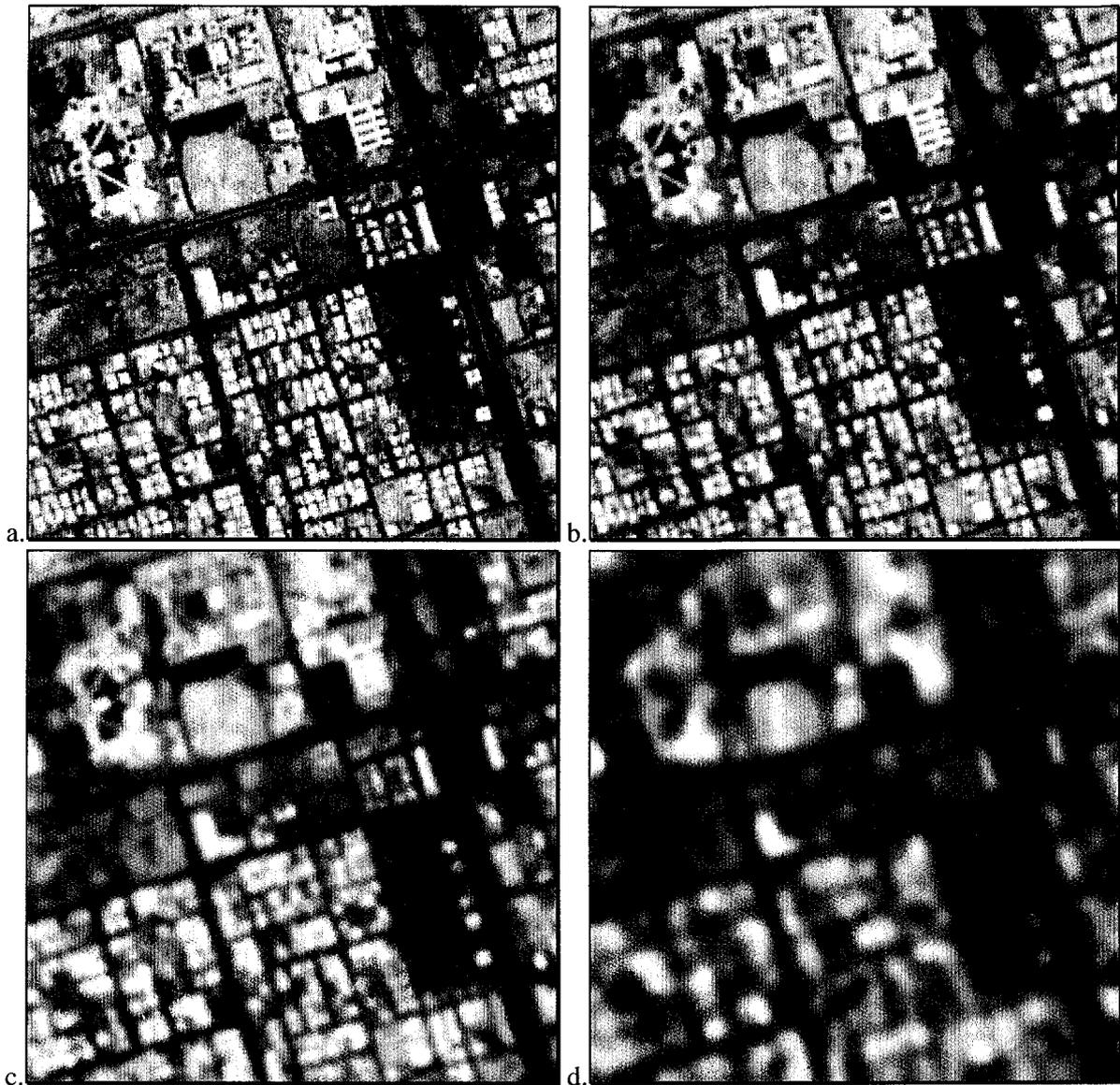


Figure 3.8. (a) 1^{ère} approximation (4 m de résolution spatiale) de la figure 3.6; (b) 2^{nde} (8 m de résolution spatiale), (c) 3^{ème} (16 m de résolution spatiale) et (d) 4^{ème} approximation (32 m de résolution spatiale).

La figure 3.8a montre la première approximation avec une résolution spatiale de 4 m. Sur cette image, les petites structures entre 2 et 4 m ont été filtrées. Les figures 3.8b à 3.8d représentent respectivement les approximations dont les structures ont des tailles supérieures ou égales à respectivement 8, 16 m et 32 m. Nous pouvons observer également le lissage progressif de l'image originale et la disparition des petites structures sur les approximations successives. Ainsi, les terre-pleins secondaires de la rue de classe 1 ne sont plus visibles sur la figure 3.8b. Sur la figure 3.8c, les terre-pleins centraux des rues de classe 2 et 3 ont complètement disparu et celui de la voie express est difficilement perceptible. De plus, les rues secondaires (classe 4) y sont plus difficiles à discerner que sur la figure 3.8b. Sur la figure 3.8d, les caractéristiques (*i.e.* les terre-pleins) des différentes rues ont complètement disparues.

Ainsi, la perceptibilité de chaque classe de rues évolue différemment lors de la diminution de la résolution spatiale des approximations.

Les images de coefficients d'ondelettes (figure 3.9) vont permettre d'observer l'information comprise entre deux images de résolutions spatiales successives. Cette observation nous donne une information sur l'évolution des différentes structures inhérentes

aux différentes classes de rues du réseau routier étudié. L'obtention de ces images de coefficients d'ondelettes sera détaillée ultérieurement.

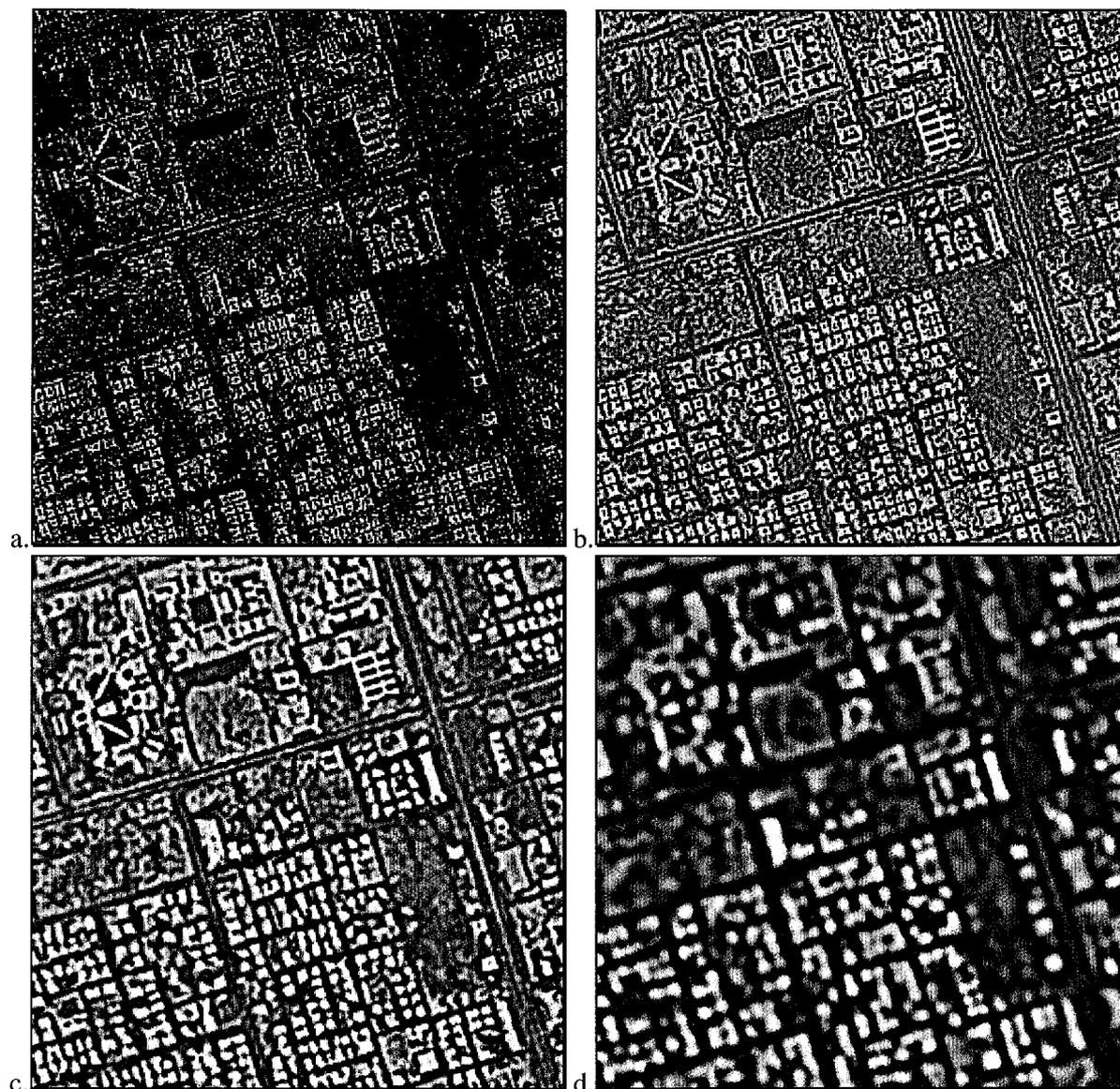


Figure 3.9. (a) 1^{ère} image de coefficients d'ondelettes de la figure 3.6; (b) 2^{nde}, (c) 3^{ème} et (d) 4^{ème} image de coefficients d'ondelettes.

La figure 3.9a présente toutes les structures avec des tailles comprises entre 2 et 4 m. Cette image est le résultat de la différence d'informations qui existe entre les figures 3.6 et 3.8a. Elle modélise les objets de l'image originale à ces résolutions spatiales et accentue le fait que même une grosse structure, telle que la rue de classe 1 par exemple, est composée de différents détails (terre-pleins central et secondaires) perceptibles à différentes échelles. Les figures 3.9b à 3.9d représentent toutes les structures avec des tailles comprises respectivement entre 4 et 8 m, 8 et 16 m, et 16 et 32 m. Sur la figure 3.9b, les terre-pleins centraux des rues de classe 1 à 3 sont bien dessinés ainsi que les terre-pleins secondaires de la rue de classe 1. Sur la figure 3.9c, seuls les terre-pleins centraux des rues de classe 1 et 2 restent visibles. Les rues de classe 4 sont également plus contrastées, et donc mieux discernables, sur la figure 3.9c que sur la figure 3.9b. La figure 3.9d présente, quant à elle, des rues de classe 2 sans terre-plein central visible. Seul le terre-plein central de la rue de classe 1 reste encore perceptible. Cette

figure montre également des objets urbains beaucoup plus flous que sur la figure 3.9c. Cependant, les rues de classe 3 et 4 y sont encore bien contrastées et donc bien visibles.

Ainsi, tous les objets présents dans l'image originale sont mis en évidence à une résolution spatiale donnée. Cette décomposition multirésolution permet de traiter séparément les différentes résolutions spatiales caractéristiques des structures (rues de différentes classes et différents terre-pleins) composant l'image originale.

Les profils transversaux locaux des rues de différentes classes constituant le réseau routier étudié vont permettre de mieux comprendre l'évolution de ces rues lorsque la résolution spatiale des images diminue. En effet, ces profils transversaux dépendent autant de la classe d'appartenance de la rue que de la résolution spatiale à laquelle ils sont observés, comme le montrent les diagrammes présentés sur les figures 3.10 et 3.11.

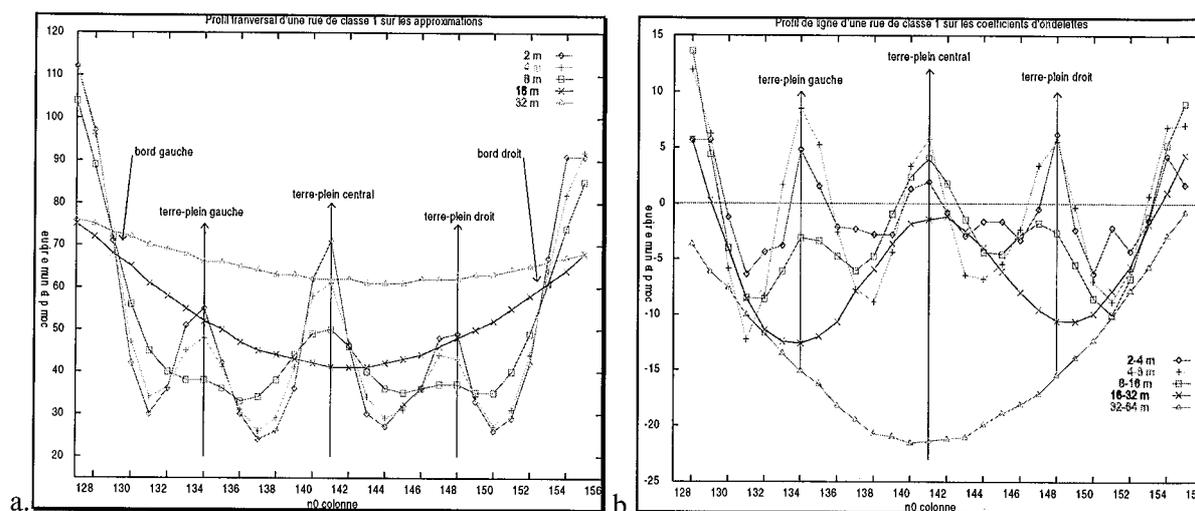


Figure 3.10. Exemple de profil transversal d'une voie express sur les approximations (a) et sur les images de coefficients d'ondelettes (b) à différentes résolutions spatiales.

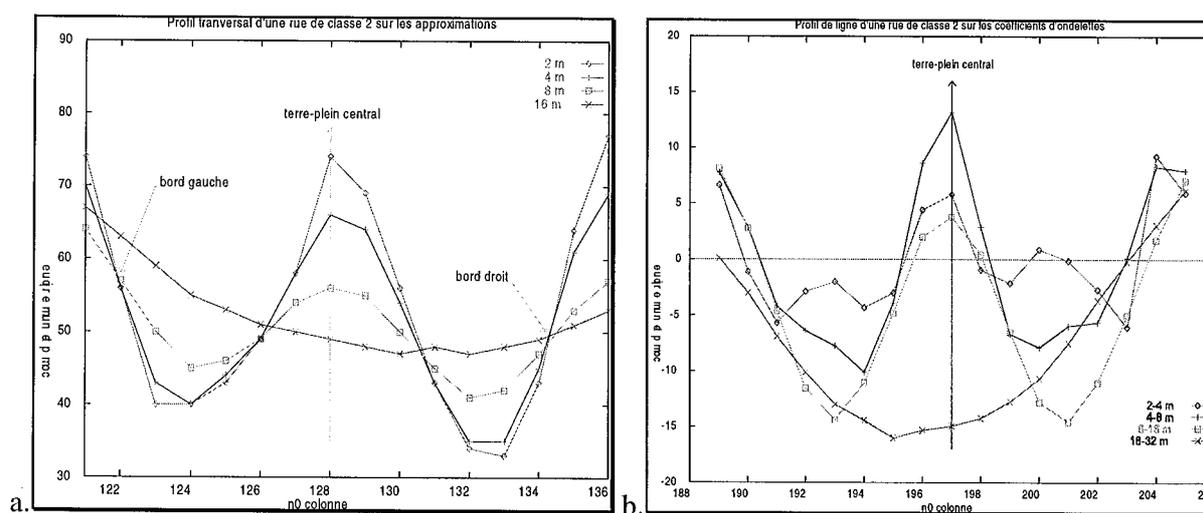


Figure 3.11. Exemple de profil transversal d'une artère sur les approximations (a) et sur les images de coefficients d'ondelettes (b) à différentes résolutions spatiales.

Les figures 3.10a et 3.11a montrent l'évolution du profil transversal, respectivement, d'une voie express et d'une artère sur les approximations successives de l'image originale et donc à des résolutions spatiales différentes. Sur la figure 3.10a, les terre-pleins secondaires disparaissent des approximations ayant une résolution spatiale supérieure ou égale à 8 m. Le terre-plein central n'est plus visible sur les approximations de résolution spatiale supérieure ou

égale à 32 m, que ce soit pour la voie express (figure 3.10a) ou l'artère (figure 3.11a). De plus, nous pouvons observer deux points remarquables sur ces deux graphiques. Ce sont les points d'intersection des profils transversaux obtenus à différentes résolutions spatiales. Ces points représentent la position des bords de la rue traitée.

Les figures 3.10b et 3.11b montrent, en parallèle, l'évolution du profil transversal, respectivement, de la voie express et de l'artère sur des images de coefficients d'ondelettes à des résolutions spatiales différentes. Ces profils permettent d'indiquer et de vérifier les positions des différentes caractéristiques (*i.e.* terre-plein central et terre-pleins secondaires) de la rue observée.

Sur la figure 3.10b, cinq profils transversaux issus des images de coefficients d'ondelettes ont été représentés. Sur le profil transversal extrait de l'image constituée de structures de tailles comprises entre 32 et 64 m, appelée **image Ic⁽⁴⁾**, seule la position de l'axe de la voie express considérée est marquée. Elle correspond au minimum du profil transversal inclus entre les deux bords de la rue. Sur l'**image Ic⁽³⁾**, où la taille des structures est comprise entre 16 et 32 m, cette position est caractérisée par un maximum local du profil transversal et les positions des terre-pleins secondaires apparaissent marquées par deux minima locaux. Ces minima deviennent sur l'**image Ic⁽²⁾** (tailles des structures la composant comprises entre 8 et 16 m) deux maxima locaux du profil transversal inclus entre un des bords de la rue considérée et son axe.

La figure 3.11b montre que, pour les artères, deux images de coefficients d'ondelettes sont suffisantes pour positionner l'axe, ou terre-plein central, de la rue considérée :

- l'**image Ic⁽³⁾**, pour estimer la position de l'axe qui y est marqué par un minimum local des profils transversaux.
- l'**image Ic⁽²⁾**, pour vérifier et ajuster la position trouvée précédemment par la recherche du maximum local des profils transversaux entre les deux bords de la rue considérée.

Pour chaque classe, les images de coefficients d'ondelettes de plus grandes échelles (structures avec des tailles comprises respectivement entre 2 et 4 m et entre 4 et 8 m) présentent des profils transversaux similaires à ceux observés sur l'image Ic⁽²⁾.

3.3. Les modèles

Nous allons employer deux modèles pour qualifier le réseau routier urbain :

- un modèle pour les rues, *i.e.* les voies de communication intra-urbaine,
- un autre pour le réseau, *i.e.* l'ensemble des rues reliées entre elles.

Ces modèles sont relatifs à nos données à 2 m de résolution spatiale. Cependant, ils pourront être adaptés à d'autres données, *i.e.* à des images de différentes résolutions spatiales et spectrales où des rues avec des caractéristiques similaires seront observées.

Ces modèles permettent de bien définir la problématique et donc, de choisir ou d'établir les traitements d'extraction adéquats au type de réseau routier choisi, *i.e.* au type de villes choisies, et au type de données disponibles.

L'analyse des données a montré que les rues sont caractérisées par une géométrie, une radiométrie et une typologie homogènes selon leur classe d'appartenance. Aussi, le **modèle de "rue"** proposé est construit selon les propriétés suivantes :

- géométrie : les rues sont des éléments linéaires quasiment rectilignes et de largeur connue. Cette largeur peut légèrement varier pour une même rue. La rue est donc une approximation de rectangle.
- radiométrie : les rues ont une radiométrie relativement homogène le long de leur axe et contrastée (faiblement ou fortement) dans la direction transversale à cet axe (figure 3.12).

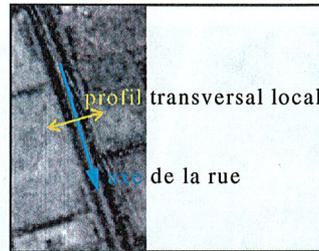


Figure 3.12. Rue avec terre-plein central (artère) extraite de l'image de Jeddà à 2 m de résolution spatiale.

- typologie : le profil radiométrique transversal local des rues dépend de la classe à laquelle elles appartiennent (figures 3.5 et 3.6) ainsi que de la résolution spatiale de l'image traitée (figures 3.10 et 3.11). Nous distinguons donc 4 classes de rues définies par les profils transversaux suivants :

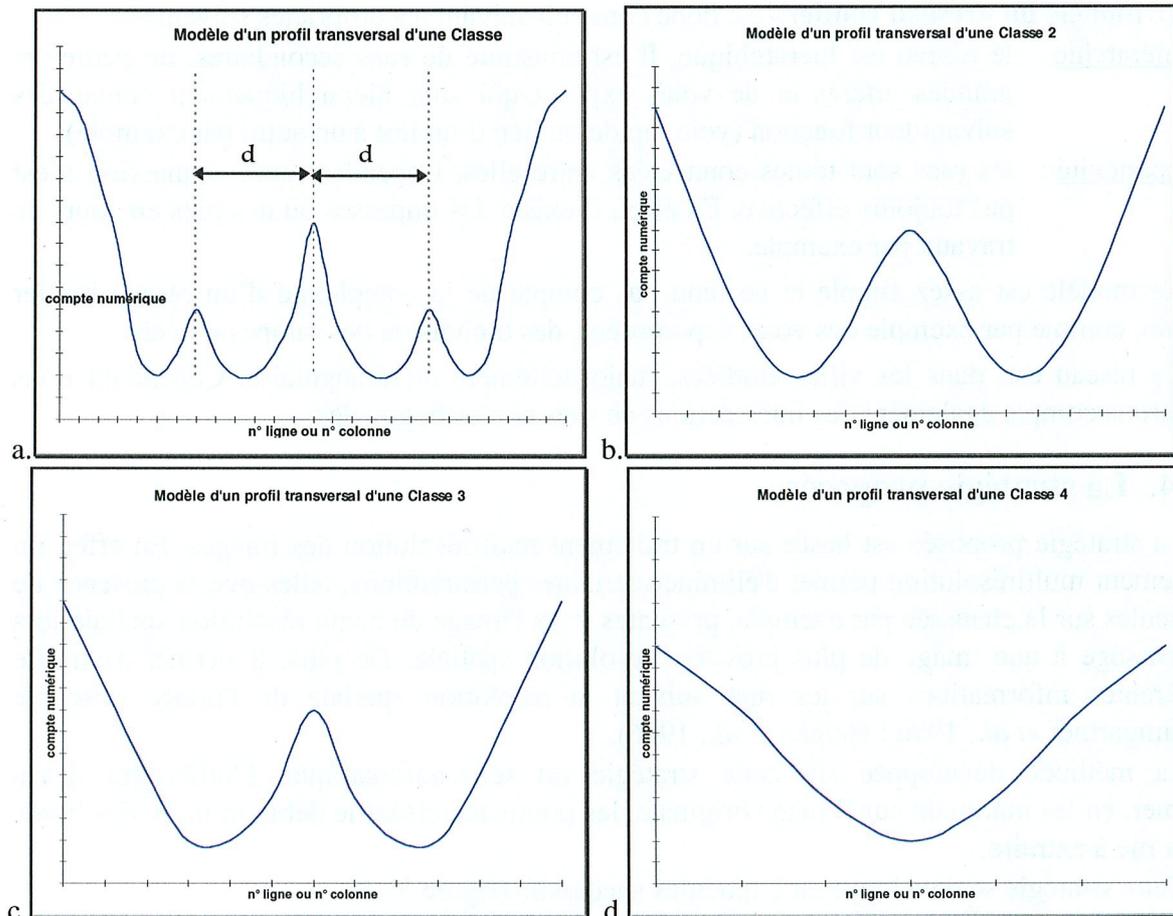


Figure 3.13. Modèle de «rue» : classe 1 (a), classe 2 (b), classe 3 (c) et classe 4 (d).

→ Les classes 2 et 3 ont des ^{ou typologie} topologies similaires. La distinction entre ces deux classes de rues est obtenue par leur largeur.

Le modèle de "rues", que nous venons de définir, ne tient pas compte de la résolution spatiale des images originales. Il ne tient pas compte, non plus, des rues "linéaires", *i.e.* de largeur inférieure ou égale à 2 pixels.

Le **modèle du "réseau routier"** est basé sur la structure régulière du réseau quadrangulaire : les rues se croisent presque toutes à angle droit et à intervalles plus ou moins réguliers (figure 3.14).



Figure 3.14. Réseau quadrangulaire manuellement extrait de l'image de Jeddah à 2 m de résolution spatiale.

Le **modèle du «réseau routier»** est donc construit suivant les propriétés suivantes :

- **hiérarchie** : le réseau est hiérarchique. Il est constitué de rues secondaires, de petites et grandes artères et de voies express qui sont hiérarchiquement connectées suivant leur fonction (voie rapide ou lien d'un îlot à un autre par exemple).
- **connexité** : les rues sont toutes connectées entre elles. Cependant cette connexion n'est pas toujours effective. En effet, il existe des impasses ou des rues en cours de travaux par exemple.

Ce modèle est assez simple et ne rend pas compte de la complexité d'un réseau routier urbain, comme par exemple des voies superposées, des tunnels ou des rampes d'accès.

Ce réseau est, dans les villes étudiées, majoritairement quadrangulaire. Cependant nous tiendrons compte également des intersections de rues non orthogonales.

3.4. La stratégie proposée

La stratégie proposée est basée sur un traitement multirésolution des images. En effet, un traitement multirésolution permet d'éliminer certaines perturbations, telles que la présence de véhicules sur la chaussée par exemple, présentes dans l'image de haute résolution spatiale lors du passage à une image de plus grossière résolution spatiale. De plus, il permet d'extraire différentes informations sur les rues suivant la résolution spatiale de l'image observée (Baumgartner *et al.*, 1996 ; Heipke *et al.*, 1996).

La méthode développée sur cette stratégie est semi-automatique. L'utilisateur devra estimer, en les marquant sur l'image originale, les points localisant le début et la fin des bords de la rue à extraire.

Cette stratégie se développe en 2 modules successifs (figure 3.15) :

1. extraction des différentes classes de rues présentes dans les images.
2. extraction du réseau routier urbain.

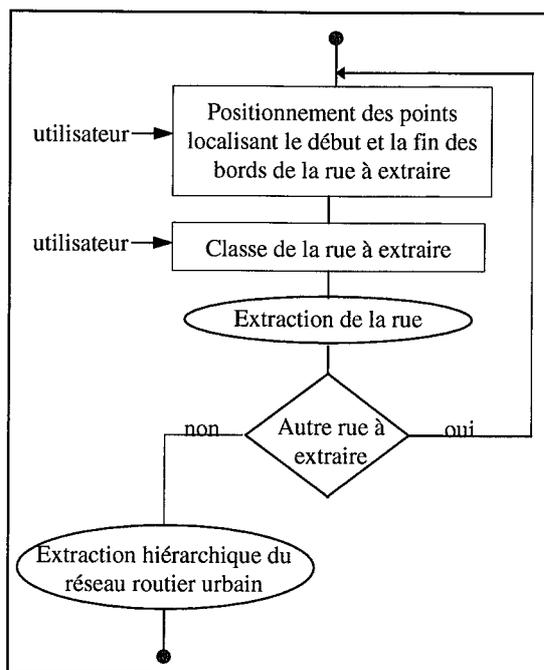


Figure 3.15. Schéma de principe pour extraire les différentes classes de rues

Le module suivant serait le traitement des connexions avec ses cas particuliers : ponts, tunnels, carrefours (giratoires, ...), rampes d'accès, ...

Afin de diminuer le temps-calcul et la mémoire RAM nécessaire, les traitements sont effectués par itération sur les lignes de l'image. Cette approche est optimale si la rue est orientée suivant les colonnes à $\pm 45^\circ$. Pour effectuer le traitement des autres rues, une rotation de 90° est effectuée sur l'image.

3.5. Les outils mathématiques utilisés

Le traitement multirésolution utilisé est basé sur les deux outils mathématiques que sont l'analyse multirésolution et la transformée en ondelettes.

3.5.1. La transformée en ondelettes

Afin de faciliter la compréhension, la transformée en ondelettes sera présentée dans sa version continue et dans le cas unidimensionnelle. La principale propriété de la transformée en ondelettes est d'adapter la fenêtre d'analyse au phénomène étudié, ce qui permet de fournir une information locale. La transformée en ondelettes permet, dans le cas des images, une représentation espace-échelle de celles-ci.

Comme la transformée de Fourier, la transformée en ondelettes permet de décomposer une fonction d'énergie finie sur une base de fonctions élémentaires : les *ondelettes*. Cette base ou famille est générée par translations et dilatations d'une unique fonction ψ appelée *ondelette-mère*, ce qui s'écrit dans le cas unidimensionnel :

$$\psi_{a,b} = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (3.1)$$

où a et $b \in \mathfrak{R}$, $a \neq 0$. Le paramètre a est appelé "pas de dilatation" et b "pas de translation".

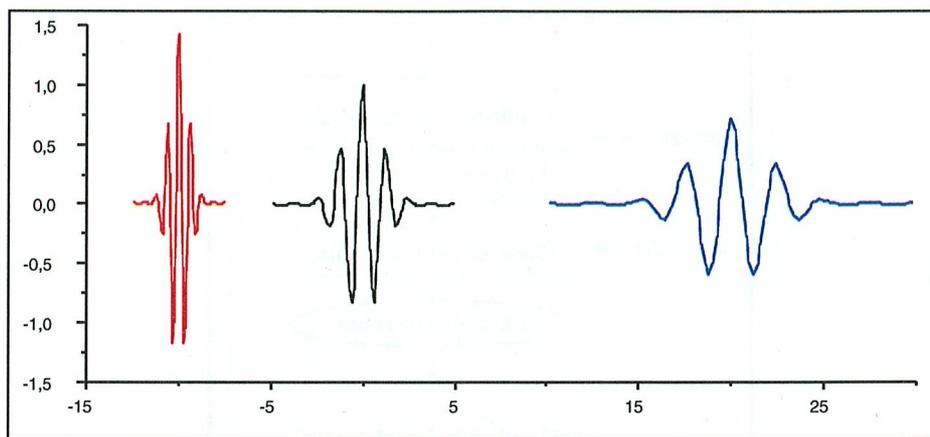


Figure 3.16. Génération d'ondelettes par dilatations et translations. L'ondelette mère utilisée dans cet exemple est celle de Grossmann et Morlet (1984). Son équation est $y(x) = \cos(5x) \exp(-x^2/2)$. De gauche à droite, une ondelette contractée ($a = 0,5$; $b = -10$), l'ondelette mère ($a = 1$; $b = 10$) et une ondelette dilatée ($a = 2$; $b = 20$).

Il existe différentes familles ou bases d'ondelettes. La figure 3.16 présente un exemple de génération d'une base d'ondelettes. Les ondelettes sont toutes des fonctions oscillantes bien définies à la fois en temps et en fréquence. Elles possèdent trois propriétés fondamentales communes : la localisation, l'oscillation et la régularité, et toutes satisfont à une condition d'admissibilité.

Cependant, suivant l'ondelette-mère utilisée, ces familles d'ondelettes conduisent à des décompositions différentes et à des propriétés différentes. Meyer (1990, 1992) et Daubechies (1992) donnent de plus amples informations sur les propriétés des ondelettes. Dans le cas unidimensionnel, la transformée en ondelettes d'une fonction $f(x) \in L^2(\mathfrak{R})$ s'écrit, sous sa forme continue :

$$WT f(a, b) = \langle f, \psi_{a, b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx \quad (3.2)$$

où $\psi_{a, b}$ est défini comme dans l'équation 3.1 et $\overline{\psi}$ est le complexe conjugué de ψ . WT_f représente l'information contenue par $f(x)$ pour l'échelle a et à la position b . Elle fournit donc la décomposition locale de l'information d'une fonction de carré intégrable.

Pour a et b fixés, $WT_f(a, b)$ est appelé coefficient d'ondelettes. Inversement, on peut reconstruire exactement $f(x)$ en intégrant sur toutes les échelles et à toutes les positions les coefficients d'ondelettes de la manière suivante :

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} WT f(a, b) \psi_{a, b}(x) \frac{dad b}{a^2} \quad (3.3)$$

où C_ψ est la condition d'admissibilité de l'ondelette-mère.

L'équation 3.3 peut être interprétée de deux manières différentes :

- $f(x)$ peut être reconstruite exactement quand on connaît sa transformée en ondelettes,
- $f(x)$ est une superposition d'ondelettes.

Ces deux points de vue conduisent à des applications différentes qui sont, d'une part le traitement et, d'autre part l'analyse des signaux.

Des versions discrètes de la transformée en ondelettes, comme par exemple la transformée en ondelettes dyadique, existent. La transformée en ondelettes discrète est appliquée aux signaux par le biais de filtres.

3.5.2. L'analyse multirésolution

Le concept d'analyse multirésolution tel que l'a introduit Mallat (1989) est issu des algorithmes pyramidaux (Burt and Adelson, 1983). Dans cette approche, la taille du pixel est définie comme la résolution de référence qui permet de mesurer les variations locales de l'image. Précisons que la résolution définie ici est l'inverse de l'échelle définie pour la cartographie. Ainsi, quand la résolution augmente, la taille (ou longueur caractéristique ou encore échelle caractéristique) du plus petit objet visible diminue. Pour décrire les algorithmes pyramidaux, Meyer (1992, page 62) utilise l'exemple de la cartographie :

"Nous voyons, sur cet exemple, apparaître l'idée fondamentale d'une représentation de l'image par un arbre. Dans le cas de la cartographie, le tronc serait la mappemonde et en cheminant vers les branches, les ramures, les feuilles, on accéderait à des cartes couvrant des régions de plus en plus petites et fournissant des détails de plus en plus fins, détails qui ne figureraient pas au niveau inférieur.

Pour interpréter cette représentation de la cartographie à l'aide d'un algorithme pyramidal, il conviendra de renverser les rôles du bas et du haut..."

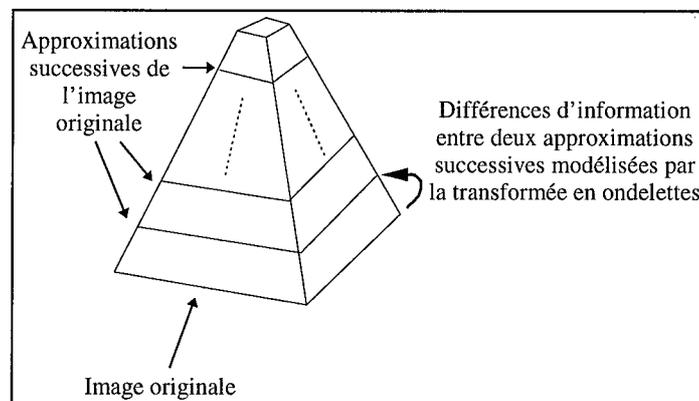


Figure 3.17. Représentation des approximations successives d'une même image à l'aide d'un algorithme pyramidal.

La figure 3.17 est une représentation pratique de l'analyse multirésolution et, plus généralement, des algorithmes pyramidaux. L'analyse multirésolution permet de construire des approximations successives et de plus en plus grossières de l'image originale. La base de la pyramide correspond à l'image originale. Quand on "monte" dans la pyramide, les différents étages représentent les approximations successives de l'image originale. La limite théorique de ces approximations est le sommet de la pyramide qui correspond à un pixel unique.

Les principes mathématiques de l'analyse multirésolution sont décrits dans Mallat (1989).

Brièvement dit, une analyse multirésolution est une suite de sous-espaces vectoriels de $L^2(\mathbf{R}^n)$, où n est la dimension de l'espace (2 dans le cas d'une image), V_j , $j \in \mathbf{Z}$. Pour l'ensemble des définitions, nous nous plaçons dans le cas mono-dimensionnel pour des raisons de simplicité. Cet espace a les propriétés suivantes :

- $V_j \subset V_{j+1}$
- $\bigcap_j V_j = \{0\}$
- $\bigcup_j V_j$ est dense dans $L^2(\mathbf{R}^n)$ ou $\overline{\bigcup_j V_j} = L^2(\mathbf{R}^n)$
- $\forall f(x) \in L^2(\mathbf{R}^n)$, $\forall j \in \mathbf{Z}$, on a : $f(x) \in V_0 \Leftrightarrow f(2^j x) \in V_j$
- Il existe une fonction ϕ telle que la famille $\{\phi(x-k), k \in \mathbf{Z}\}$ forme une base orthonormée de V_0 . La fonction ϕ est appelée *fonction d'échelle* ou père des ondelettes.

Les fonctions f et ϕ que nous allons décrire sont le plus souvent réelles. Ainsi, on définit les bases de fonctions d'échelle de manière similaire aux bases d'ondelettes :

$$\phi_{j,k}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (3.4)$$

où a et $b \in \mathbf{R}$, $a \neq 0$. De la définition de l'analyse multirésolution, on déduit facilement que cette famille de fonctions est une base orthonormée de V_j . Ces fonctions permettent de définir les approximations successives de la fonction $f(x)$ comme :

$$d_{j,k}(f(x)) = \langle f, \phi_{j,k} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \phi_{j,k}(x) dx \quad (3.5)$$

L'approximation $d_{j,k}(f(x))$ est la projection orthogonale de $f(x)$ dans V_j . Pour j égal à 0, l'approximation du signal $f(x)$ sera égal à la fonction échantillonnée $f(x)$ originale.

3.5.3. L'analyse multirésolution et la transformée en ondelettes

L'association de l'analyse multirésolution et de la transformée en ondelettes permet une analyse complète et un traitement efficace des images satellitaires. En effet, la différence d'informations qui existe entre deux approximations successives d'une même image construites par l'analyse multirésolution est décrite dans les coefficients d'ondelettes (figure 3.16). Cette différence sera décrite par les coefficients d'ondelettes $c_{j,k}(f(x))$:

$$c_{j,k}(f(x)) = \langle f, \psi_{j,k} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{j,k}(x) dx \quad (3.6)$$

où la base des $\psi_{j,k}$ forme une base orthonormée. A partir d'une approximation $d_{j,k}(f(x))$ et des coefficients d'ondelettes $c_{j,k}(f(x))$, on pourra reconstruire $d_{j-1,k}(f(x))$ selon :

$$d_{j-1,k}(f(x)) = d_{j,k}(f(x)) + \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_{j,k}(f(x)) \psi_{j,k} \quad (3.7)$$

Ainsi, l'analyse multirésolution à l'aide de la transformée en ondelettes permet de reconstruire de manière exacte (sans perte d'informations) le signal échantillonné original.

Nous avons choisi de travailler avec des ondelettes dyadiques ($a=2^j$ et $b=k2^j$, $k, j \in \mathbf{Z}$).

D'un point de vue pratique, l'application de l'analyse multirésolution est réalisée par le biais de filtres passe-bas et la différence d'informations existant entre deux approximations successives par un filtre passe-haut. Pour plus de détails, on peut se référer à l'ouvrage très complet de Daubechies (1992).

3.5.4. L'algorithme à trous

L'algorithme «à trous» (Dutilleux, 1987) est basé sur les deux outils mathématiques que sont l'analyse multirésolution et la transformée en ondelettes. Mais, dans l'algorithme "à trous", seule la fonction d'échelle est utilisée.

L'approximation de l'image originale est obtenue par filtrage et l'image des coefficients d'ondelettes par soustraction de l'approximation à l'image originale pixel par pixel. Cet algorithme produit, à chaque itération, une approximation et une image non-directionnelle de coefficients d'ondelettes (figure 3.18). Le filtre utilisé est symétrique et ses coefficients sont :

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} \end{pmatrix}$$

Pour produire une dilatation de la fonction d'échelle, un zéro est ajouté entre chaque coefficient du filtre. Ainsi, il n'y a aucun sous-échantillonnage de l'image originale. La reconstruction s'effectue suivant l'équation :

$$f(x) = f_J(x) + \sum_{j=1}^J C_j(x) \quad (3.8)$$

où $f_j(x)$ est la dernière approximation calculée par l'algorithme et $C_j(x)$ les coefficients d'ondelettes de $f(x)$.

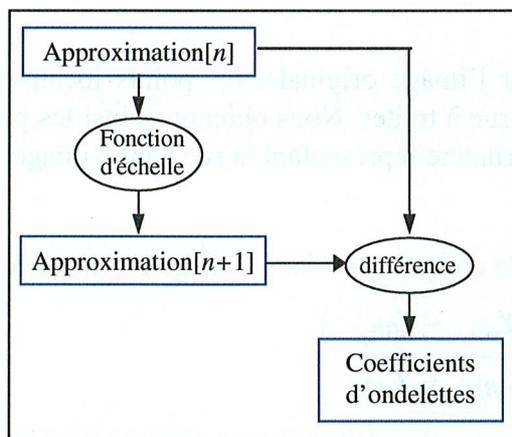


Figure 3.18. Schéma de principe de l'algorithme «à trous» - Pour $n = 0$, nous avons l'image originale. Il y a itération sur n .

L'application de l'algorithme "à trous" à l'image originale ne produit donc, à chaque itération, que deux images. Cette caractéristique explique le choix de cet algorithme plutôt qu'un autre algorithm combinant l'analyse multirésolution et la transformée en ondelettes comme l'algorithme de Mallat (1989) par exemple. Pour la plupart, les autres algorithmes du même type produisent à chaque itération plus de 2 images. Il est plus facile de manipuler deux images pour les traitements multirésolutions développés pour extraire les rues que plusieurs images.

De plus, comme il n'y a aucun sous-échantillonnage de l'image originale, toutes les images conservent la même taille. Cette caractéristique de l'algorithme "à trous" facilite l'analyse de la représentation multirésolution des images.

Un exemple d'application de l'algorithme "à trous" (4 itérations) est présenté sur les images des figures 3.8 et 3.9.

3.6. Extraction des rues

Le module d'extraction des différentes classes de rues constituant le réseau routier étudié se déroule en deux phases :

1. extraction des bords de rues pour chaque classe existante. Cette extraction permet d'obtenir l'emprise des rues sur les images,
2. extraction des caractéristiques, *i.e.* des terre-pleins centraux et secondaires, des rues selon leur classe d'appartenance.

3.6.1. Mise en évidence de l'emprise des rues : extraction des bords

Un traitement multirésolution est développé pour extraire les bords des rues à partir de l'image originale à 2 m de résolution spatiale et de ses deux premières approximations à 4 et 8 m de résolution spatiale. Ce traitement consiste à rechercher les points d'intersection des profils transversaux de la rue obtenus à 2, 4 et 8 m de résolution spatiale (figures 3.10a et 3.11a). Il est semi-automatique et itératif. La figure 3.19a présente son schéma de principe et les différentes étapes de ce traitement.

Etape 1

L'utilisateur marque, sur l'image originale, les points localisant le début et la fin des bords (figure 3.19b) de la rue à traiter. Nous obtenons ainsi les points (BG_d , BD_d) et (BG_f , BD_f) caractérisant le quadrilatère représentant la rue dans l'image.

Etape 2

L'orientation, θ_G et θ_D , de chaque bord dans l'image est mesurée par :

$$\theta_b = \arctan \left(\frac{Y_{Bb_f} - Y_{Bb_d}}{X_{Bb_f} - X_{Bb_d}} \right) \quad (3.9)$$

où $b = G$ (gauche) ou D (droit) et (X, Y) définit les coordonnées-image du point.

Puis, les positions marquant le début I_0 et la fin I_f de la rue à extraire sont estimées. Ces positions sont obtenues en prenant la ligne, X_{BG} ou X_{BD} , pour laquelle les deux bords sont estimés et calculés, *i.e.* $I_0 = I_{02}$ et $I_f = I_{f2}$.

Etape 3

Nous définissons deux fenêtres de recherche (1 ligne x 5 colonnes) si la rue à traiter est principalement orientée le long des colonnes ($-45^\circ < \theta < 45^\circ$). Chaque fenêtre est centrée sur la position estimée du bord à extraire.

Pour la première itération, les positions estimées des bords sont données par celles de BG_d et BD_d .

Etape 4

Nous recherchons maintenant les positions des points intermédiaires BG_i et BD_i caractérisant les bords dans l'image. Ces positions sont obtenues en calculant les points d'intersection des profils transversaux i . Ces profils sont obtenus sur l'image originale $I^{(0)}$ et ses deux approximations suivantes $I^{(1)}$ et $I^{(2)}$. Cette étape se décompose en 4 points :

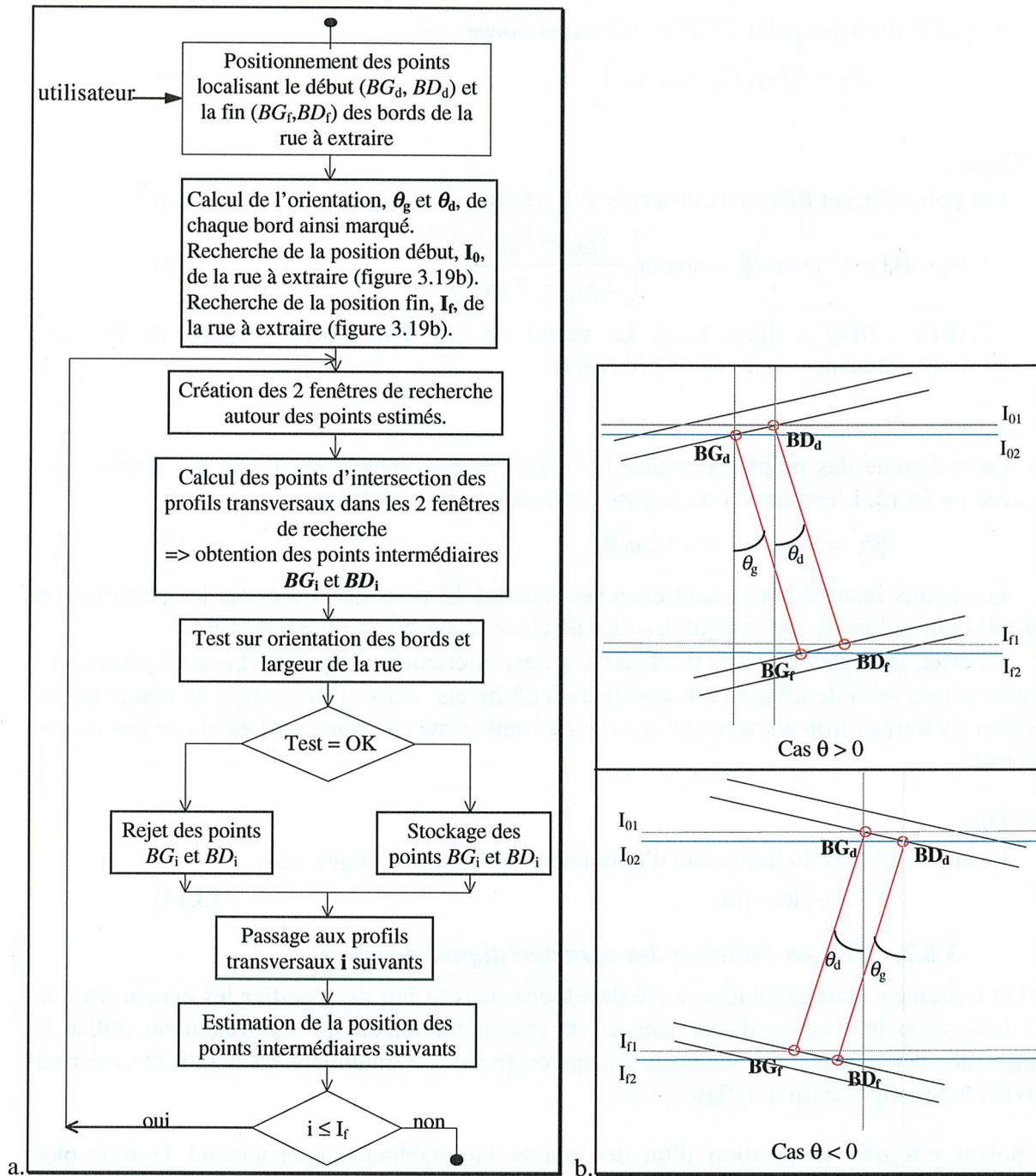


Figure 3.19. Schéma de principe pour extraire les bords des rues (a) - Points à placer (en gras) par l'utilisateur pour extraire les bords (en rouge) de la rue à traiter (b).

1. recherche des positions des extrema (Min_i et Max_i) du profil transversal i sur $I^{(0)}$ dans les 2 fenêtres de recherche ;
2. calcul des droites de régression, $dr_b^{(0)}$, $dr_b^{(1)}$ et $dr_b^{(2)}$, s'ajustant aux points de ces profils transversaux i , points compris entre Min_i et Max_i ;
3. calcul des points d'intersection, s'ils existent, de ces trois droites de régression afin d'obtenir BG_i et BD_i .

$$\begin{cases} Y_{Bb}^1 = dr_b^{(0)}(x) \cap dr_b^{(1)}(x) \\ Y_{Bb}^2 = dr_b^{(0)}(x) \cap dr_b^{(2)}(x) \text{ avec } x \in [Min_i, Max_i] \\ Y_{Bb}^3 = dr_b^{(1)}(x) \cap dr_b^{(2)}(x) \end{cases} \quad (3.10)$$

4. La position des points intermédiaires est donnée par :

$$Bb_i = Moy(Y_{bb}^1, Y_{Bb}^2, Y_{Bb}^3) \quad (3.11)$$

Etape 5

Les points BG_i et BD_i sont conservés s'ils vérifient les deux conditions suivantes :

$$1. |\theta_b^i - \theta_b| < 1^\circ \text{ avec } \theta_b^i = \arctan\left(\frac{Y_{Bb_i} - Y_{Bb_d}}{X_{Bb_i} - X_{Bb_d}}\right), \quad (3.12)$$

2. $(BD_i - BG_i) \in [l_{inf}; l_{sup}]$. La valeur de ces deux bornes dépend de la classe d'appartenance de la rue traitée (§3.3).

Etape 6

La recherche des points intermédiaires suivants est obtenue en itérant les étapes 3 à 5 avec $i = i + 15$. L'estimation de la position de ces points est donnée par :

$$Bb_i^* = Bb_{i-1} + 15 * i * \tan(\theta_b) \quad (3.13)$$

Les points intermédiaires sont cherchés tous les 15 pixels afin d'éviter les perturbations algorithmiques lors du croisement des rues de classe 2 à 4 avec la rue à extraire.

En effet, la largeur des rues de classe 2 à 4 est inférieure à 15 pixels ($l_{cl2} \cong 12$ pixels) et la largeur d'une parcelle urbaine est supérieure à 25 pixels. Ainsi, l'itération à 15 pixels permet d'éviter de tomber trop souvent sur une rue croisant la rue à extraire et donc de ne pas trouver de bords.

Etape 7

Le critère d'arrêt du traitement d'extraction des bords est donné par :

$$\text{si } i > I_f \text{ alors fin.} \quad (3.14)$$

3.6.2. Mise en évidence des caractéristiques des rues

Un traitement multirésolution a été développé dans le but de spécifier les caractéristiques des rues selon leur classe d'appartenance au réseau routier étudié. Ce traitement utilise les images de coefficients d'ondelettes de l'image originale. Ce traitement est itératif et se déroule suivant le principe décrit à la figure 3.20.

Soient pos_axe_i la position d'un des points intermédiaires caractérisant le terre-plein central des rues de classe 1 à 3.

pos_tpb_i , la position d'un des points intermédiaires caractérisant les terre-pleins secondaires ($b = G$ ou D) des rues de classe 1.

$pos_central_i$, la position estimée du point intermédiaire i caractérisant l'axe des rues. Cette position est donnée par :

$$pos_central_i = BG_i + \frac{BD_i - BG_i}{2} \quad (3.15)$$

$pos_tpb_i^*$, les positions estimées du point intermédiaire i caractérisant les terre-pleins secondaires ($b = G$ ou $b = D$) Ces positions sont estimées, selon le modèle représenté sur la figure 3.12a, par :

$$\begin{aligned} pos_tpG_i^* &= pos_central_i - d \\ pos_tpD_i^* &= pos_central_i + d \end{aligned} \quad (3.16)$$

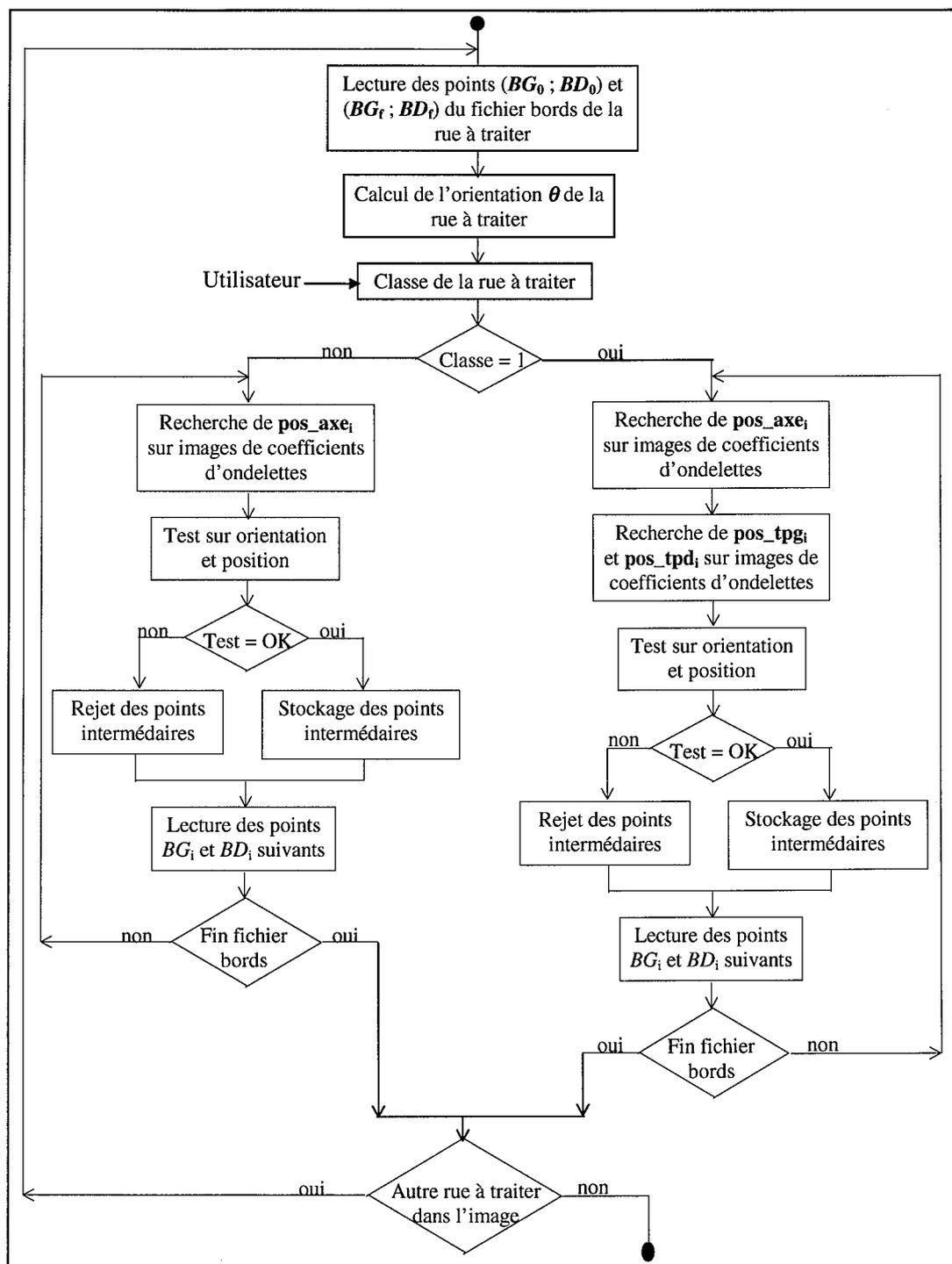


Figure 3.20. Schéma de principe d'extraction des caractéristiques des rues de classe 1 à 3.

Pour les rues de classe 1, trois images de coefficients d'ondelettes sont nécessaires pour spécifier leurs caractéristiques.

La position intermédiaire du terre-plein central, pos_axe_i , de la rue observée est recherchée dans un premier temps selon :

$$pos_axe_i^1 = \min_{x \in [BG_i; BD_i]} f^{(4)}(x) \quad (3.17)$$

où $f^{(4)}(x)$ représente le profil transversal i de la rue observé sur l'image $Ic^{(4)}$ entre BG_i et BD_i de la rue. L'image $Ic^{(3)}$ est ensuite utilisée pour vérifier et préciser la position mesurée précédemment en cherchant :

$$pos_axe_i^2 = \max_{x \in [BG_i; BD_i]} f^{(3)}(x) \quad (3.18)$$

où $f^{(3)}(x)$ représente le profil transversal i de la rue observée sur l'image $Ic^{(3)}$. Cette position est alors comparée avec $pos_axe_i^1$. La position conservée est celle qui se rapproche le plus de $pos_central_i$ et dont l'orientation est à moins de 1° de l'orientation estimée de la rue.

Dans un deuxième temps, les positions des deux terre-pleins secondaires, pos_tpb_i , sont recherchées par :

$$\begin{aligned} pos_tpG_i^1 &= \min_{x \in [BG_i; pos_axe_i]} f^{(3)}(x) \\ pos_tpD_i^1 &= \min_{x \in [pos_axe_i; BD_i]} f^{(3)}(x) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Afin de vérifier et d'ajuster les positions trouvées, les équations 3.21 sont appliquées à l'image $Ic^{(2)}$.

$$\begin{aligned} pos_tpG_i^2 &= \max_{x \in [BG_i; pos_axe_i]} f^{(2)}(x) \\ pos_tpD_i^2 &= \max_{x \in [pos_axe_i; BD_i]} f^{(2)}(x) \end{aligned} \quad (3.20)$$

où $f^{(2)}(x)$ représente le profil transversal i de la rue observée sur l'image $Ic^{(2)}$. Ces positions sont comparées avec $pos_tpb_i^1$. Les positions qui se rapprochent le plus de $pos_tpb_i^*$ et dont l'orientation est à moins de 1° de l'orientation estimée de la rue sont conservées.

L'extraction des caractéristiques des rues de classe 2 et 3 s'effectue en appliquant les équations 3.17 et 3.18, mais où $f^{(4)}(x)$ est remplacé par $f^{(3)}(x)$ et $f^{(3)}(x)$ est remplacé par $f^{(2)}(x)$.

La recherche des positions des points intermédiaires positionnant les caractéristiques des rues de classe 1 à 3 s'effectue de manière itérative en rappelant les points intermédiaires BG_i et BD_i positionnant les bords de ces rues extraits à la phase précédente.

3.6.3. Un exemple d'application

La méthode d'extraction des bords et des caractéristiques des différentes classes de rues a été appliquée à différents types d'images. Le chapitre 5 illustrera ces différentes applications.

Ce paragraphe permet de montrer la manière dont les différents points extraits sont reliés entre eux sur l'image originale. Pour ce faire, nous avons appliqué notre méthode d'extraction des rues à l'image (512x512 pixels) montrant une partie du réseau routier urbain de la ville de Jeddah (Arabie Saoudite) à 2 m de résolution spatiale (figure 3.7).

Dans un premier temps, les bords et les caractéristiques extraits sont tracés en reliant les points intermédiaires extraits entre eux (figure 3.21a).

La figure 3.21a montre que les axes extraits (en vert) et les terre-pleins secondaires extraits (en jaune) suivent bien les terre-pleins correspondants perçus sur l'image originale. Il en va de même pour les bords extraits (en rouge).

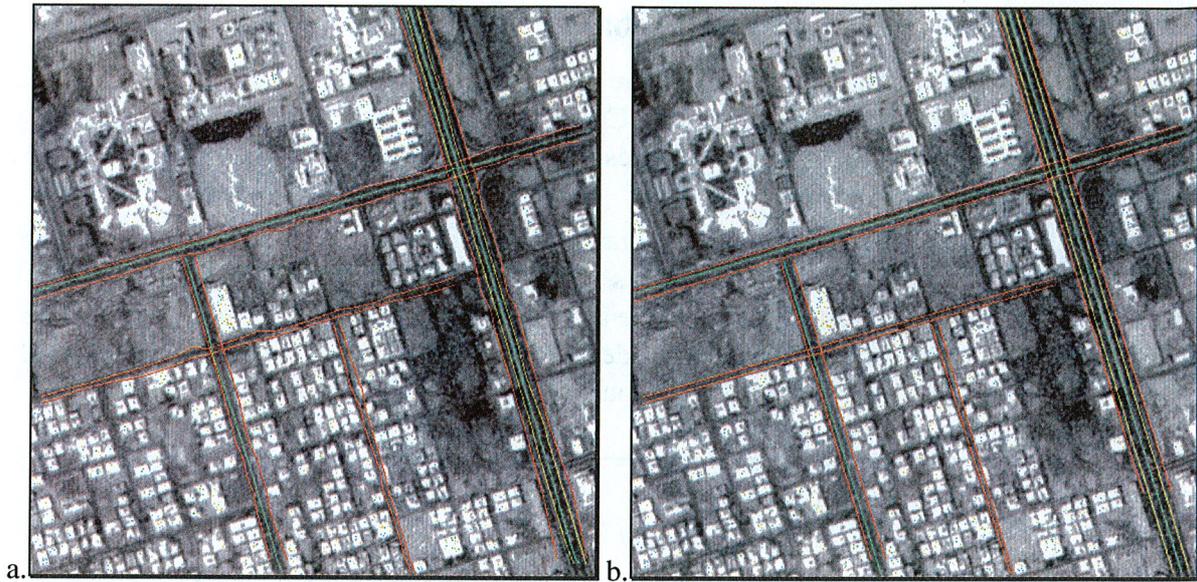


Figure 3.21. Application de la méthode d'extraction des rues de classe 1, 2, 3 et 4 sur l'extrait de la figure 3.7. Points reliés entre eux (a) et Droites de régression (b).

Cependant, ces lignes extraites apparaissent sinueuses et les petits artefacts dus aux traitements numériques sont bien perceptibles. Ceci est surtout vrai pour les bords extraits des rues. Or, le modèle nous dit que les rues sont quasiment rectilignes (§3.3). Aussi, dans un deuxième temps, ces lignes ont été assimilées à des droites d'équation : $y = ax + b$ (figure 3.21b).

Ces droites ont été ajustées aux points intermédiaires extraits positionnant les bords et les caractéristiques des rues. Ces droites sont estimées par les moindres carrés suivant les équations 3.21. Ces droites de régression donnent de meilleurs résultats que les droites estimées par axe d'inertie.

$$\begin{cases} a = \frac{S * S_{xx} - S_x * S_y}{S * S_{xx} - S_x^2} \\ b = \frac{S_{xx} * S_y - S_x * S_{xy}}{S * S_{xx} - S_x^2} \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\text{avec } \begin{cases} S = \sum_i i = \text{nombre de points intermédiaires} \\ S_x = \sum_i (I_0 + 15 * i) \\ S_y_b = \sum_i Bb_i, \text{ pour le bord gauche } (b=G) \text{ et droit } (b=D) \\ \text{et } S_y_a = \sum_i pos_axe_i \text{ et } S_y_{tpb} = \sum_i pos_tpb_i, b = g \text{ ou } d \\ S_{xx} = \sum_i (I_0 + 15 * i)^2 \\ S_{xy_b} = \sum_i Bb_i * (I_0 + 15 * i) \\ \text{et } S_{xy_a} = \sum_i pos_axe_i * (I_0 + 15 * i) \text{ et } S_{xy_{tpb}} = \sum_i pos_tpb_i * (I_0 + 15 * i), b = g \text{ ou } d \end{cases}$$

3.7. Extraction du réseau routier urbain

Une méthode semi-automatique a été élaborée pour extraire les différentes classes de rues présentes dans le réseau routier urbain étudié. Ces différentes rues extraites sont reliées entre elles de manière hiérarchique pour former le réseau routier extrait des images satellitaires de haute résolution spatiale.

Le réseau routier est représenté par un graphe simple connexe où les carrefours sont représentés par les noeuds du graphe et les rues par les arêtes du graphe (Kunzmann, 1972). Une valeur réelle positive est attribuée à chaque arête pour représenter sa longueur. Ce type de représentation est utilisé lors de l'évaluation de la méthode. La figure suivante illustre une représentation d'une partie du réseau routier urbain de la figure 3.7 par un graphe connexe.

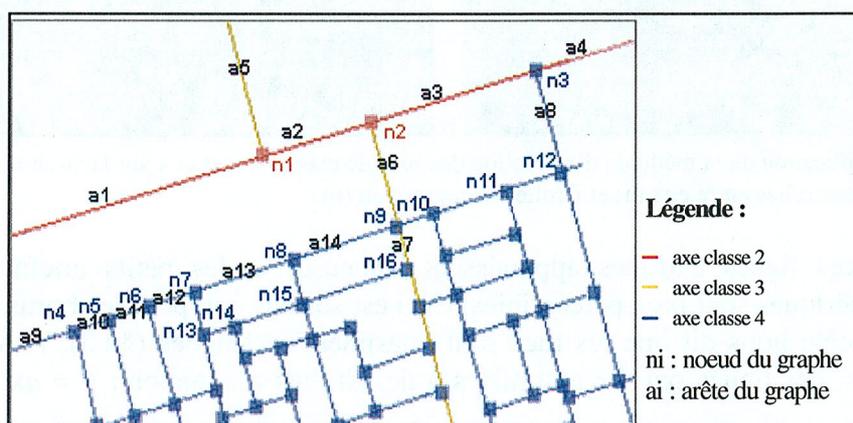


Figure 3.21. Exemple de représentation d'un réseau routier urbain par un graphe.

3.8. Conclusion

Afin d'aider les photo-interprètes dans leurs travaux de cartographie du milieu urbain, une nouvelle méthode a été développée pour extraire semi-automatiquement le réseau routier urbain à partir d'images de télédétection de haute résolution spatiale.

Dans un premier temps, deux modèles ont été définis : l'un pour les rues de différentes classes constituant le réseau étudié, et l'autre pour le réseau routier des villes étudiées. Ces modèles permettent de localiser et d'extraire les objets urbains recherchés (les rues) dans les images de télédétection.

Le modèle de "rue", basé sur la géométrie, la radiométrie et la typologie des rues, est explicite. Il peut être adapté à différents types de rues ou routes possédant des propriétés géométriques et radiométriques identiques, mais avec une typologie voisine.

Le modèle de "réseau routier", basé sur des propriétés de connexion et de hiérarchie, est actuellement très simple et incomplet.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés à l'extraction des bords et des caractéristiques des rues constituant le réseau routier urbain étudié.

Sur les images à très haute résolution spatiale, de nombreux détails superflus sont perceptibles, tels que les véhicules par exemple. Aussi, la méthode employée est basée sur les deux outils mathématiques suivants : l'analyse multirésolution et la transformée en ondelettes.

L'analyse multirésolution permet de créer des approximations successives de l'image à des résolutions de plus en plus grossières. Les détails superflus sont ainsi éliminés. Ces

approximations sont utilisées pour extraire les bords des rues dans un traitement multirésolution.

La transformée en ondelettes permet de modéliser la différence d'information qui existe entre deux images successives. Elle permet ainsi de mettre en évidence les structures de différentes tailles constituant les rues. Les images de coefficients d'ondelettes ainsi créées sont utilisées pour extraire les caractéristiques (terre-plein central et terre-pleins secondaires) des rues de classe 1 à 3 dans un traitement multirésolution.

Les traitements utilisés sont semi-automatiques, comme pour la plupart des différents travaux effectués pour extraire le réseau routier des images de télédétection. L'analyse multirésolution est d'un apport indéniable à l'extraction du réseau routier des images satellitaires de haute résolution spatiale. Cet outil est, à mon avis, nécessaire à ce genre d'application pour obtenir des algorithmes fiables et performants, surtout en milieu urbain. De plus, couplé avec un modèle explicite des objets à détecter, il permet de travailler indifféremment sur des images avec une résolution spatiale allant de 0,8 m (aériennes) à 10 m (satellites - SPOT 1-3 panchromatique).

Dans un troisième temps, le réseau routier a été extrait des images de télédétection à haute résolution spatiale acquises sur le milieu urbain. Ainsi, les rues de différentes classes extraites dans l'étape précédente sont reliées entre elles pour former le réseau routier urbain. Les positions des différentes intersections du réseau étudié sont connues.

La méthode semi-automatique ainsi développée a été appliquée à différents types d'images de ville, *i.e.* à des images issues de différents capteurs et de différentes résolutions spatiales. Ces différentes applications et l'analyse de leurs résultats sont présentées dans le chapitre 5. L'analyse de ces résultats ne peut pas être que visuelle si la connaissance des limites d'utilisation des algorithmes développés est nécessaire aux futurs utilisateurs pour créer les cartes ou les plans de ville aux échelles adéquates. Aussi, nous nous intéressons, dans le prochain chapitre, aux méthodes possibles pour évaluer quantitativement les rues de différentes classes et les réseaux routiers urbains extraits des images-test.



Chapitre 4

METHODES D'EVALUATION DE RESULTATS

Chapitre A

METHODS OF EVALUATION OF RESULTS

Une analyse visuelle ne suffit pas pour évaluer les résultats des traitements d'extraction du réseau routier urbain développés. Une analyse quantitative s'avère nécessaire pour fixer les limites d'utilisations de la méthode élaborée. Or, dans la littérature, il y a peu d'articles qui analysent quantitativement les résultats issus des méthodes d'extraction du réseau routier. La plupart des auteurs évaluent de manière visuelle leurs résultats.

Aussi, ce chapitre va définir quelques critères quantitatifs d'évaluation des traitements appliqués pour extraire les bords et les caractéristiques (terre-pleins centraux et secondaires) des différentes rues étudiées, ainsi que pour extraire le réseau routier urbain des images à très haute résolution spatiale. Ces critères d'évaluation sont basés sur :

- l'emprise des rues. Cette surface est estimée par la mesure de la surface comprise entre les deux bords extraits.
- le positionnement des bords et des caractéristiques des rues extraites.
- les indices de connectivité du réseau routier urbain extrait.

Les taux d'erreur issus de ces critères d'évaluation sont utiles, par exemple, aux cartographes. Afin de produire, à l'échelle adéquate, une carte ou un plan du milieu urbain étudié, les cartographes doivent pouvoir connaître l'échelle à partir de laquelle les résultats issus de la méthode développée sont valides.

Pour évaluer les taux d'erreur, nous comparerons les estimations à des quantités (par exemple, l'emprise) de référence. Ces quantités sont mesurées à partir d'une photo-interprétation de la même image.

4.1. Evaluation de l'emprise des rues

Pour évaluer l'emprise des rues extraites, il nous faut connaître les points de départ et de fin des bords extraits par la méthode. La figure 4.1 illustre les deux cas d'orientation des rues extraites trouvés dans l'image. La partie grisée représente l'emprise, qui est à calculer, des rues extraites par notre méthode dans les deux cas d'orientation.

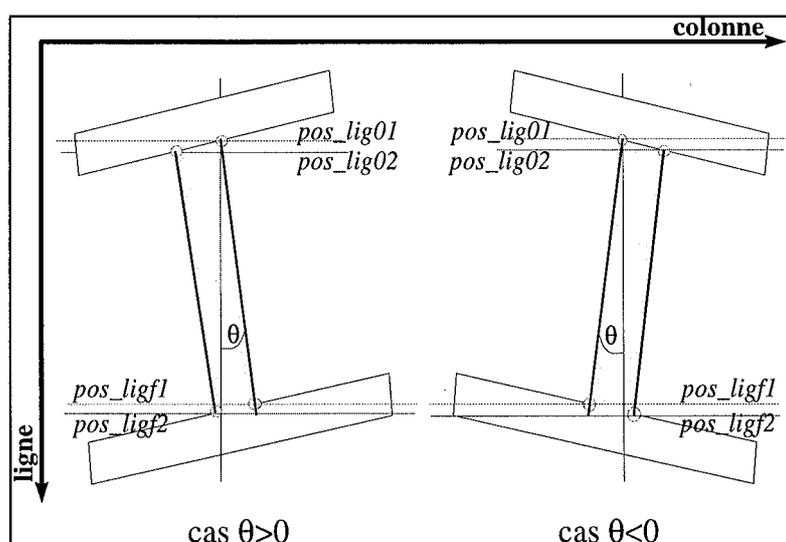


Figure 4.1. Emprise des rues selon que l'orientation de la rue extraite est dans le sens des aiguilles d'une montre (à gauche) ou en sens inverse (à droite).

La figure 4.1 montre que les positions marquant le début - pos_lig_0 - et la fin - pos_lig_f - des rues extraites sont données par les points ayant la coordonnée en lignes supérieure, *i.e.* $pos_lig_0 = pos_lig_{02}$ et $pos_lig_f = pos_lig_{f2}$. De cette façon, la surface du rectangle représentant la rue peut être approchée, avec une erreur très faible, par la surface d'un

quadrilatère (dont la forme se rapproche de celle d'un parallélogramme). En effet, comme l'orientation des bords extraits d'une rue peut ne pas être tout à fait identique, la surface calculée n'est pas toujours celle d'un parallélogramme.

Les rues de référence sont représentées par des parallélogrammes (cf. §3.3). La superficie de référence des rues traitées par la méthode est donnée par :

- la connaissance *a priori* de la largeur réelle des rues des différentes classes (cf. §3.3) de rues composant le réseau routier urbain observé,
- la longueur des rues extraites. Elle est mesurée par la donnée des points marquant le début et la fin des bords de référence de chaque rue. Ces points sont trouvés comme expliqué précédemment.

L'erreur commise lors de l'estimation de la superficie des rues extraites est ensuite calculée en prenant la différence, en valeur absolue, entre la superficie estimée et la superficie de référence des rues observées. Une erreur relative est également calculée relativement aux superficies de référence. Nous pouvons alors conclure quant à la précision obtenue lors de l'estimation de la superficie des rues extraites.

4.2. Evaluation des lignes caractéristiques des rues

Nous allons maintenant comparer le positionnement des lignes caractéristiques (bords, terre-pleins axiaux et/ou secondaires) des rues extraites au positionnement des lignes de référence correspondantes. Le taux d'erreur ainsi trouvé nous permettra d'estimer l'échelle limite pour la création d'une carte de la ville observée.

Nous avons supposé que la rectification géométrique de nos images était suffisamment correcte pour ne pas en tenir compte dans nos évaluations quantitatives.

Par exemple, si l'erreur moyenne du positionnement des lignes caractéristiques est égale à 2 m, l'échelle correspondante E sera de :

$$\begin{aligned} 0,2 \text{ (mm)} &= 2 \text{ (m)} \times 10^3 \times E & (4.1) \\ \Rightarrow E &= 1:10\,000. \end{aligned}$$

où 0,2 mm est l'erreur moyenne graphique acceptée par les cartographes,
2 m représente l'erreur moyenne planimétrique des levés.

Les lignes caractéristiques extraites par les méthodes d'extraction des rues sont comparées aux lignes de référence. Cette comparaison s'effectue en fonction de l'erreur de positionnement des lignes extraites par rapport aux lignes de référence. Il y a trois niveaux d'erreur acceptée :

- la ligne caractéristique extraite est positionnée à 1 pixel au plus de la ligne de référence, ce qui correspond à une erreur de positionnement de 2 m si la résolution spatiale de l'image originale est de 2 m.
- la ligne caractéristique extraite est positionnée à 2 pixels au plus de la ligne de référence, ce qui correspond à une erreur de positionnement de 4 m si la résolution spatiale de l'image originale est de 2 m.
- la ligne caractéristique extraite est positionnée à 3 pixels au plus de la ligne de référence, ce qui correspond à une erreur de positionnement de 8 m si la résolution spatiale de l'image originale est de 2 m.

Ces trois niveaux d'erreur de positionnement acceptée permettent de mettre en évidence les limites de la méthode d'extraction des rues. Ils permettront également d'estimer l'échelle cartographique correspondant aux résultats (Eq. 4.1).

Les bords et les caractéristiques des rues extraites peuvent être également évalués en comparant les droites de régression des points extraits avec leurs références. La comparaison des deux droites porte alors sur :

- la direction prise par les droites dans l'image,
- la longueur des rues,
- l'écart entre les points calculés et de référence, points positionnant le début et la fin des segments.

Rappelons que les bords et les caractéristiques de référence ont été marqués sur les images par photo-interprétation. Ces lignes sont tracées avec une erreur de positionnement d'au plus un pixel par rapport aux terre-pleins et aux bords visibles sur les images. Ce qui signifie notamment qu'on ne peut pas juger la qualité des résultats au niveau 1.

4.3. Evaluation du réseau routier urbain

Il existe différentes caractéristiques spatiales pour spécifier un réseau (Musso and Udric, 1988 ; Béguin et Thomas, 1997), telles que des :

- mesures de sa taille et de sa forme,
- indicateurs de sa topologie,
- indicateurs des relations existant entre les différentes classes de rues et la ville.

Toutefois, il n'existe pas, pour l'instant, de critère unique, ni de critères sans ambiguïté pour différencier parfaitement deux réseaux l'un de l'autre (Béguin et Thomas, 1997).

Quelques indices ont donc été choisis pour caractériser simplement les réseaux routiers urbains étudiés. La liste des indices présentée par la suite pour chaque domaine (taille et forme, topologie, liens avec la ville) n'est évidemment pas exhaustive.

4.3.1. Mesures de la taille et de la forme du réseau routier urbain

Ce paragraphe présente la liste des indices choisis pour définir la taille et la forme du réseau. Certains de ces indices s'appuient sur la théorie des graphes (Marshall, 1971 ; Kuntzmann, 1972), d'autres sont plus spécifiquement définis pour le réseau routier urbain étudié.

Nous allons dans un premier temps nous intéresser à **la taille et la forme d'une rue** du réseau étudié. Pour ce faire, nous avons utilisé, ou défini, les indices suivants :

- nombre d'intersections pour une rue r :

$$I_r = \sum_{i \in r} n_i \quad (4.3)$$

où n_i représente un noeud sur la rue r étudiée.

- nombre d'arêtes pour une rue r :

$$A_r = \sum_{i \in r} a_i = I_r - 1 \quad (4.4)$$

où a_i est une des arêtes divisant la rue r étudiée. Ce nombre est lié au nombre de noeuds présents sur la rue, puisqu'une arête est le lien entre deux noeuds.

- longueur d'une rue r :

$$L_r = \sum_{i \in r} l_i \quad (4.5)$$

où l_i est la longueur (en mètre) d'une arête constituant la rue r étudiée.

Dans un deuxième temps, la forme et les constituants du réseau étudié sont définis par les indices suivants :

- nombre de rues r de classe cl_i du réseau R étudié :

$$N_{cl_i} = \sum_{\substack{r \in R \\ r \in cl_i}} r \text{ avec } i \in [1;4] \quad (4.6)$$

- nombre de rues dans le réseau R étudié :

$$N_R = \sum_{i=1}^4 N_{cl_i} = \sum_{i=1}^4 \sum_{\substack{r \in R \\ r \in cl_i}} r \quad (4.7)$$

- nombre d'intersections entre rues r, r' de classe différente :

$$I_{ij} = \sum_{\substack{r, r' \in R \\ r \in cl_i \\ r' \in cl_j}} r \cap r'; j \neq i; i, j \in [1;4] \quad (4.8)$$

- nombre d'intersections de 2 rues dans le réseau R étudié :

$$I_R^\perp = \sum_{r \in R} I_r - \sum_{i=1}^4 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 I_{ij} \quad (4.9)$$

- nombre d'intersections de plus de deux rues dans le réseau R étudié :

$$I_R^{3+} = \sum_{r, r', r'' \in R} r \cap r' \cap r'' \quad (4.10)$$

- nombre d'intersections dans le réseau R étudié :

$$I_R = I_R^\perp + I_R^{3+} \quad (4.11)$$

- longueur des rues de classe cl_i du réseau R étudié :

$$L_{cl_i} = \sum_{\substack{r \in R \\ r \in cl_i}} Lr; i \in [1;4] \quad (4.12)$$

- longueur du réseau R étudié :

$$L_R = \sum_{i=1}^4 L_{cl_i} = \sum_{r \in R} Lr \quad (4.13)$$

4.3.2. Indicateurs de la topologie du réseau routier urbain

Différents rapports entre les indices définis précédemment peuvent définir quantitativement la topologie d'un réseau supposé planaire. Nous avons choisi d'utiliser les trois rapports suivants, le premier que nous avons défini et les deux autres soulignés par Musso and Udric (1988) :

- indice de recouvrement des rues de classe cl_i :

$$\lambda_{cl_i} = \frac{L_{cl_i}}{L_R}; i \in [1;4] \quad (4.14)$$

Cet indice permet de connaître l'importance accordée aux différentes classes de rues dans le réseau routier urbain étudié.

- indicateur de la complexité du réseau :

$$\beta = \frac{\sum_{r \in R} A_r}{I_R} \quad (4.15)$$

Cet indicateur représente la complexité du réseau étudié en terme de nombre de connexions (arêtes) relativement au nombre d'intersections (noeuds) constituant le réseau étudié. Sa valeur minimale de 0,5 est obtenue avec une rue élémentaire constituée de deux intersections (noeuds). Plus la rue est composée d'arêtes et de noeuds, plus β se rapproche de 1 et cela de manière asymptotique.

- indice de connectivité du réseau :

$$\gamma = \frac{\sum_{r \in R} A_r}{3(I_R - 2)}, I_R > 2 \quad (4.16)$$

L'indice de connectivité du réseau représente le rapport entre le nombre d'arêtes constituant le réseau étudié et le nombre maximal de noeuds possibles dans le réseau. Plus il existe de connexions (arêtes) entre les noeuds du réseau étudié, plus la valeur de γ est grande ($0,33 \leq \gamma \leq 1$).

4.3.3. Conclusion

Pour évaluer les réseaux routiers urbains extraits, les différents indicateurs des réseaux étudiés sont mesurés sur les plans des villes observées. Ces plans de villes sont supposés exacts pour la topologie des réseaux routiers urbains étudiés. Ces indices nous serviront de référence.

Les indices de connectivité du réseau sont calculés sur les réseaux routiers urbains extraits supposés planaires. La comparaison entre ces indices et les indices de référence nous permet alors de connaître le taux d'erreur commis lors de l'extraction semi-automatique du réseau routier urbain des images de télédétection des villes considérées.

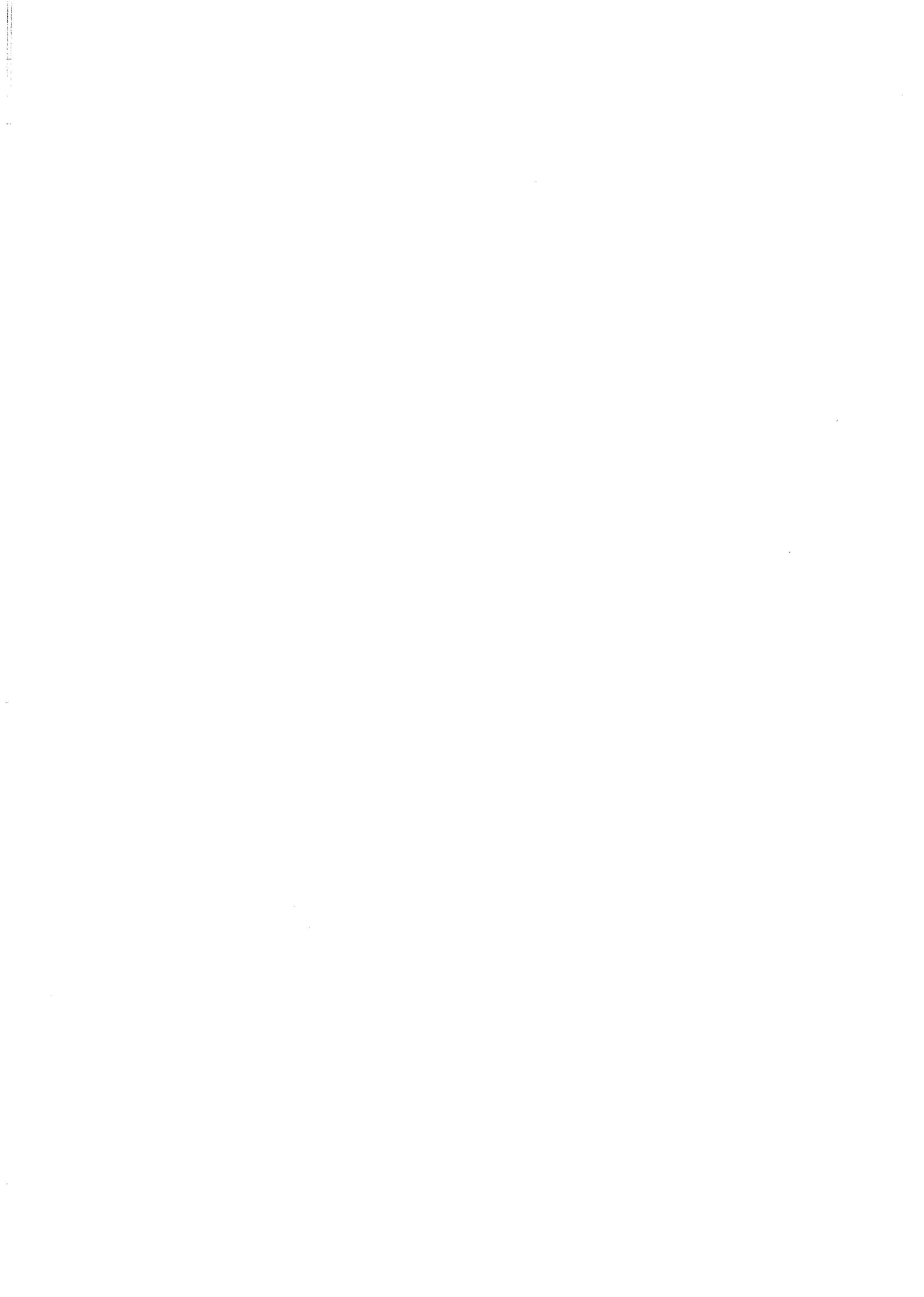
4.4. Conclusion

Pour mieux évaluer les résultats issus de l'application de notre méthode semi-automatique, une analyse quantitative d'évaluation de ces résultats a été définie. Cette analyse est composée de différents critères quantitatifs basés sur :

- l'emprise des rues du réseau routier urbain étudié,
- le positionnement des bords et des caractéristiques (terre-pleins centraux et secondaires) des rues considérées,
- des indices de connectivité du réseau routier urbain étudié.

Les taux d'erreur issus de ces différents critères quantitatifs d'évaluation permettent alors de fixer les limites d'utilisation de la méthode semi-automatique développée pour extraire hiérarchiquement le réseau routier des images de télédétection de haute résolution spatiale des villes observées.

La méthode développée est appliquée à différents types d'images (différentes résolutions spatiales et spectrales) de télédétection du milieu urbain. Ces différentes applications sont présentées dans le chapitre suivant. Une analyse visuelle des résultats est effectuée. De plus, la méthode d'évaluation quantitative définie dans ce chapitre fournit les taux d'erreur commis lors de l'extraction semi-automatique des réseaux routiers urbains étudiés.



Chapitre 5

APPLICATIONS ET EVALUATION DE LA METHODE

Chapitre 5

APPLICATIONS ET ÉVALUATION DE LA MÉTHODE

La méthode a été appliquée à différents types d'images, *i.e.* à différentes résolutions spatiales et spectrales. Ces images ont été acquises par les capteurs :

- russe, KVR-1000, dans le canal panchromatique, sur la ville de Jedda (Arabie Saoudite) en mars 1991. Ce capteur est analogique et l'image sur Jedda a ensuite été numérisée à une résolution spatiale de 2 m.
- HRV de SPOT, dans le canal panchromatique, sur la ville de Jedda en septembre 1993. La résolution spatiale de cette image est de 10 m.
- aéroporté du CNES, le Radiomètre Aéroporté Multispectral Imageur (R.A.M.I.), sur la région de Nancy (France) avec une résolution spatiale de 1,63 m et sur la région de Nîmes (France) avec une résolution spatiale de 0,83 m. Ce capteur travaille dans les mêmes bandes spectrales que celles de SPOT, *i.e.* que ce capteur dispose des bandes spectrales suivantes : B1 (510 à 600 nm), B2 (610 à 420 nm) et B3 (760 à 950 nm).

5.1. Jedda

Le quartier Al Salamah de Jedda couvrant environ 4 km² a été extrait des images panchromatiques issues de KVR-1000 et de SPOT, que nous appellerons Jedda-KVR et Jedda-SPOT respectivement. Il existe un plan, plutôt approximatif, de Jedda à l'échelle 1:22 500 (figure 5.1), qui nous aidera lors de l'analyse des résultats.

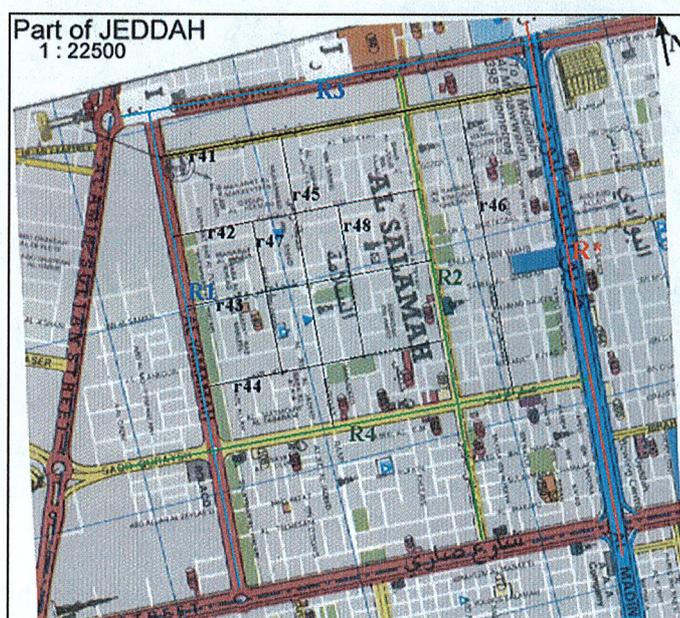


Figure 5.1. Extrait du plan de la ville de Jedda au 1:22500 - quartier Al Salamah.

La rue de classe 1 appelée R*, les rues de classe 2 et 3 appelées R1, R2, R3 et R4 et les rues de classe 4 appelées r4i, i de 1 à 8 (figure 5.1), sont extraites par l'application de notre méthode à Jedda-KVR (figure 5.2).

Seules les rues R*, R1, R2, R3 et R4 sont extraites de Jedda-SPOT (figure 5.7). A cette résolution spatiale, ces rues sont en fait représentées par des modèles similaires à celui des rues de classe 4 mais à différentes largeurs.

5.1.1. Jedda-KVR

5.1.1.1. Analyse visuelle

Des rues de classe 1 et de classe 2-3 présentes sur Jedda-KVR (figure 5.2) ont été extraites leurs deux bords (marqués en rouge) et leurs caractéristiques, *i.e.* terre-pleins centraux (marqués en vert) et secondaires (marqués en jaune).



Figure 5.2. Application de la méthode à Jeddah-KVR (en rouge : les bords, en vert : le terre-plein central et en jaune : les terre-pleins secondaires des différentes rues extraites).

Les terre-pleins centraux extraits (en vert) de ces rues suivent bien les terre-pleins correspondants visibles sur l'image originale. Et ceci même lorsque les terre-pleins paraissent morcelés ou sont peu perceptibles sur l'image originale; c'est le cas pour la rue R3 dans sa partie située en haut à droite de la figure 5.2 et pour la rue R2 sur toute sa longueur. Cependant, les terre-pleins extraits de la rue R* (en vert pour le central et en jaune pour les secondaires) sont légèrement décalés par rapport aux terre-pleins perceptibles sur la figure 5.2 dans la partie située en bas à droite de l'image.

Seuls les bords extraits des rues R2 et R4, le bord droit des rues R* et R1 et le bord bas de la rue R3 sont bien ajustés aux bords correspondants visibles sur l'image originale. Pour les autres rues, le bord extrait soit :

- est parallèle mais décalé par rapport au bord visible sur la figure 5.2, comme pour le bord gauche de la rue R1 par exemple.
- se décale au fur et à mesure de la progression de l'algorithme d'extraction des bords, comme pour le bord gauche de la rue R* ou le bord haut de la rue R3 par exemple.

Seuls les deux bords (en rouge) des rues de classe 4 ont été extraits de Jedda-KVR (figure 5.2). Pour cette classe, le traitement d'extraction des bords connaît plus de problèmes que pour les autres classes. En effet, les rues sont moins contrastées avec leur voisinage. Il est donc plus difficile pour le traitement de trouver les points d'intersection des profils de ligne considérés des rues traitées, comme pour les rues r47 ou r48 par exemple. Il est également plus difficile pour l'utilisateur de bien positionner le point de départ estimé des bords des rues traitées, comme c'est le cas, par exemple, pour le bord haut des rues r41, r42 ou r44 ou le bord droit de la rue r45. Cependant, visuellement, les bords extraits des rues traitées suivent relativement bien les bords correspondants perceptibles sur la figure 5.2 quoique légèrement décalés.

L'analyse visuelle des résultats montre donc le bon positionnement des caractéristiques extraites (terre-pleins centraux et secondaires) par rapport aux terre-pleins correspondant sur les images issues de KVR-1000. Les bords extraits des rues sont relativement bien ajustés aux bords correspondant.

5.1.1.2. Evaluation quantitative

5.1.1.2.1. Emprise des rues

L'emprise des rues extraites a été estimée en calculant l'aire incluse entre les deux droites marquant les bords de ces rues (§4.1). Ces emprises sont ensuite comparées avec les superficies de référence.

Le tableau 5.1 présente les taux d'erreur calculés sur les emprises des rues des classes 1, 2 et 3 de Jedda-KVR (Figure 5.2). Le tableau 5.2 correspond aux taux d'erreur calculés pour les rues de classe 4 extraites de Jedda-KVR.

Tableau 5.1. Taux d'erreur sur les emprises des rues de classe 1 et de classe 2-3 extraites de Jedda-KVR.

| | R* | R1 | R2 | R3 | R4 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| S_{réf} (m²) | 82037 | 41092 | 44663 | 47733 | 37718 |
| S_{calc} (m²) | 84463 | 40955 | 30726 | 52727 | 33942 |
| taux d'erreur | 3% | 0% | 31% | 10% | 10% |

Le tableau 5.1 montre que le taux d'erreur sur les emprises des rues des classes 1, 2 et 3 est très faible (*i.e.* taux $\leq 10\%$), excepté pour la rue R2 où le taux atteint 31%. La méthode a donc réussi à extraire des rues dont la superficie est en adéquation avec la référence.

Les taux d'erreur sur l'emprise des rues sont fortement liés aux bords extraits de ces rues. L'analyse visuelle de la figure 5.2 nous permet ainsi de mieux comprendre le tableau 5.1. Trois raisons ressortent pour expliquer ces taux :

- si l'extraction des deux bords n'est pas correcte (*i.e.* soit il existe un décalage mais le bord extrait reste parallèle au bord «réel», soit le décalage se fait au fur et à mesure de la progression du bord extrait dans l'image originale, soit l'extraction des bords est incomplète), les erreurs se compensent lors du calcul de la superficie de ces rues. L'emprise de la rue extraite est ainsi très proche de la superficie de référence. C'est le cas pour les rues R*, R1 et R3.
- si l'extraction d'un des bords est visuellement correcte et si peu de décalage entre l'autre bord extrait et le bord «réel» apparaît, le taux d'erreur est très faible. C'est le cas pour la rue R4.

- si l'extraction d'un des bords est visuellement correcte et si l'autre bord extrait montre un grand décalage par rapport au bord «réel», le taux d'erreur sur l'emprise de la rue extraite devient alors important. C'est le cas pour la rue R2.

Il est donc difficile avec ce critère de connaître les erreurs effectives dues à l'extraction des bords des rues des classes 1 à 3 puisque les erreurs peuvent se compenser lors du calcul de la superficie de ces rues. Ce critère indique seulement s'il existe une erreur effective importante commise lors de l'extraction des bords. En effet dans ce cas-là, le taux d'erreur sur l'emprise des rues devient supérieur à 30%.

Analysons maintenant les résultats obtenus (tableau 5.2) lors de la comparaison des emprises des rues de classe 4 extraites de Jedda-KVR (figure 5.2).

Tableau 5.2. Taux d'erreur sur les emprises des rues de classe 4 extraites de Jedda-KVR.

| | r41 | r42 | r43 | r44 | r45 | r46 | r47 | r48 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| S_{réf} (m²) | 21768 | 12411 | 11600 | 12844 | 18099 | 11423 | 7819 | 9646 |
| S_{calc} (m²) | 16572 | 6333 | 8760 | 8989 | 19071 | 10245 | 5980 | 5541 |
| taux d'erreur | 24% | 49% | 24% | 30% | 11% | 10% | 23% | 43% |

Les taux d'erreur sur les emprises des rues de classe 4 extraites sont plus élevés que les taux trouvés pour les autres classes de rues. L'association de l'analyse visuelle de la figure 5.2 avec l'analyse du tableau 5.2 montre que, même si visuellement les bords extraits semblent bien ajustés aux bords «réels» (pour les rues r41, r43, r44 et r47), la méthode échoue puisque le taux d'erreur sur les emprises est compris entre 23 et 30%. Si visuellement il apparaît un décalage important entre les bords extraits et les bords «réels» (pour r42 et r48), le taux d'erreur devient supérieur à 43%. Le cas où les erreurs effectives dues à l'extraction, erreurs perceptibles sur la figure 5.2, se compensent lors du calcul de la superficie des rues se retrouve également pour les rues de classe 4. C'est le cas pour les rues r45 et r46 avec un taux d'erreur d'environ 10%.

Pour les rues de classe 4 extraites, le critère basé sur l'emprise des rues permet d'améliorer l'analyse qualitative des résultats puisqu'il indique des erreurs n'apparaissant pas visuellement. Cependant, dans ce cas-là également, des erreurs perceptibles sur l'image-résultat peuvent être compensées lors du calcul de la superficie et le taux d'erreur sur l'emprise des rues ne fait pas apparaître les erreurs effectives à l'extraction des bords.

En conclusion, le critère basé sur l'emprise des rues extraites permet d'améliorer l'analyse qualitative de l'image-résultat en indiquant les rues sur lesquelles il existe des erreurs effectives à l'extraction des bords mais qui sont peu perceptibles visuellement. Il fait également apparaître les rues pour lesquelles des erreurs effectives à l'extraction des bords sont importantes. Cependant pour certaines rues, les erreurs effectives à l'extraction des bords qui sont perceptibles visuellement n'apparaissent pas dans les taux d'erreur calculés sur les superficies. En effet, les erreurs se compensent lors du calcul de la superficie des rues.

L'analyse des taux d'erreur montre également que la méthode rencontre plus de difficultés lors de l'extraction des bords des rues de classe 4 que lors de l'extraction des rues de classe 1 2 ou 3. Ceci est dû au fait que les contrastes existant entre les rues de classe 4 et leur environnement sont plus faibles que pour les autres classes de rues.

5.1.1.2.2. Positionnement des bords et des caractéristiques des rues

Les bords et les caractéristiques extraits sont évalués par rapport aux références correspondantes suivant les deux méthodes définies au chapitre 4 (§4.2) :

- évaluation de la précision du positionnement des points extraits appartenant aux bords et caractéristiques par rapport à leur référence.
- comparaison de la droite de régression correspondant à ces points extraits avec la droite de référence.

5.1.1.2.2.1. Les rues des classes 1, 2 et 3

Dans un premier temps, la position des points extraits des bords et des caractéristiques des rues des classes 1, 2 et 3 va être comparée aux références correspondantes. Les taux d'erreur calculés sont fonction de l'erreur de positionnement acceptée des points extraits par rapport aux références. Puis, dans un deuxième temps, les droites de régression issues de ces points seront comparées aux droites de référence correspondantes.

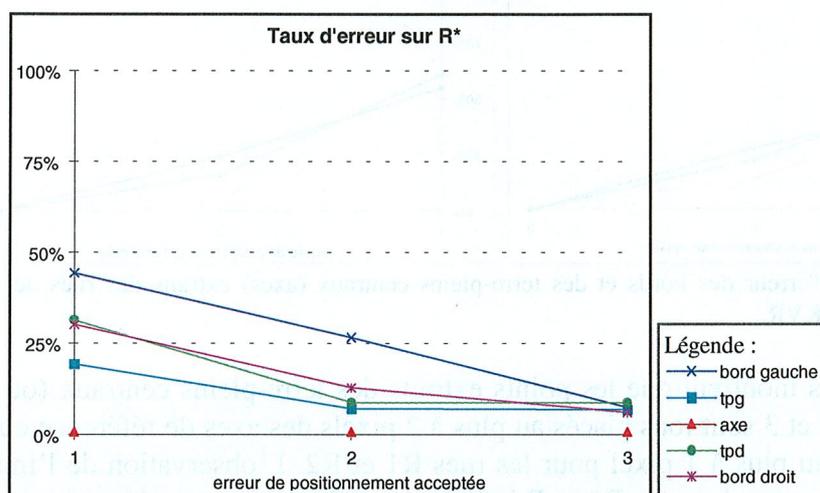


Figure 5.3. Taux d'erreur des bords, du terre-plein central (axe) et des terre-pleins secondaires (gauche : tpg et droit : tpd) extraits de la rue R* de Jedda-KVR.

La figure 5.3 présente les résultats pour les points extraits des bords et des caractéristiques de la rue R* (figure 5.2). Ce diagramme montre que tous les points extraits du terre-plein central ou axe (représenté par des triangles sur figure 5.3) de cette rue sont positionnés au plus à 1 pixel de l'axe de référence, puisque le taux d'erreur est nul quelle que soit l'erreur de position acceptée. Pour les terre-pleins secondaires, plus des deux tiers des points extraits sont placés au plus à 1 pixel des terre-pleins de référence correspondants et qu'ils sont tous placés au plus à 2 pixels de ces références (taux d'erreur < 10%). Par contre, pour les bords de cette rue, les points extraits sont placés au plus à :

- 1 pixel des bords de référence pour plus des deux tiers d'entre eux,
- 2 pixels des bords de référence pour plus des trois quarts d'entre eux,
- 3 pixels des bords de référence pour plus des neuf dixièmes d'entre eux.

Il apparaît donc que pour la rue R*, la méthode réussit à correctement positionner les terre-pleins, mais qu'elle rencontre plus de difficultés pour bien placer les bords, surtout le bord gauche. En effet, presque la moitié des points extraits du bord gauche sont positionnés à plus de 1 pixel du bord de référence et plus du quart d'entre eux le sont à plus de 2 pixels. L'observation de l'image originale montre que cette difficulté rencontrée par la méthode semble due à l'ombre portée des bâtiments sur la rue, l'orientation du Soleil étant SE-NW. Il y a donc un décalage entre le bord réel de la rue et le bord perceptible sur l'image.

Analysons maintenant les résultats obtenus pour les rues de classes 2 et 3 extraites de Jedda-KVR (figure 5.2). Les taux d'erreur sur le positionnement des points extraits des bords et des caractéristiques de ces rues sont résumés dans les graphiques présentés à la figure 5.4.

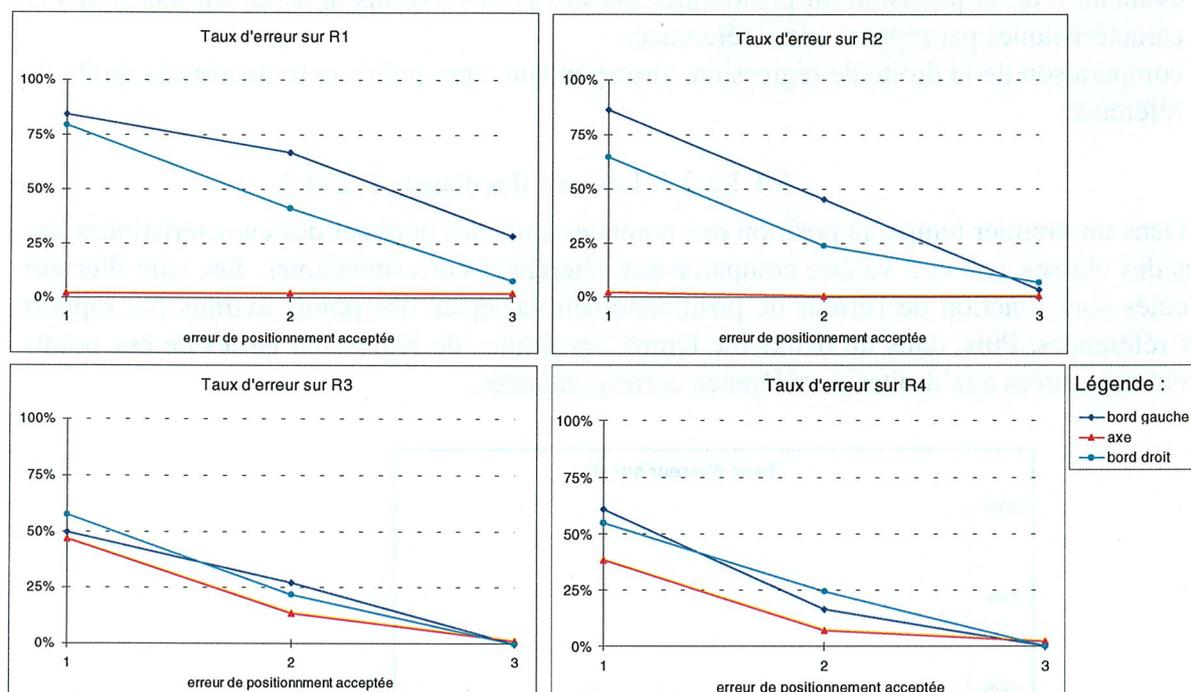


Figure 5.5. Taux d'erreur des bords et des terre-pleins centraux (axes) extraits des rues de classe 2-3 de Jedda-KVR.

Ces graphiques montrent que les points extraits des terre-pleins centraux (ou axes) de ces rues des classes 2 et 3 sont tous placés au plus à 2 pixels des axes de référence correspondants (taux < 15%) et au plus à 1 pixel pour les rues R1 et R2. L'observation de l'image originale fait apparaître que pour les rues R3 et R4, les terre-pleins sont morcelés et peu contrastés par rapport aux rues. Cette différence de radiométrie et d'apparence explique cette différence de positionnement pour les points extraits des axes.

L'analyse des graphiques met également en évidence les difficultés que rencontre la méthode à bien positionner les bords de ces rues. En effet pour les bords, les points extraits sont placés au plus à :

- 1 pixel des bords de référence pour moins de la moitié d'entre eux et plus du quart d'entre eux,
- 2 pixels des bords de référence pour plus du quart d'entre et moins des trois quarts d'entre eux,
- 3 pixels des bords de référence pour tous les points, excepté pour le bord gauche de R1 qui a le quart des points extraits à plus de 3 pixels.

Ainsi, ce critère permet de mettre en évidence les difficultés rencontrées par la méthode lors de l'extraction des terre-pleins si ceux-ci apparaissent morcelés ou peu contrastés dans l'image originale. Cependant il met en évidence que les terre-pleins extraits sont toujours positionnés au plus à 2 pixels des références, ce qui est correct. Il confirme également les difficultés rencontrées par la méthode lors de l'extraction des bords des rues.

L'analyse qualitative des résultats (figure 5.2) est donc bien confirmée par ce critère : les terre-pleins extraits suivent très bien les terre-pleins centraux correspondants visibles sur

l'image et les bords extraits suivent difficilement les bords correspondants visibles sur l'image.

Afin de savoir plus précisément d'où proviennent les erreurs effectives dues à l'extraction des bords, les droites de régression des points extraits sont comparées aux droites de référence correspondantes (tableau 5.3) suivant les critères définis au chapitre 4.

Tableau 5.3. Comparaison des bords extraits des rues des classes 1, 2 et 3 de Jedd-KVR aux références suivant leur orientation $\Delta\theta$, leur longueur ΔL , la position des points marquant leur début ΔP_{deb} et leur fin ΔP_{fin} .

| | | $\Delta\theta$ | ΔL (m) | ΔP_{deb} (m) | ΔP_{fin} (m) |
|-----------|-------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| R* | bord gauche | -0.2 | -6.2 | -0.9 | -7.1 |
| | bord droit | 0.0 | -2.7 | -3.8 | -2.7 |
| R1 | bord gauche | 0.1 | 1.1 | -3.2 | -2.0 |
| | bord droit | 0.0 | 0.4 | -2.3 | -1.9 |
| R3 | bord gauche | -0.1 | 35.5 | 0.4 | -2.7 |
| | bord droit | 0.0 | 36.8 | 2.6 | 1.4 |
| R2 | bord gauche | 0.1 | 2.9 | 2.3 | 5.2 |
| | bord droit | 0.2 | 5.6 | -5.1 | 0.5 |
| R4 | bord gauche | -0.2 | -3.8 | 3.2 | -3.1 |
| | bord droit | -0.2 | -2.5 | 0.6 | -4.4 |

Les directions des bords extraits sont le plus souvent décalées d'au plus $\pm 0.2^\circ$ par rapport aux directions des bords de référence correspondants. Ce décalage est important puisqu'il s'applique à des rues dont la hauteur des rectangles les englobant se situe entre 700 (1,4 km) et 950 (1,9 km) pixels. Seuls les bords droits extraits pour les rues R*, R1 et R3 se propagent dans une direction très voisine de celle des références.

De plus, la majorité des points positionnant le début des bords extraits sont décalés par rapport aux points positionnant le début des bords de référence correspondants. Ce décalage est compris entre 2,3 et 5,1 m (en valeur absolue), ce qui est assez conséquent pour la suite du traitement d'extraction des bords. Ce décalage est principalement dû à une mauvaise estimation des points début des bords par l'utilisateur. Cependant, il est parfois difficile pour l'utilisateur de bien positionner ces points début puisque le contraste entre la rue et son environnement n'est pas toujours élevé : la rue R* en est un exemple (figure 5.5). Il y a seulement trois bords qui semblent avoir été bien initiés puisque le point localisant le début des bords extraits est à moins d'un mètre de celui marquant les bords de référence : c'est le bord gauche des rues R* et R3 et le bord droit de la rue R4.

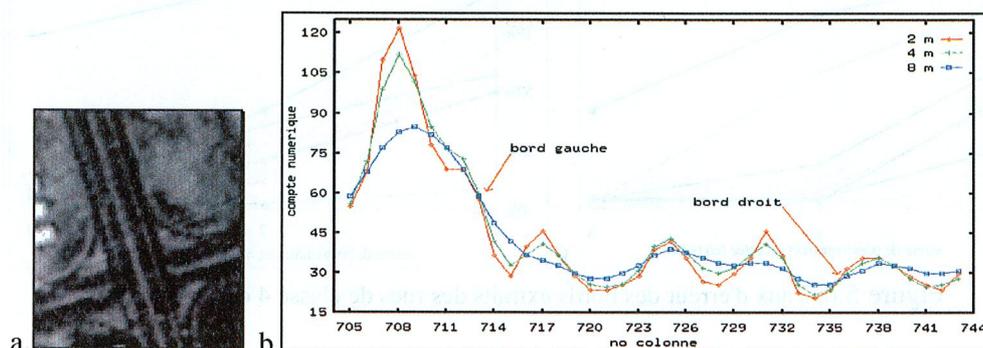


Figure 5.5. Détail (x1,3) de la rue R* dans sa partie haute (a) - Profil de la ligne marquant le début de cette rue (b).

Sachant que $\Delta P_{fin} = \Delta P_{deb} + H \cdot (\tan(\theta_{ref}) - \tan(\theta))$ où H est la hauteur du rectangle englobant la rue extraite, soit le bord extrait se rapproche du bord de référence (comme pour le bord droit de la rue R2 par exemple), soit il s'en éloigne (comme pour le bord gauche de la rue R* par exemple).

Cette comparaison des droites met en évidence les erreurs qui se propagent lors de l'extraction des bords des rues des classes 1, 2 et 3 et qui se retrouvent lors de la comparaison du positionnement des points extraits des bords avec celui des bords de référence : l'erreur sur la direction des bords extraits et le décalage existant entre les points localisant le début des bords extraits et ceux localisant le début des bords de référence. Ces erreurs peuvent également se compenser comme pour le bord droit de la rue R2 par exemple.

Ce critère confirme également l'analyse visuelle (§5.1.1.1). En effet pour la rue R1 par exemple, le bord droit de ces rues apparaît décalé ($\Delta P \cong -2 \text{ m} = 1 \text{ pixel}$) mais en étant parallèle ($\Delta \theta \cong 0$) au bord «réel» et le bord gauche se décale du bord «réel» au fur et à mesure ($\Delta P_{deb.} = -0,9 \text{ m}$ et $\Delta P_{fin} = -7,1 \text{ m}$) de la progression du bord extrait dans la figure 5.2.

L'analyse quantitative des rues des classes 1, 2 et 3 par ces critères confirme l'analyse qualitative effectuée sur l'image-résultat (figure 5.2) : les caractéristiques extraites sont bien ajustées aux terre-pleins «réels» puisqu'ils sont positionnés à 1 pixel au plus de leur référence. Cependant, elle renforce l'analyse qualitative où les rues paraissent avoir des bords extraits bien ajustés aux bords «réels», mais qui, quantitativement, sont placés à 2 pixels, voire à 3 pixels, au plus de leur référence.

Ces critères renforcent également les résultats trouvés lors de l'analyse du critère sur l'emprise de ces rues sur l'image originale.

5.1.1.2.2.2. Rues de classe 4

Nous allons maintenant nous intéresser à la précision obtenue sur le positionnement des bords extraits des rues de classe 4 de Jedda-KVR (figure 5.2).

Dans un premier temps, la position des points extraits des bords des rues de classe 4 de Jedda-KVR est comparée à celle des bords de référence. Cette comparaison est synthétisée sur les deux graphiques présentés à la figure 5.6.

Notons que le bord gauche des rues r41,r42,r43 et r44 représente le bord haut de ces rues sur la figure 5.2.

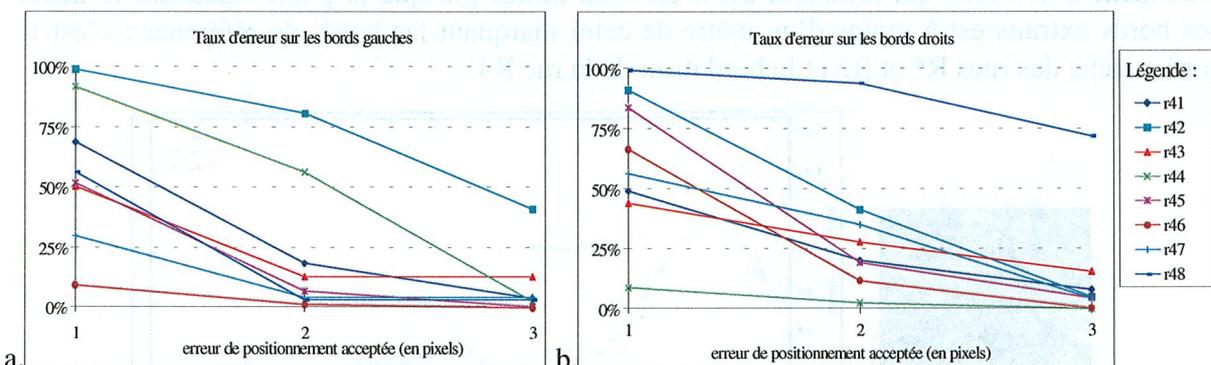


Figure 5.6. Taux d'erreur des bords extraits des rues de classe 4 de Jedda-KVR.

La plupart des rues extraites ont plus des trois quarts du bord gauche extrait situé à 2 pixels au plus du bord de référence (figure 5.6a). Seules les rues r42 et r44 possèdent un bord gauche extrait dont moins de la moitié est placé à 2 pixels au plus du bord de référence. De plus, si la totalité du bord gauche extrait de r44 est placé à 3 pixels au plus du bord de référence, presque la moitié du bord gauche extrait de r42 se positionne à plus de 3 pixels du bord de référence. La méthode échoue donc totalement à extraire le bord gauche de r42 et échoue partiellement à extraire le bord gauche de r44.

La figure 5.6b montre que l'extraction du bord droit des rues de classe 4 de Jedda-KVR rencontre plus de difficulté pour bien positionner les bords extraits. En effet, seules 5 des rues extraites (r41, r43, r44, r45 et r46) ont au moins les trois quarts de leur bord droit extrait placé à 2 pixels au plus du bord de référence. De plus, tout le bord droit extrait de r44 est à 1 pixel au plus du bord de référence. Et si r42 et r47 placent plus de la moitié de leur bord droit extrait à 2 pixels au plus du bord de référence et plus des trois quarts de ce bord à 3 pixels au plus, un quart seulement du bord droit extrait de r48 est situé à 3 pixels au plus du bord de référence.

Ainsi, les bords extraits de la rue r42 positionnés à plus de 2 pixels pour la moitié expliquent pourquoi le taux d'erreur trouvé sur son emprise est si élevé (tableau 5.2). De même, si l'emprise de la rue r48 présente un taux d'erreur supérieure à 40%, c'est parce qu'un de ses bords est assez bien ajusté (figure 5.6a), alors que l'autre bord est positionné pour les trois quarts à plus de 3 pixels du bord de référence (figure 5.6b). Et si r44, qui visuellement présente des bords extraits assez bien ajustés aux bords «réels» (figure 5.2), a un taux d'erreur de 30% sur son emprise, c'est parce qu'un des bords extraits est placé à 2 pixels au plus du bord de référence pour la moitié et que l'autre est positionné sur le bord de référence (taux d'erreur < 10% à 1 pixel).

Par conséquent, la précision obtenue sur la position des bords extraits des rues de classe 4 de Jedda-KVR par rapport aux bords de référence explique bien les taux d'erreur trouvés sur l'emprise de ces rues alors que visuellement, la méthode semblait avoir réussi à correctement placer certains des bords extraits.

Ce critère permet donc de connaître les limites d'utilisation de la méthode pour l'extraction des bords des rues de classe 4. Cependant, ce critère ne permet pas de préciser d'où proviennent les erreurs effectives dues à l'extraction des bords.

Aussi, dans un deuxième temps, afin de savoir plus précisément d'où proviennent les erreurs effectives dues à l'extraction des bords, les droites de régression représentant les bords extraits sont comparées aux droites de référence correspondantes (§4.2). Les résultats issus de cette comparaison pour les rues de classe 4 extraites de Jedda-KVR sont résumés dans le tableau 5.3.

Seules les rues présentant des taux d'erreur importants sur la position de leurs bords extraits sont analysées, à savoir les rues r42, r44 et r48.

Comme le tableau 5.3 le montre, seule la rue r48 présente des bords extraits avec des orientations très décalées ($\cong 1^\circ$, en valeur absolue) de l'orientation de la rue de référence. Cet écart est lié à une erreur assez importante commise lors du calcul du positionnement des points marquant le début de chaque bord; cette erreur est très importante pour le bord gauche extrait (5,5 m \approx 3 pixels). Ces deux erreurs conjuguées impliquent que les bords extraits restent éloignés des bords de référence.

Tableau 5.3. Comparaison des bords extraits des rues de classe 4 de Jedda-KVR aux références.

| | | $\Delta\theta$ | ΔL (m) | $\Delta P_{\text{déb}}$ (m) | ΔP_{fin} (m) |
|--------------|-------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| r41 | bord gauche | -0.1 | -2.7 | 3.3 | 1.8 |
| | bord droit | 0.0 | -0.2 | -1.7 | -0.7 |
| r42 | bord gauche | 0.1 | -2.8 | 3.8 | 4.5 |
| | bord droit | 0.0 | -3.2 | -2.8 | -2.5 |
| r43 | bord gauche | 0.0 | -0.1 | 2.2 | 2.1 |
| | bord droit | -0.4 | -5.8 | 2.0 | -3.9 |
| r44 | bord gauche | -0.1 | -3.3 | 4.9 | 2.8 |
| | bord droit | -0.1 | -2.3 | 0.2 | -0.9 |
| r45 | bord gauche | -0.2 | -2.7 | 2.2 | -1.0 |
| | bord droit | 0.1 | 2.1 | -1.7 | -0.2 |
| r47 | bord gauche | 0.3 | 3.7 | -0.2 | 2.2 |
| | bord droit | 0.7 | 7.4 | -5.4 | 0.7 |
| r48 | bord gauche | -1.2 | -9.8 | 5.5 | -4.9 |
| | bord droit | -1.1 | -9.0 | -2.3 | -11.8 |
| r46 | bord gauche | 0.0 | -1.0 | 1.0 | 0.6 |
| | bord droit | 0.7 | 7.7 | -5.0 | 3.3 |
| r46_2 | bord gauche | 1.3 | 2.9 | -4.5 | 1.0 |
| | bord droit | 1.0 | 1.9 | -4.3 | 0.2 |

Cependant, nous notons que l'écart sur l'orientation des bords extraits entraîne l'éloignement du bord droit extrait du bord de référence (le point marquant la fin de ce bord est positionné à 12 m (≈ 6 pixels) de la référence), alors qu'il implique un rapprochement du bord gauche extrait de la référence dans un premier temps, puis un éloignement de la référence dans un deuxième temps. Ce qui explique que la totalité du bord gauche extrait est positionnée à 2 pixels au plus de la référence alors que les trois quarts du bord droit extrait sont à plus de 3 pixels de la référence (figure 5.6). L'explication de ce phénomène est similaire à celle du paragraphe précédent.

Pour les rues r42 et r44, les points localisant le début des bords extraits sont positionnés entre 2,8 et 4,9 m (en valeur absolue) des bords de référence correspondants, excepté pour le bord droit extrait de r44 qui est très bien ajusté au bord de référence. L'orientation des bords extraits est très peu décalée de l'orientation des rues de référence ($\leq 0,1^\circ$). Cependant, ce petit écart entraîne également soit un léger éloignement du bord extrait de sa référence (comme pour le bord gauche de r42 par exemple), soit un léger rapprochement (comme pour le bord droit de r42 par exemple), suivant le principe décrit dans le paragraphe précédent.

Ainsi, la méthode échoue lors de l'extraction des bords des rues de classe 4 sur Jedda-KVR pour deux raisons :

- une erreur est commise sur l'estimation de l'orientation de la rue à traiter.
- une erreur est commise lors de l'estimation de la position des points localisant le début des bords à extraire, ce qui implique que le point calculé localisant le début du bord extrait est décalé par rapport à la référence.

De plus, ces deux erreurs se conjuguent pour soit éloigner le bord extrait de sa référence, soit l'en rapprocher suivant l'écart mesuré sur l'orientation des bords extraits et suivant l'écart mesuré entre les points localisant le début des bords extraits et de référence.

5.1.1.2.3. Indices de connectivité du réseau routier urbain

Afin de compléter l'évaluation quantitative de la méthode, le réseau routier extrait est analysé. Cette analyse est effectuée en comparant ce réseau avec le réseau de référence suivant les différents indicateurs définissant le réseau (§4.). Malheureusement, les indicateurs du réseau routier extrait n'ont pu être obtenus que par photo-interprétation des rues extraites. Les indicateurs de référence, quant à eux, ont été obtenus par photo-interprétation du réseau routier perçu sur l'image Jedda-KVR.

5.1.1.2.3.1. Taille et forme des rues

La taille et la forme de chaque rue extraite sont, dans un premier temps, comparées avec les rues de référence. Le tableau 5.4 synthétise l'analyse effectuée sur le nombre d'intersections et d'arcs composant chaque rue et sur leur longueur.

Tableau 5.4. Nombre d'intersections Ir, d'arcs Ar et longueur Lr de chaque rue traitée (référence et extraite).

| | Ir | | Ar | | Lr (m) | |
|------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | référence | extraite | référence | extraite | référence | extraite |
| R* | 15 | 3 | 16 | 4 | 6332 | 6292 |
| R1 | 9 | 5 | 10 | 6 | 5022 | 4633 |
| R2 | 9 | 5 | 10 | 6 | 5995 | 5655 |
| R3 | 8 | 3 | 9 | 4 | 6976 | 6870 |
| R4 | 20 | 3 | 21 | 4 | 6587 | 6095 |
| r41 | 17 | 3 | 18 | 4 | 5443 | 5082 |
| r42 | 14 | 3 | 15 | 4 | 3464 | 3123 |
| r43 | 10 | 3 | 11 | 4 | 3516 | 3171 |
| r44 | 14 | 3 | 15 | 4 | 3396 | 3122 |
| r45 | 14 | 4 | 15 | 5 | 4947 | 4641 |
| r46 | 12 | 2 | 13 | 3 | 4490 | 3514 |
| r47 | 9 | 1 | 10 | 2 | 2100 | 1925 |
| r48 | 9 | 1 | 10 | 2 | 2052 | 1956 |

Ce tableau ne tient compte que des rues qui ont été extraites de Jedda-KVR, surtout pour les rues de classe 4, par notre méthode. Par conséquent, le nombre d'intersections, et donc le nombre d'arcs, composant chaque rue extraite est beaucoup moins important que ceux caractérisant les rues de référence.

Ce tableau montre également que les rues extraites sont plus courtes que les rues de référence. Il faudra donc, lors de la création effective du réseau routier, prolonger les rues extraites pour créer les connexions.

5.1.1.2.3.2. Forme et constituants du réseau routier étudié

Dans un deuxième temps, la forme et les différents constituants du réseau routier extrait sont comparés avec ceux du réseau de référence. Le tableau 5.5 synthétise cette comparaison effectuée sur le nombre de rues composant chaque classe du réseau, le nombre d'intersections du réseau, la longueur de chaque classe du réseau et la longueur du réseau dans sa globalité.

Tableau 5.5. Indices (§4.2) spécifiant les réseaux (référence et extrait).

| | N_{cl1} | $N_{cl2/3}$ | N_{cl4} | $I_{1-2/3}$ | I_{1-4} | $I_{2/3-4}$ | I_R | $L_{cl1}(m)$ | $L_{cl2/3}(m)$ | $L_{cl4}(m)$ | $L_R(m)$ |
|------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------|--------------|----------------|--------------|----------|
| Référence | 1 | 6 | 112 | 3 | 11 | 46 | 307 | 6332 | 26944 | 29108 | 61684 |
| Extrait | 1 | 4 | 8 | 2 | 1 | 10 | 27 | 6292 | 23253 | 26534 | 56079 |

Pour la longueur totale des rues de classe 4, nous n'avons tenu compte que des rues qui ont été extraites. En effet, nous avons seulement extrait 8 des 112 rues de classe 4 présentes sur l'image originale (figure 5.2). Ceci explique aussi la différence importante qui existe sur le nombre d'intersections composant le réseau routier extrait par rapport au réseau de référence.

Ce tableau montre également que la longueur de chaque classe du réseau routier extrait, et par conséquent celle de ce réseau dans sa globalité, est plus courte que celle du réseau de référence. Comme le tableau 5.4 l'a montré, les rues extraites sont plus courtes que les rues de référence.

5.1.1.2.3.3. Topologie du réseau routier étudié

Pour finir, la topologie du réseau routier extrait est comparée avec celle du réseau de référence. Le tableau 5.6 résume les résultats obtenus pour les différents indices topologiques définis au chapitre 4.

Tableau 5.6. Indices (§4.2) spécifiant la topologie des réseaux (référence et extrait).

| | λ_{cl1} | $\lambda_{cl2/3}$ | λ_{cl4} | β | γ |
|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------|----------|
| Référence | 0,10 | 0,42 | 0,48 | 0,52 | 0,17 |
| Extrait | 0,11 | 0,41 | 0,47 | 1,11 | 0,40 |

Ce tableau montre que les indices de recouvrement de chaque classe de rues du réseau routier extrait correspondent avec ceux du réseau de référence.

Par contre, il n'en va pas de même pour les indices de connectivité du réseau. Ainsi, si l'indicateur de la complexité du réseau indique bien un réseau routier simple pour la référence, celui-ci est beaucoup plus élevé pour le réseau routier extrait. Ceci est dû au fait que le réseau routier extrait n'est pas un réseau fermé et présente de nombreuses intersections en \perp et pas seulement en $+$.

5.1.2. Jedda-SPOT

A 10 m de résolution spatiale, les rues R^* , $R1$, $R2$, $R3$ et $R4$ ne sont plus représentées que par des rues dont les modèles sont similaires à celui d'une rue de classe 4 mais de différentes largeurs suivant la classe originelle de ces rues (figure 5.1). Les rues de classe 4 présentes sur la figure 5.2 ne sont plus que des lignes plus ou moins contrastées par rapport à leur voisinage sur Jedda-SPOT (figure 5.7). Ces rues ne seront pas traitées par notre méthode, car celle-ci n'a pas été élaborée pour traiter des rues "linéaires", mais des rues "surfaciques", *i.e.* de largeur supérieure à 2 pixels. Les rues à extraire sont fortement contrastées avec leur voisinage.

5.1.2.1. Analyse visuelle

Nous allons maintenant analyser visuellement les rues extraites sur Jedda-SPOT. Le résultat de l'application de la méthode d'extraction des rues est présenté sur la figure 5.7.

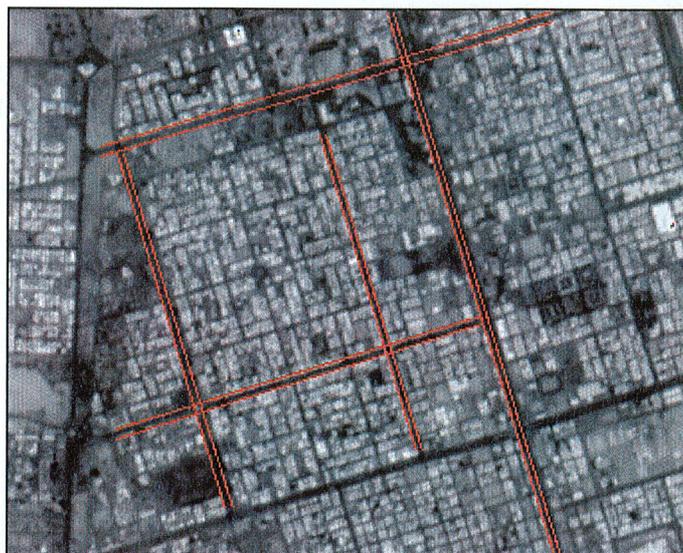


Figure 5.7. Application de la méthode à Jeddah-SPOT (en rouge : les bords des rues extraites).

Les bords extraits des rues paraissent bien ajustés aux bords correspondants perceptibles sur l'image originale. Cependant le bord droit extrait de la rue R* et le bord gauche (*i.e.* bord haut sur la figure) extrait des rues R3 et R4 sont décalés mais en restant parallèles aux bords «réels» visibles sur la figure 5.7.

5.1.2.2. Evaluation quantitative

5.1.2.2.1. Emprise des rues

Nous allons maintenant nous intéresser aux résultats obtenus lors de la comparaison des emprises des rues extraites de Jeddah-SPOT (figure 5.3). Ces résultats sont résumés dans le tableau 5.7.

Tableau 5.7. Taux d'erreur sur les emprises des rues de classe 4 extraites de Jeddah-SPOT.

| | R* | R1 | R2 | R3 | R4 |
|--------------------------------|--------|--------|-------|--------|-------|
| $S_{\text{réf}} (\text{m}^2)$ | 130052 | 100892 | 52814 | 74755 | 53443 |
| $S_{\text{calc}} (\text{m}^2)$ | 95926 | 58014 | 47707 | 103398 | 72912 |
| taux d'erreur | 26% | 42% | 10% | 38% | 36% |

Ce tableau montre que les taux d'erreur sur les emprises sont importants, plus de 26%, excepté pour la rue R2 où le taux d'erreur n'est que de 10%. L'association de ces taux d'erreur à l'analyse visuelle de la figure 5.7 montre que les taux élevés (*i.e.* taux > 35%) sont associés à des rues dont les deux bords n'apparaissent pas visuellement ajustés aux bords «réels», excepté pour la rue R1 qui ne semble pas présenter d'erreur. Par contre, si un seul bord paraît mal positionné, comme pour la rue R*, le taux d'erreur trouvé reste correct (*i.e.* taux = 26%). Le taux d'erreur pour la rue R2 est, quant à lui, bien en adéquation avec l'analyse visuelle de cette rue : les bords extraits sont bien ajustés aux bords «réels».

L'analyse de ce tableau par rapport au tableau 5.2 montre que les taux d'erreur sur les emprises des rues des classes originelles 1, 2 et 3, mais représentées par des rues de classe 4, extraites de Jeddah-SPOT sont similaires à ceux obtenus sur les rues de classe 4 extraites de Jeddah-KVR. Il apparaît donc que la méthode travaille de la même façon lors de l'extraction des bords des rues de classe 4 sur une image panchromatique de 2 m de résolution spatiale (KVR) et sur une image panchromatique de 10 m de résolution spatiale (SPOT).

5.1.2.2.2. Positionnement des bords des rues

Nous allons maintenant évaluer la précision obtenue sur le positionnement des bords extraits des rues de Jedda-SPOT suivant les deux critères définis au chapitre 4.

L'analyse de la position des points extraits des bords des rues extraites de Jedda-SPOT est résumée dans les diagrammes présentés à la figure 5.8.

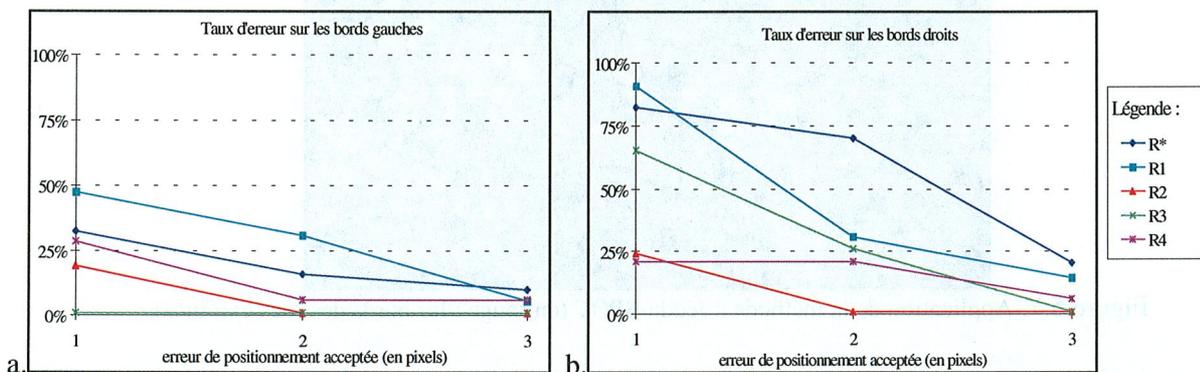


Figure 5.8. Taux d'erreur des bords extraits des rues de Jedda-SPOT.

Deux rues sont correctement extraites par la méthode : les rues R2 et R4. En effet pour ces rues, les trois quarts des bords extraits sont positionnés à 1 pixel au plus des bords de référence. Par contre, pour les autres rues extraites, la méthode rencontre plus de difficultés pour extraire des bords bien ajustés.

Ainsi, si le bord gauche extrait de la rue R3 est positionné à 1 pixel au plus du bord de référence, les trois quarts de son bord droit extrait sont seulement placés à 2 pixels au plus du bord de référence et le quart restant l'est à 3 pixels au plus. La rue extraite R1 se comporte de la même façon. La rue de classe 1, quant à elle, place plus du quart de son bord gauche extrait à plus de 1 pixel du bord de référence et plus des trois quarts à 2 pixels au plus. Il n'en va pas de même pour son bord droit extrait : plus des trois quarts de celui-ci sont positionnés à plus de 2 pixels mais à 3 pixels au plus du bord de référence.

Ces taux d'erreur améliorent la compréhension des taux d'erreur obtenus sur la superficie de ces rues. Ainsi, si la superficie de la rue R2 n'est qu'à 10% de la superficie de référence, c'est parce que la méthode réussit à placer correctement les bords de cette rue. De même, si le taux d'erreur sur l'emprise de la rue R1 est si élevé, c'est parce que la méthode échoue à correctement placer ses bords.

Ces taux d'erreur permettent aussi de fixer les limites de la méthode quant à la précision obtenue sur l'extraction des bords des rues, de classes originelles 1, 2 et 3, représentées par une classe 4 sur une image panchromatique à 10 m de résolution spatiale. Ainsi, l'erreur de position des bords extraits est toujours de 2 pixels (*i.e.* identique aux résultats sur l'image à 2 m de résolution spatiale).

Nous allons maintenant chercher à comprendre pourquoi la méthode ne réussit pas à bien positionner les bords de ces rues. Pour cela, les droites de régression représentant les bords extraits de ces rues sont comparées aux droites de référence. Le tableau 5.8 synthétise les résultats de cette comparaison.

Tableau 5.8. Comparaison des bords extraits des rues de Jedda-SPOT aux références.

| | | $\Delta\theta$ | ΔL (m) | $\Delta P_{\text{déb}}$ (m) | ΔP_{fin} (m) |
|-----------|-------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| R* | bord gauche | 0.1 | -2.8 | 2.0 | 1.0 |
| | bord droit | 0.6 | -6.8 | 6.5 | 1.6 |
| R1 | bord gauche | 0.3 | -2.5 | -1.0 | -2.8 |
| | bord droit | 0.7 | -4.7 | 5.0 | 1.0 |
| R2 | bord gauche | -0.4 | 3.2 | -2.4 | -0.4 |
| | bord droit | -0.1 | 1.9 | -1.2 | -0.5 |
| R3 | bord gauche | -0.1 | -1.4 | 0.4 | 0.8 |
| | bord droit | -0.5 | 2.0 | -3.9 | -0.1 |
| R4 | bord gauche | -0.4 | -5.4 | -0.2 | 2.3 |
| | bord droit | -0.4 | -5.9 | -2.6 | -0.4 |

Le tableau 5.8 montre qu'une erreur importante est commise sur l'orientation des bords extraits (écart entre 0,3 et 0,7° en valeur absolue), excepté pour les bords gauches des rues R* et R3 et le bord droit de la rue R2 (écart = 0,1° en valeur absolue).

De plus, les points localisant le début des bords droits extraits sont placés à plus de 2 m (jusqu'à 6,5 m) des bords de référence, excepté pour le bord droit de la rue R2 qui est bien ajusté. Cependant, l'erreur commise sur l'orientation entraîne le rapprochement des bords droits extraits de leur référence. En effet, les points localisant la fin de ces bords sont situés à moins de 1,6 m des bords de référence. Ceci explique pourquoi les trois quarts des bords droits extraits sont à 3 pixels, voire à 2 pixels, au plus de leur référence (figure 5.8.b). Ce tableau montre également que même si une erreur est commise sur l'orientation des bords gauches extraits, ces bords restent situés à moins de 2,8 m de leur référence.

Ainsi, la méthode dépend fortement de l'estimation des points localisant le début et la fin des bords à extraire. En effet si ces points sont mal positionnés, l'erreur commise sur le point localisant le début des bords est soit :

- compensée par l'erreur commise sur l'orientation des bords, *i.e.* que les bords se rapprochent de leur référence,
- augmentée par l'erreur commise sur l'orientation des bords, *i.e.* que les bords s'éloignent encore plus de leur référence.

L'analyse du positionnement des rues, des classes originelles 1, 2 et 3, extraites de Jedda-SPOT comparée à celle obtenue pour les rues de classe 4 extraites de Jedda-KVR (figure 5.6 et tableau 5.4) montre que les résultats obtenus sont similaires. Ainsi, les bords extraits des rues de classe 4 se positionnent à 3 pixels, voire à 2 pixels, au plus de leur référence quelle que soit la résolution spatiale des images originales.

5.2. Nîmes

Sur l'image de Nîmes de résolution spatiale 0,83 m, nous avons choisi une route avec un terre-plein bien marqué surplombant une autoroute. Le terre-plein de cette autoroute ne correspond pas au modèle défini pour notre méthode d'extraction. En effet, celui-ci comprend une ligne plus sombre marquant l'axe de la rue et le milieu du terre-plein brillant.

La méthode d'extraction a été appliquée aux images originales dans les bandes multispectrales B1 et B3, en y ajustant la tolérance sur la largeur des routes à extraire. Nous noterons que les routes apparaissent plus sombres et que le contraste route-environnement est plus élevé sur l'image B3. Les bords et la caractéristique extraits de ces routes sont présentés sur la figure 5.9.

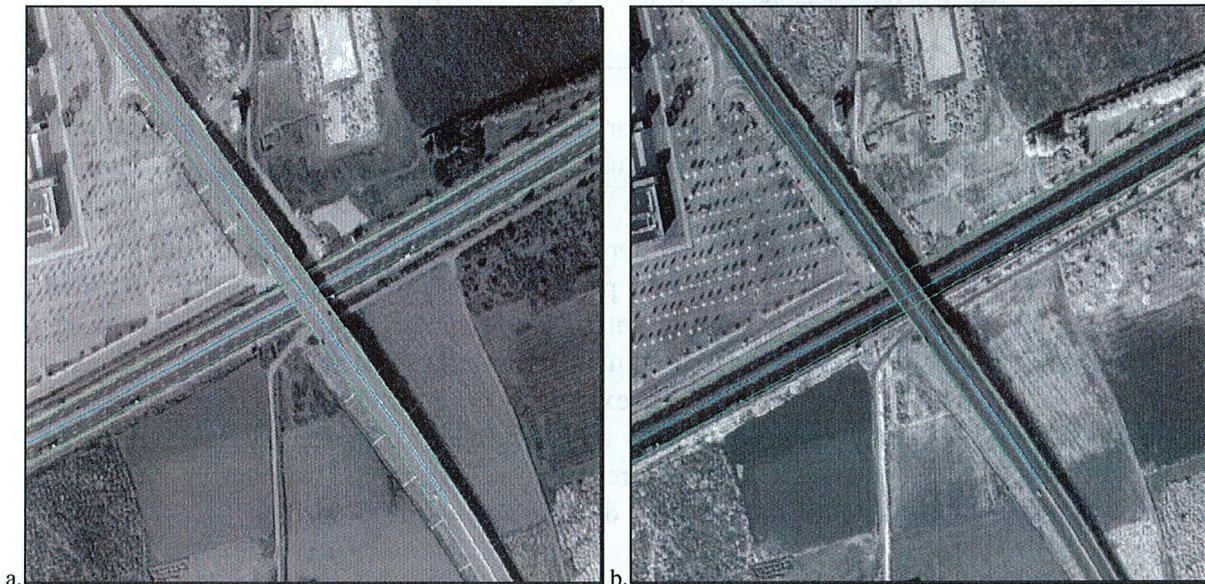


Figure 5.9. Routes extraites sur la bande B1 (a) et la bande B3 (b) de Nîmes à 0,83 m de résolution spatiale.

5.2.1. Analyse visuelle

L'analyse visuelle de ces résultats montre que le terre-plein central extrait de la route suit bien le terre-plein correspondant perceptible sur les images et ceci quelle que soit la bande multispectrale observée. Par contre, le terre-plein central extrait de l'autoroute ne se positionne pas exactement sur l'axe de l'autoroute. Elle se positionne sur l'un des deux côtés du terre-plein brillant (figures 5.9.a et 5.9.b). Ceci est dû à la manière dont le traitement de ce type de rue a été développé : l'algorithme recherche un maximum qui marque la position du terre-plein. Or ici, la position de l'axe de l'autoroute est marquée par un minimum entouré de deux maxima (figure 5.10) sur l'image $I_c^{(1)}$.

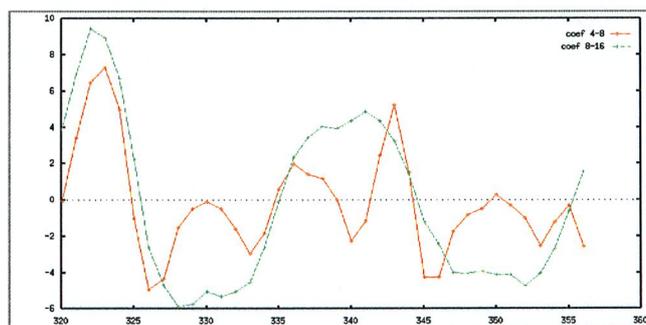


Figure 5.10. Profils transversaux locaux marquant une ligne de l'autoroute sur les images de coefficients d'ondelettes utilisés par le traitement développé pour ce type de rues.

Cette analyse montre également que les bords extraits de la route paraissent bien ajustés aux bords correspondants perceptibles sur les images. Par contre, il n'en va pas de même pour les bords extraits de l'autoroute. Ceux-ci sont décalés par rapport aux bords correspondants perceptibles dans les images, surtout dans leur partie centrale. Ce défaut est le résultat de l'existence de la légère courbure sur l'autoroute, alors que les bords, dans notre méthode, sont représentés par des droites.

5.2.2. Evaluation quantitative

Nous allons maintenant effectuer une analyse quantitative du positionnement des bords et des terre-pleins centraux extraits de nos routes selon l'approche proposée au §4.2. Pour cette analyse, des lignes de référence (bords et terre-pleins centraux) ont été réalisées par photo-interprétation (figure 5.11).

Comme ce travail a été effectué dans le cadre d'un contrat de recherche (Ranchin *et al.*, 1997), l'évaluation de la précision obtenue sur le positionnement des bords et des caractéristiques extraits des routes a été effectuée suivant le taux de réussite (= 1 - taux d'erreur), et non pas suivant le taux d'erreur, obtenu lors de la comparaison des points extraits des bords avec les bords de référence.

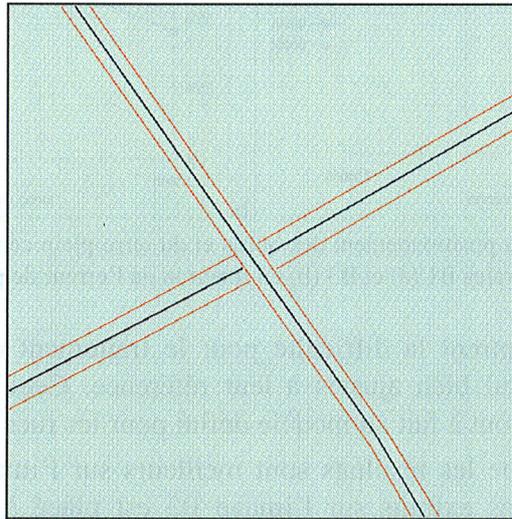


Figure 5.11. Lignes de référence des routes traitées par l'application de notre méthode d'extraction des rues (noir : terre-plein central ; rouge : bords)

Les taux de réussite du positionnement des bords et du terre-plein central extraits de la route sont résumés dans la figure 5.12.

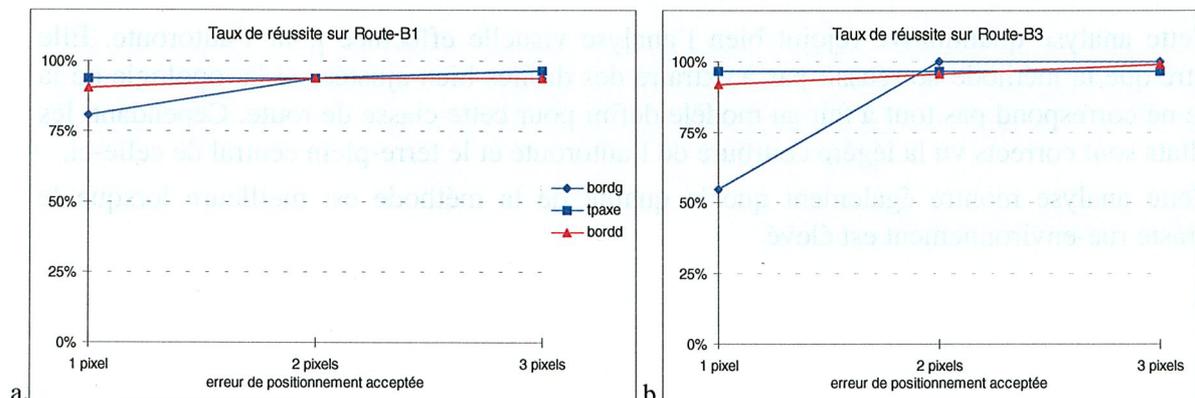


Figure 5.12. Taux de réussite du positionnement des bords et du terre-plein central de la route pour les bandes multispectrales B1 (a) et B3 (b) en fonction de l'erreur de positionnement acceptée.

La figure 5.12 montre que la quasi-totalité du terre-plein central extrait de la route est positionnée à 1 pixel au plus de sa référence quelle que soit la bande spectrale observée. Il en va de même pour les bords extraits de cette route. Mais, moins de la moitié du bord gauche extrait sur l'image B3 (figure 5.9b) est localisée à plus de 1 pixel, mais à 2 pixels au plus, de sa référence.

Cette analyse quantitative confirme donc l'analyse visuelle. Elle montre que la méthode réussit à extraire correctement une route avec une topologie proche du modèle de rue des classes 2 ou 3 défini pour la méthode, et ceci quelle que soit la bande multispectrale utilisée pour l'image originale.

Les taux de réussite du positionnement des bords et du terre-plein central extraits de l'autoroute sont présentés dans la figure 5.13.

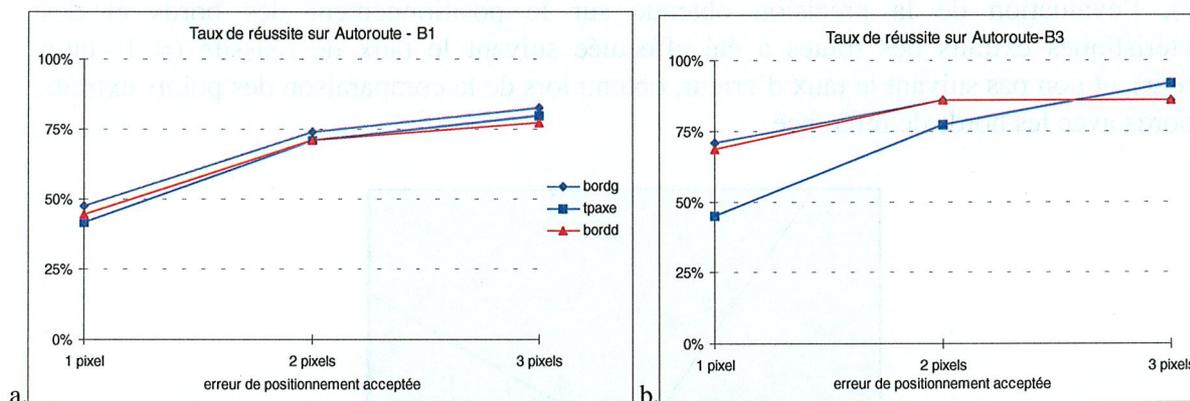


Figure 5.13. Taux de réussite du positionnement des bords et du terre-plein central extraits de l'autoroute pour les multispectrales B1 (a) et B3 (b) en fonction de l'erreur de positionnement acceptée.

Ces deux graphiques montrent la difficulté pour le traitement développé à extraire des bords et un terre-plein central bien ajustés à leur référence. Ceci est dû au fait que cette autoroute ne correspond pas tout à fait au modèle défini pour les rues de classe 2-3.

Ils montrent également que les résultats sont meilleurs sur l'image B3 (figure 5.9b). En effet, plus du quart des bords extraits sur l'image B3 est placé à plus de 1 pixel de leur référence avec plus des neuf dixièmes de ces bords placés à 2 pixels au plus de leur référence. Par contre, plus de la moitié des bords extraits de l'image B1 est placée à plus de 1 pixel de leur référence et les trois quarts, seulement, de ces bords le sont à 2 pixels au plus.

Pour le terre-plein central extrait, les résultats issus des deux bandes multispectrales sont similaires avec un léger mieux pour l'image B3.

Cette analyse quantitative rejoint bien l'analyse visuelle effectuée pour l'autoroute. Elle montre que la méthode ne réussit pas à extraire des droites bien ajustées si la topologie de la route ne correspond pas tout à fait au modèle défini pour cette classe de route. Cependant, les résultats sont corrects vu la légère courbure de l'autoroute et le terre-plein central de celle-ci.

Cette analyse montre également que la qualité de la méthode est meilleure lorsque le contraste rue-environnement est élevé.

5.3. Nancy

Sur l'image de Nancy à 1,67 m de résolution spatiale, nous avons choisi un extrait se situant dans la ville de Nancy et comprenant différentes rues de classe 4. Notre méthode d'extraction de rues a été appliquée sur cet extrait pour le panchromatique (figure 5.14a) et la bande multispectrale B3 (figure 5.14b). La tolérance sur la largeur des rues à extraire a été ajustée aux cas étudiés avant d'appliquer notre méthode d'extraction. Cette étude a été également effectuée dans le cadre du même contrat que l'étude sur Nîmes (Ranchin *et al.*, 1997).

5.3.1. Analyse visuelle

Nous pouvons noter que les bords extraits des rues de classe 4 semblent bien suivre les bords correspondants perceptibles sur les images, et ceci quelle que soit la bande spectrale observée.

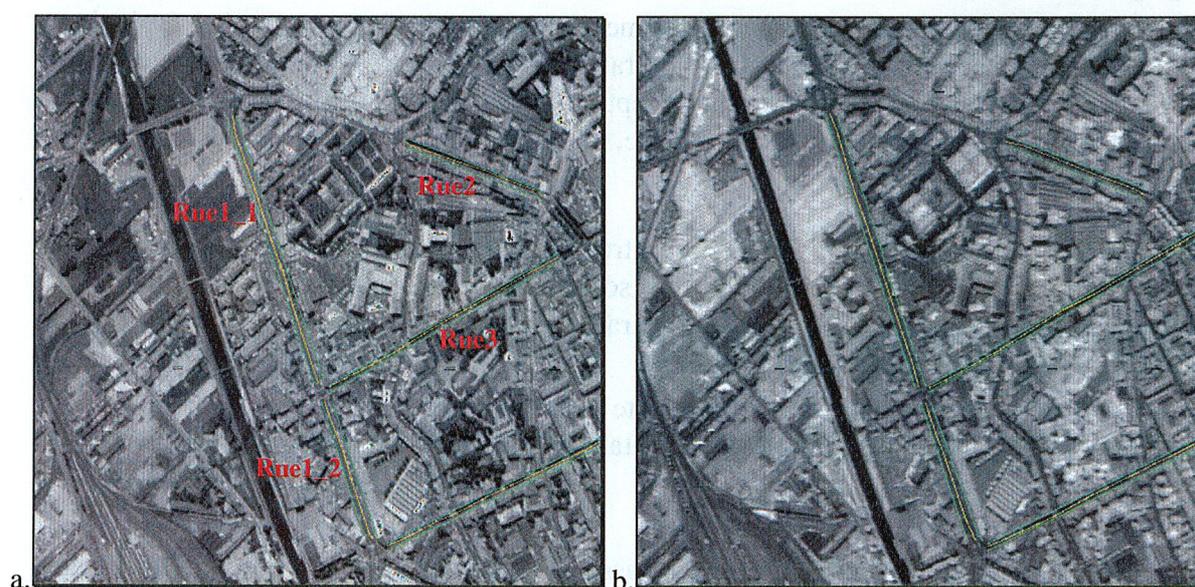


Figure 5.14. Rues extraites sur le panchromatique(a) et la bande multispectrale B3 (b) de Nancy à 1,67m.

5.3.2. Evaluation quantitative

Nous allons maintenant évaluer quantitativement les résultats sur ces différentes images. Les lignes de référence marquant les bords des rues considérées ont été créées par photo-interprétation.

Le positionnement des bords extraits de Rue1_1, Rue1_2 (figure 5.15), Rue2 et Rue3 (figure 5.16) a été comparé à celui des références pour les trois erreurs de positionnement acceptées.

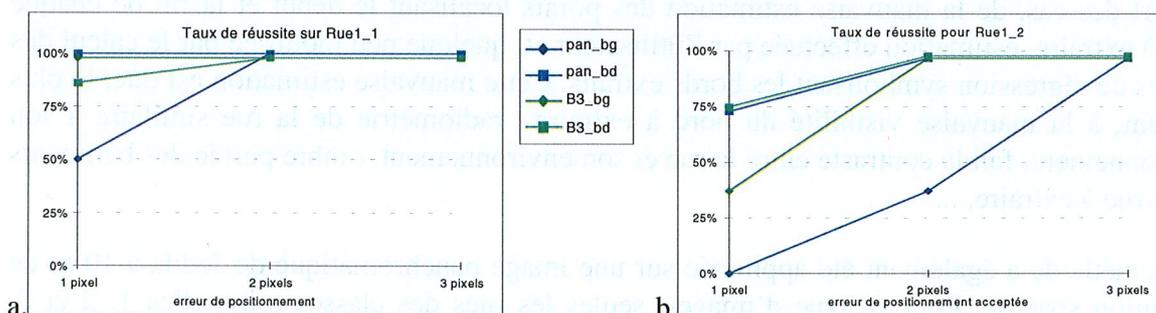


Figure 5.15. Taux de réussite du positionnement des bords extraits de Rue1_1 (a), Rue1_2 (b) de Nancy pour le panchromatique et la bande multispectrale B3.

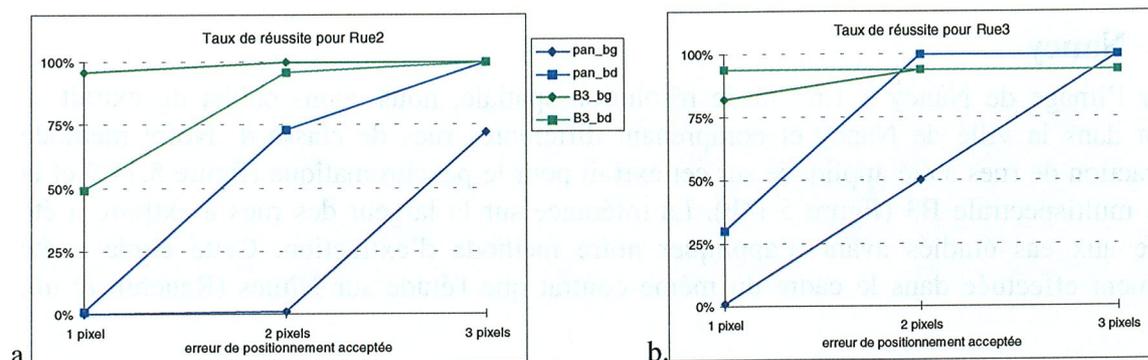


Figure 5.16. Taux de réussite du positionnement des bords extraits de Rue2 (a) et Rue3 (b) de Nancy pour le panchromatique et la bande multispectrale B3.

Les figures 5.15 et 5.16 montre que les résultats sont meilleurs pour l'image B3 que pour l'image panchromatique.

Dans la majorité des cas, plus des neuf dixièmes des bords extraits sont placés à 2 pixels au plus de leur référence. Seuls les bords droits extraits de Rue2 et Rue3 et le bord gauche extrait de Rue2 sur l'image panchromatique font exception. Mais si plus du quart de bord droit de Rue2 est placé à plus de 3 pixels de sa référence, la totalité des deux autres bords est placée à 3 pixels au plus de leur référence.

En fait, ces résultats sont similaires à ceux trouvés pour les rues de classe 4 extraites de Jedda-KVR et Jedda-SPOT. Ainsi quelle que soit l'image originale (*i.e.* quelle que soit la résolution spatiale ou spectrale), la méthode extrait de manière similaire les bords des rues de classe 4.

Nous noterons également que si le contraste rue-environnement est élevé, comme pour l'image B3 (figure 5.14b) par exemple, les résultats sont de meilleure qualité.

5.4. Conclusions

Notre méthode d'extraction de différentes classes de rues a été développée pour des images panchromatiques à 2 m de résolution spatiale avec des rues de topologie connue *a priori*.

Cette méthode a été appliquée pour extraire des rues de différentes classes sur une image panchromatique de Jedda à 2 m de résolution spatiale. L'analyse quantitative de cette méthode a montré que celle-ci réussit à extraire des caractéristiques (terre-pleins centraux et secondaires) des rues de classe 1 à 3 bien ajustés à leur référence. Mais, elle a montré également que la méthode rencontre plus de difficultés pour positionner correctement les bords des différentes rues. Dans la majorité des cas, ceux-ci sont placés à 2 pixels, voire à 3 pixels, au plus de leur référence.

Les rues de classe 4 sont plus difficiles à extraire essentiellement à cause du faible contraste existant entre les rues et leur environnement. Ces difficultés proviennent, dans la plupart des cas, de la mauvaise estimation des points localisant le début et la fin de chaque bord à extraire, estimation effectuée par l'utilisateur et, quelque peu modifiée par le calcul des droites de régression symbolisant les bords extraits. Cette mauvaise estimation est due, le plus souvent, à la mauvaise visibilité du bord à extraire : radiométrie de la rue similaire à son environnement, faible contraste entre la rue et son environnement, ombre portée des bâtiments sur la rue à extraire, ...

La méthode a également été appliquée sur une image panchromatique de Jedda à 10 m de résolution spatiale. Pour ce type d'images, seules les rues des classes originelles 1, 2 et 3, représentées par une classe 4, peuvent être extraites. L'analyse a montré que la méthode

rencontre les mêmes difficultés à extraire des bords de ces rues bien ajustés que pour l'image à 2 m de résolution spatiale. Les résultats sont similaires pour les deux résolutions spatiales : les bords extraits des rues de cette classe de rues se positionnent à 3 pixels, voire à 2 pixels, au plus de leur référence.

Cette méthode a aussi été appliquée sur des images de plus haute résolution spatiale (0,83 m et 1,67 m) et de résolution spectrale différente (canal panchromatique et bandes multispectrales XS1 et XS3 de SPOT). Sur ces images, des routes avec une topologie proche et/ou similaire au modèle des rues de classe 2-3 et des rues de classe 4 sont présentes.

L'évaluation de ces applications a montré que les résultats sont très bons dans le cas des routes similaires aux rues de classe 2-3, même si une légère courbure d'une des routes extraites entraîne des résultats légèrement inférieurs. En effet, les bords et caractéristiques extraits des rues de cette classe se positionnent à 1 pixel, voire à 2 pixels, au plus de leur référence.

Pour les rues extraites de classe 4, les résultats sont similaires à ceux trouvés pour les rues de classe 4 extraites sur l'image panchromatique de Jedda à 2 m de résolution spatiale.

Ainsi, quelle que soit la résolution spatiale et quelle que soit la résolution spectrale de l'image originale, la méthode extrait de manière similaire les bords et les caractéristiques des différentes classes de rues représentées sur cette image.

Aussi, dans l'état actuel de la méthode, celle-ci pourrait être utilisée pour créer des plans de villes à 1 : 10 000 pour tout ce qui concerne les caractéristiques des rues, mais seulement 1 : 80 000 pour tout ce qui concerne les bords des rues pour une image à 2 m de résolution spatiale.

Cette évaluation a également démontré l'apport du multispectral pour extraire les rues de différentes classes. En effet, si le contraste rue-environnement est élevé (comme pour une image multispectrale B3), la méthode donne de meilleurs résultats.

Chapitre 6

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Chapitre 6

Conclusions et Perspectives

L'objectif de notre étude était de rechercher un ensemble de traitements numériques pour extraire le réseau routier en milieu urbain à partir d'images de télédétection. La résolution spatiale de ces images est comprise entre 0,8 m (aériennes) et 10 m (satellites - canal panchromatique de SPOT 1-3). L'objectif de ces traitements est d'apporter une aide aux photo-interprètes dans leurs travaux de cartographie du milieu urbain, par l'automatisation partielle des tâches.

Notre étude s'est placée dans le cas le plus simple, c'est-à-dire sur des villes avec de larges structures urbaines et un réseau routier quadrangulaire.

L'étude bibliographique que nous avons effectuée a permis de bien cerner les différentes difficultés rencontrées lors de l'extraction du réseau routier à partir des images de télédétection. Cette étude a également mis en évidence la nécessité d'établir un modèle des objets urbains à détecter en tout premier lieu. Elle a également mis en avant des approches intéressantes pour notre étude : le traitement multispectral, mais surtout le traitement multirésolution.

Au regard de cette étude bibliographique et de l'analyse de nos données sur la ville-test de Jeddah (Arabie Saoudite), nous avons commencé par définir des modèles des différentes classes de rues et du réseau routier urbain étudié. Le modèle de «rues» est bien explicite : il est basé sur des propriétés identiques de géométrie, de radiométrie et de typologie des différentes rues. Par contre, le modèle du «réseau routier», basé sur des propriétés de connexion simplifiée et de hiérarchie, est simple et actuellement incomplet. Grâce à ces modèles, il est plus facile, d'une part, d'établir la stratégie adéquate pour extraire, semi-automatiquement, le réseau routier urbain de manière hiérarchique à partir d'images satellitaires de haute résolution spatiale et, d'autre part, de comprendre les erreurs et d'améliorer les algorithmes. De plus, le modèle des rues de classe 2-3 et de classe 4 se retrouve en fait pour de nombreux cas : routes, autoroutes ou grandes avenues des villes avec un terre-plein central et rues ou routes à simple voie. Notre modèle de «rues» est adaptable à ces différents cas puisqu'il n'y a aucune contrainte sur la largeur de ces rues.

Nous avons noté, suite à l'étude bibliographique et à l'analyse de nos données, l'intérêt de la multirésolution. En effet, ce traitement permet non seulement d'éliminer les petits détails superflus sur les objets urbains à détecter, mais également d'obtenir des informations différentes sur ces objets suivant la résolution spatiale de l'image observée. Ainsi, la multirésolution est un outil indispensable à ce genre d'application pour obtenir des algorithmes fiables et performants. La stratégie proposée est donc basée sur un traitement multirésolution des images.

Une nouvelle méthode a été développée selon cette stratégie. Cette méthode n'est que semi-automatique, comme la majorité des approches trouvées dans la littérature. Cette méthode est basée sur les deux outils mathématiques suivants : l'analyse multirésolution et la transformée en ondelettes. Ces deux outils permettent ainsi d'obtenir non seulement l'emprise des rues, puisque les bords des rues sont extraits des images, mais également leur typographie, par des traitements multirésolutions des données.

Pour rendre opérationnelle cette méthode, nous avons besoin de connaître ses limites d'utilisation. Aussi, nous avons défini la qualité des résultats produits, à l'aide de nouveaux critères quantitatifs basés sur l'emprise des rues, le positionnement de leurs bords et

caractéristiques, et de critères basés sur des indices de connectivité du réseau routier urbain. Nous avons créé la plupart de ces critères et trouvés les autres dans des articles.

La méthode a été appliquée, dans un premier temps, à l'image panchromatique (KVR) de Jedda à 2 m de résolution spatiale. Différentes classes de rues ont été ainsi extraites. L'analyse quantitative de cette application a montré que la méthode réussit à bien positionner les caractéristiques des rues, mais rencontre plus de difficultés pour bien positionner les bords de ces mêmes rues. Les rues de classe 4, possédant un plus faible contraste rue-environnement que les autres classes de rues dans l'image, sont plus difficiles à extraire correctement.

Les rues de classe 4 sont extraites avec une erreur de 2 à 3 pixels en position et les rues des autres classes avec une erreur de 1 à 2 pixels en position. Cette erreur de positionnement des bords est principalement due à la mauvaise estimation d'un ou des points localisant le début et la fin de ces bords. Or, il est parfois difficile de percevoir ces positions sur l'image à cause d'un faible contraste rue-environnement ou d'une radiométrie de l'environnement similaire à celle de la rue considérée. Ces perturbations interviennent également lors de l'extraction des points intermédiaires des bords.

Dans un deuxième temps, la méthode a été appliquée, sur le même quartier de Jedda, à une image panchromatique de 10 m de résolution spatiale (SPOT). L'évaluation de cette application a montré que les résultats pour les classes 1, 2 et 3 originelles, qui sont les seules à pouvoir être extraites de cette image, et, qui sont représentées par un modèle similaire à celui des rues de classe 4, sont similaires à ceux trouvés pour les rues de classe 4 extraites de Jedda-KVR.

Puis, dans un troisième temps, la méthode a été appliquée à des images aériennes multispectrales de 0,8 m et de 1,63 m de résolution spatiale. Sur ces images apparaissent des routes possédant des propriétés géométriques et topologiques similaires à celles définies par notre modèle et des propriétés radiométriques identiques. L'analyse de cette application a montré que la méthode ne rencontre aucune difficulté à extraire des rues de classe 2-3 bien ajustées à leur référence, excepté si une légère courbure existe sur la route à extraire, puisque celle-ci constitue un écart au modèle. Les routes de classe 2-3 sont ainsi extraites avec une erreur en position de 1 pixel. De plus, elle a également montré que les résultats pour les rues de classe 4 extraites sur ces images étaient similaires à ceux trouvés pour les deux autres applications.

Ainsi quelle que soit la résolution spatiale ou spectrale des images, la méthode extrait de manière similaire les différentes classes de rues. En effet quelle que soit l'image originale, l'emprise des rues est extraite avec une erreur en position de 1 pixel, voire 2 pixels, pour les rues de classe 1 à 3, et de 2 pixels, voire 3 pixels, pour les rues de classe 4. Les terre-pleins différenciant les rues de classe 1 à 3 sont, quant à eux, extraits avec une erreur en position de 1 pixel. Les résultats obtenus par l'application de notre méthode aux différents types d'images sont donc très bons. L'échelle cartographique associée est également facile à déterminer à partir de ces résultats quantitatifs et de la résolution spatiale de l'image originale, supposée correctement rectifiée.

De plus, la seule contrainte imposée à l'utilisateur pour pouvoir appliquer la méthode sur des images de différentes résolutions spatiales est d'adapter la tolérance acceptée par les algorithmes sur la largeur des rues/routes à extraire des images.

Par conséquent, l'objectif d'établir un traitement numérique générique est atteint.

La méthode, bien que semi-automatique, permet de traiter des images de grande taille avec un gain de temps indéniable par rapport à une photo-interprétation et donc un coût de traitement moins élevé. En effet, l'extraction du réseau routier urbain prend à un photo-interprète plus de 8 h par km² à partir d'une image de 2 m de résolution spatiale. Notre méthode, par l'automatisation partielle des tâches, permet de diminuer ce temps pour l'extraction d'un réseau routier à partir d'une image 1000x990 pixels (2 m de résolution spatiale) d'une ville d'environ 60%.

Le réseau routier extrait est sous forme vectorielle. Il peut être retracé sur l'image originale. Les erreurs en position des bords et caractéristiques des rues extraites peuvent alors être corrigées manuellement. Ces corrections permettront alors d'obtenir un plan du réseau routier urbain extrait avec une échelle plus grande.

L'objectif d'apporter une aide aux photo-interprètes par une automatisation partielle des tâches de cartographie est donc également atteint.

La méthode pourrait ainsi être utilisée pour des villes ou des pays où l'élaboration de campagnes de mesures-terrain pour aider le photo-interprète dans son travail de cartographie urbaine est difficile voire impossible, et où peu de moyens sont disponibles pour des campagnes de photographies aériennes, campagnes qui peuvent, par ailleurs, rencontrer de très fortes résistances administratives. En effet, notre méthode peut s'appliquer indifféremment aux images satellitaires de très haute résolution spatiale et aux images aériennes acquises sur des villes possédant un réseau routier urbain, et donc des classes de rues, similaire à nos modèles.

Les résultats de l'application de la méthode peuvent être facilement intégrés dans un système d'information géographique afin de remplacer les cartes topographiques actuelles par des images et des réseaux routiers numériques (Muller et Brackman, 1995). Ainsi ces résultats pourraient être utilisés dans un système d'aide à la navigation par exemple.

Ces résultats pourraient également servir à la mise à jour des réseaux routiers urbains déjà mis en place dans un système d'information géographique (Baumgartner *et al.*, 1996).

Des améliorations de la méthode amèneraient à des résultats de meilleure qualité, surtout pour l'extraction des bords. Ces améliorations devront porter sur le contraste rue-environnement, sur l'interaction homme-machine et sur une automatisation plus poussée.

L'utilisation d'un outil d'amélioration locale du contraste serait un atout indéniable. En effet le contraste rue-environnement étant plus élevé, l'utilisateur aurait moins de problèmes pour bien localiser les points positionnant le début et la fin des deux bords de la rue à extraire. Ainsi, l'estimation de l'orientation de la rue dans l'image deviendrait correcte. De même, l'extraction des points intermédiaires marquant les bords serait facilitée et ceux-ci seraient mieux ajustés à leur référence. De plus, les rues de classe 4 seraient beaucoup plus visibles sur l'image originale et également plus aisées à extraire. Pour cette amélioration locale du contraste, plusieurs méthodes existent dans la littérature telle que l'utilisation de la représentation multiéchelle des contours (Lu *et al.*, 1997) ou l'utilisation d'une transformée en ondelettes avec la création d'une ondelette-mère spécifique (Gruen et Li, 1995).

Le multispectral pourrait être également un atout puisque sur certaines bandes spectrales (SPOT-B3 par exemple), les contrastes route-environnement sont plus importants et les résultats sont de meilleure qualité.

L'interaction homme-machine pourrait être améliorée en demandant à l'utilisateur de ne marquer que les points localisant le début et la fin des rues ou de ne marquer que le début des rues et d'estimer leur orientation dans l'image. Un traitement pourrait alors se charger de trouver la classe de la rue ainsi marquée et les points localisant le début et la fin des bords à extraire. Cette amélioration de l'interaction homme-machine amène également à une automatisation accrue de la méthode.

Pour avoir un réseau routier plus complet, il sera nécessaire de prolonger les rues pour les rendre effectivement connexes. Pour cela, l'utilisation de la morphologie mathématique pourrait être envisagée, comme pour beaucoup de traitements trouvés dans la littérature. Cependant, comme les équations des droites sont connues, leur prolongement pourrait s'effectuer en cherchant les points d'intersection des différentes droites entre elles. De cette façon, on pourrait également tenir compte sans problème des rues qui ne se croisent pas à angle droit. De plus, la position des intersections serait connue. Il faudrait également indiquer la position des intersections qui ne sont pas effectives comme pour un rond-point ou pour une rue surélevée par rapport à l'autre par exemple.

Enfin, pour rendre notre méthode plus générique, il faudrait tenir compte des rues avec une topologie similaire mais avec une radiométrie inversée. En effet, à l'inverse du canal panchromatique, les rues paraissent plus claires que leur environnement sur certaines bandes spectrales. Les propriétés topologiques du modèle des "rues" devraient donc être étendues pour inclure les propriétés actuelles et leurs opposées. De plus, il faudrait également introduire la notion de courbure sur les rues, car le plan d'aménagement du réseau routier des villes n'est pas exclusivement constitué de rues rectilignes.

Bibliographie

Bibliographie

- Airault S. et Jamet O., 1994. Détection et restitution automatique du réseau routier sur images aériennes. In *Actes du AFCET, 10ème congrès de Reconnaissance de Formes et d'Intelligence Artificielle*, 1994.
- Airault S. et Jamet O., 1995-A. Détection et restitution automatique du réseau routier sur des images aériennes. *Traitement du signal*, vol. 12, n°2, 1995, pp. 189-200.
- Airault S., Ruskoné R., Guérin Ph. et Bordes G., 1995-B. Extraction du réseau routier sur images aériennes. In *Journées de recherche de l'IGN*, , mars 1995, pp. 9-14.
- Alparone L., Cappellini V., Giustino G. and Mecocci A., 1992. Road-like structure extraction in remotely-sensed imagery. In *Proceedings of the 12ème EARSeL Symposium : Remote sensing for monitoring the change environment of Europe (Peter Wingler Editor)*, 8-11 september 1992, pp. 131-136.
- Baumgartner A., Steger C., Wiedemann C., Mayer H., Eckstein W. and Ebner H., 1996. Update of roads in GIS from aerial imagery: verification and multiresolution extraction. *Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 31, part 3, 1996, pp. 53-58.
- Béguin H. et Thomas I., 1997. Morphologie du réseau de communication et localisations optimales d'activités. Quelle mesure pour exprimer la forme d'un réseau? *Cybergéo, Revue européenne de géographie*, n°26, avril 1997, 25 pages.
- Bhattacharya U. and Parui S.K., 1997. An improved backpropagation neural network for detection of road-like features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, n°16, 1997, pp. 3379-3394.
- Burt P.J. and Adelson E. H. 1983. The Laplacian pyramid as a compact image code. *IEEE Transactions on Communications*, 31, 4, pp. 532-540.
- Couloigner I., Ranchin T. et Wald L., 1996. Expérimentations préparatoires de SPOT 5-6 : Synthèse d'images multispectrales à haute résolution spatiale pour l'étude de la ville. *Rapport TM/96/R/03, Ecole des Mines de Paris*, mars 1996, 66 pages.
- Couloigner I., Ranchin T., Valtonen V.P. et Wald L., 1997. Apport de SPOT 5 à la cartographie urbaine. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n°145, 33-38, 1997.
- Couloigner I., Ranchin T., Valtonen V.P. et Wald L., 1998. Benefit of the future SPOT 5 and data fusion to urban mapping. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n°8, 1998, pp.1519-1532.
- Daubechies I. 1992. *Ten lectures on wavelets*. CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics 61, SIAM, Philadelphia, USA, 357 pages.
- de Keersmaecker M.L., 1989. Potentialités de la télédétection satellitaire pour l'étude de la structure interne des villes - Application au cas de Bruxelles. *Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain*, avril 1989.
- Destival I., 1987. Recherche automatique de réseaux linéaires sur des images SPOT. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 105, 1987, pp. 5-16.

- Dutilleux P. 1987. An implementation of the "algorithme à trous" to compute the wavelet transform. In *Actes du congrès ondelettes et méthodes temps-fréquence et espace des phases*, Marseille, 14-18 décembre 1987, Springer Verlag Editors, pp.298-304.
- Forster B.C., 1985. An examination of some problems and solutions in monitoring urban areas from satellite platforms. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, n°1, 1985, pp. 139-151.
- Garnesson P., Giraudon G. et Montesinos P., 1989. MESSIE : application à l'interprétation en imagerie aérienne. *Rapport de recherche INRIA n°1012*, mars 1989.
- Garnesson Ph., 1991. MESSIE : un système d'analyse de scène - Application à l'imagerie aérienne. *Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis*, juillet 1991, 225 pages.
- Gruen A. and Li H., 1995. Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 50, n°4, 1995, pp. 11-20.
- Heipke C., Steger C. and Multhammer R., 1996. A hierarchical approach to automatic road extraction from aerial imagery. In *Integrating photogrammetric techniques with scene analysis and machine vision II (D.M. McKeown and I.J. Dowman Editors), Proceedings of SPIE*, n°2486, 1996, pp. 222-231.
- Jedynak B., 1995. Modèles stochastiques et méthodes déterministes pour extraire les routes des images de la terre vue du ciel. *Thèse de Doctorat, Université de Paris Sud*, janvier 1995, 186 pages.
- Jedynak B., Geman D. et Gagalowicz A., 1991. Détection de réseaux routiers à partir des images du satellite SPOT. In *Actes du AFCET, 8^{ème} congrès de Reconnaissance de Formes et d'Intelligence Artificielle*, vol. 2, novembre 1991.
- Khatir L., 1988. Recherche d'algorithmes de localisation de routes dans les images satellites à haute résolution - Application à l'imagerie SPOT. *Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse*, juin 1988, 103 pages.
- Kuntzmann J., 1972. *Théorie des réseaux*. Dunod, Paris.
- Lu J., Healy D.M. Jr and Weaver J.B. 1997. Contrast enhancement of medical images using multiscale edge representation. To appear in *Optical Engineering, Special Issue on Adaptive Wavelet Transforms*.
- 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, 1989, pp. 674-693.
- Marshall C.W., 1971. *Applied graph theory*. Wiley-Interscience, New-York.
- Mayer H. and Steger C., 1996. A new approach for line extraction and its integration in a multiscale, multiabstraction-level road extraction system. In *IAPR TC7 workshop : methods for extraction and mapping buildings, roads and other man-made structures from images*, 1996.

- McKeown D.M. Jr and Denlinger J.L., 1988. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In *Proceedings of IEEE Computer Society Conference - Computer vision and pattern recognition (Ann Harbor, Michigan)*, 1988, pp. 662-672.
- Merlet N. et Zerubia J., 1993. Classical mechanics and roads detection in SPOT images. *Rapport de recherche de l'INRIA (programme 4)*, n° 1889, avril 1993, 52 pages.
- Merlet N. et Zerubia J., 1996. New prospects in line detection by dynamic programming. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 18, n°4, April 1996, pp. 426-430.
- Meyer Y. 1990. *Ondelettes et opérateurs 1: Ondelettes*. Hermann, Paris, France, 215 pages.
- Meyer Y. 1993. *Wavelets. Algorithms & Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics (S.I.A.M.), Philadelphia, PA, USA, 133 pages.
- Muller F. et Brackman P., 1997. Restitution de photographies satellitaires pour la création d'une banque de données topographiques. In *Actes des journées scientifiques - Télédétection des milieux urbains et périurbains*, Liège (Belgique), 2-5 octobre 1995. Ed. AUPELF-UREF, 1997, pp. 291-298.
- Musso and Vuchic, 1988. Characteristics of metro networks and methodology for their evaluation. *Transportation Research Record*, 1162, 1988, pp. 22-33.
- Neviata R. and Babu K.R., 1980. Linear feature extraction and description. *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 13, July 1980, pp. 257-269.
- Ranchin T., Sinègre L., Couloigner I. et Blanc P., 1997. Recherche de réseaux routiers en imagerie multisoctréale et multirésolution. *Rapport de recherche DRET/ARMINES PSTDM*, n°TM/97/R/20, décembre 1997, 85 pages.
- Serendero M.A., 1989. Extraction d'informations symboliques en imagerie SPOT : réseaux de communications et agglomérations. *Thèse de Doctorat, Université de Nice*, Décembre 1989, 160 pages.
- Véran J.P., 1993. Suivi de routes dans une image aérienne par filtrage de Kalman. *Rapport ENST Paris, département Signal et Images*, mars 1993, 30 pages.
- Vosselman G. and de Knecht J., 1995. Road tracing by profile matching and Kalman filter. In *Proceedings of Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images*, Birkhauser Verlag, pp. 265-274.
- Wang D., He D.C., Wang L. et Morin D., 1996. L'extraction du réseau routier urbain à partir d'images SPOT HRV. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, n°4, 827-833, 1996.
- Wang J. et Liu W., 1994. Road detection from multispectral satellite imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 20, n°2, march-avril 1994, pp. 180-191.
- Wang J.F. and Howarth P.J., 1987. Automated road network extraction from Landsat TM imagery. In *Proceedings of Annual ASPRS/ACSM Convention (Baltimore, MD)*, vol. 1, 1987, pp. 429-438.

Weber Ch., 1995. *Images satellitaires et milieu urbain*. (collection géomatique, Paris : Hermès), 1995, 185 pages.

Welch R., 1982. Spatial requirement for urban studies. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 3, 1982, pp. 139-146.

Annexes

Annexes

Annexe 1

Apport de SPOT 5 à la cartographie urbaine.
Couloigner *et al.*
Bulletin de la SFPT, n°145, pp.33-38, 1997.

Apport de SPOT 5 à la cartographie urbaine

COULOIGNER Isabelle, RANCHIN Thierry, VALTONEN Veli Pekka et WALD Lucien

Ecole des Mines de Paris - Centre d'Energétique - Groupe Télédétection & Modélisation

B.P. 207 - 06904 Sophia Antipolis cedex - France - Tél. : (33) (0)4 93 95 74 53 - Fax : (33) (0)4 93 95 75 35

e-mail : couloigner@cenerg.cma.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est de montrer l'apport de l'accroissement de la résolution, des données du futur SPOT 5 par rapport aux données de SPOT 1-3, à la cartographie urbaine. Deux analyses sont menées sur les images simulées de SPOT 5 et SPOT 1-3. Dans un premier temps, une analyse par photo-interprétation montre que plus la résolution est fine, plus les rues apparaissent nettes dans les images. Des rues plus étroites, qui n'apparaissaient pas sur les images de SPOT 1-3, deviennent visibles lorsque la résolution spatiale s'affine. Dans un deuxième temps, un processus semi-automatique de cartographie urbaine est appliqué aux images multi-bandes des simulations. Un squelette de la voirie urbaine est ainsi extrait à 10 et 20 m de résolution spatiale. Une évaluation de la superficie de la voirie sur ces "squelettes" est comparée à une superficie de référence. Cette comparaison quantitative montre que plus la résolution est fine et plus l'emprise de la voirie sur les "squelettes" est proche de la référence. Cette étude démontre que SPOT 5 apportera une nette amélioration à la cartographie urbaine.

mots-clés : SPOT 5, cartographie, voirie urbaine, évaluation.

Abstract

This study deals with the benefit for urban mapping which will result from the improved spatial resolution to be offered in future by SPOT 5, compared with current data from SPOT 1 to 3. Two analyses have been done using the simulated images for both SPOT 5 and SPOT 1-3 which are available for the city of Marseille, France. Firstly, pure photo-interpretation showed that the higher the resolution, the more roads are clearly defined in the images : narrower streets, indistinguishable on SPOT 1-3, become visible as resolution improves. Secondly, a semi-automatic process of urban mapping was applied to the simulated multi-bands images. A skeleton urban road network was extracted from images at both 10 and 20 m resolution. These skeletons were then compared quantitatively with the road network taken from accurate maps of the city. This demonstrated that the higher the resolution, the more closely the network derived from images approached the ground truth portrayed on the accurate maps. The study shows that SPOT 5 will bring a significant improvement to urban mapping, compared with the use of SPOT 1-3.

key-words : SPOT 5, mapping, urban road networks, assessment.

1. Introduction

La cartographie urbaine à partir des images satellitaires sera sans doute un marché porteur de l'observation de la Terre pour les prochaines décennies. En effet, de nombreux organismes envisagent de lancer des capteurs civils de résolution spatiale métrique, permettant ainsi une meilleure connaissance de la ville. Pour une telle application, il est nécessaire d'avoir une haute résolution spatiale pour obtenir une description précise des formes et des structures de la ville et une haute résolution spectrale pour discriminer les différents types de terrain. Pour les données de SPOT 1-3 (canal panchromatique à 10 m et canaux multi-bandes à 20 m), le compromis n'est pas satisfaisant. Ainsi, en général, seules les données du canal panchromatique sont utilisées pour la cartographie urbaine et la nature multi-bande des données n'est pas prise en compte. Mais, les données du futur satellite SPOT 5 répondent à ce problème. En effet, le futur SPOT 5 présentera des données multi-bandes, avec les mêmes bandes spectrales que celles de SPOT 1-3, à 10 m de résolution spatiale et des données panchromatiques à 5 m de

résolution spatiale (Baudoin *et al.*, 1996).

L'objectif de cet article est d'évaluer l'apport des données à haute résolution du futur satellite SPOT 5 à la cartographie urbaine. L'apport de SPOT 5 par rapport à SPOT 1-3 est mis en évidence par une méthodologie de cartographie urbaine éprouvée. Cette méthodologie semi-automatique, présentée dans la section 3, n'est pas adaptée à un capteur particulier. Elle a été mise en oeuvre sur des images issues du satellite SPOT et du capteur russe KVR-1000 dans le cadre de la cartographie urbaine (Ranchin & Wald, 1996).

Dans un premier temps, une analyse visuelle des données, présentée dans la section 5, est effectuée par photo-interprétation, afin d'évaluer l'apport de l'accroissement de la résolution spatiale à la cartographie urbaine. Dans un deuxième temps, la méthodologie de cartographie urbaine est appliquée sur les images multi-bandes des données simulées du futur SPOT 5 et de SPOT 1-3 (Pauc *et al.*, 1996). L'apport de l'accroissement de la résolution des données du futur SPOT 5, sections 4 et 5, est déterminé par la comparaison entre l'estimation de la superficie de la voirie sur les images provenant des données à 10 m de

COULOIGNER *et al.*, 13/11/96, 1

Manuscrit reçu à la S.F.P.T. le 20 Juin 1996 ; acceptation après examen par le Comité de lecture le 16 Août 1996, et version finale reçue le 25 Novembre 1996.

résolution et celle des images issues des données à 20 m de résolution. Pour finir, nous concluons quant à l'apport des données du futur SPOT 5 à la cartographie urbaine.

2. Les données utilisées

La zone étudiée est le quartier du Vieux Port de Marseille (figure 1, p- 37) et couvre une région de 1x1,28 km².

Les données multi-bandes B1, B2 et B3 ont été acquises sur la ville de Marseille le 11 septembre 1993 à 15h20 TU par le capteur aéroporté R.A.M.I. (Radiomètre Aéroporté Multispectral Imageur) du CNES, dont le champ total de prise de vue est de 51°, avec une visée nadir (CNES, 1995). Les données spectrales sont similaires à celles des bandes XS1, XS2 et XS3 de SPOT 1-3. Ces données ont une résolution de 1,67 m lors de leur acquisition. Elles sont simulées numériquement :

- à une résolution spatiale de 10 m de type H1 (i.e. les canaux multi-bandes à 10 m et le canal panchromatique à 5 m de résolution) ;
- à une résolution spatiale de 20 m de type SPOT 1-3 (i.e. les canaux multi-bandes à 20 m et le canal panchromatique à 10 m de résolution).

La référence cartographique de cette zone de Marseille est fournie par des cartes sur papier au 1:2000 produites par la société ICOREM et mises à jour en mars 1996. Nous avons choisi cette échelle afin d'avoir la meilleure précision (précision à 2 mm près) possible sur l'emprise effective des rues. Cette société travaille en collaboration avec la ville de Marseille en lui fournissant des plans à grande échelle de la ville et de ses environs.

3. Méthodes numériques d'analyse et d'exploitation des données

Le processus de cartographie de la voirie urbaine se déroule en deux étapes : la détection de la voirie puis la cartographie de la voirie en elle-même.

3.1. La détection de la voirie urbaine

La détection recouvre la possibilité offerte au photo-interprète de repérer rapidement la voirie par des moyens semi-automatiques et de trouver un squelette incomplet de la voirie. Tout d'abord, une classification est effectuée à partir de l'arborescence hiérarchique ascendante des différentes classes présentes dans les images, arbre résultant de la classification par ascendance hiérarchique des canaux multi-bandes de notre zone d'étude (Albuisson, 1993). Cet arbre est alors interprété et permet de construire un masque contenant le réseau routier de la zone étudiée. Nous réitérons alors l'algorithme de classification sur les canaux multi-bandes ainsi masqués. Cette deuxième itération permet d'affiner le squelette de la voirie urbaine obtenue après l'interprétation visuelle de l'arbre hiérarchique et d'éliminer au maximum les pixels mal classés. Nous obtenons ainsi une image du squelette incomplet de la voirie urbaine à 10 m et à 20 m de résolution; ce squelette incomplet étant suffisant pour l'objectif

poursuivi, i.e. l'évaluation de l'accroissement de la résolution spatiale dans le cadre de la cartographie urbaine.

3.2. La cartographie de la voirie urbaine

La cartographie de la voirie urbaine consiste à approcher certains segments de rues par des rectangles sur les images du squelette de la voirie urbaine. Ces segments de rue sont assez larges pour être visibles sur les images à 10 m (figure 2, page 37) et à 20 m de résolution. La largeur des rectangles approchant ces segments de rue est ajustée visuellement à celle de l'emprise de la rue à cartographier sur l'image correspondante.



Figure 4. Squelette de la voirie à 20 m de résolution

Comme le squelette incomplet de la voirie urbaine à 20 m de résolution ne montre nettement que les grands axes du réseau routier de cette zone de Marseille, seules les rues de largeur supérieure à 15 m ont pu être mesurées. Comme les grands axes de la ville de Marseille sont orientés NW-SE, la plupart des segments cartographiés seront orientés de cette façon. Nous avons également choisi certaines rues parce qu'elles étaient bordées d'arbres, ce qui est généralement gênant lors des traitements numériques.

4. Méthodes d'évaluation et résultats

L'apport de l'accroissement de la résolution spatiale à la cartographie urbaine est évalué en deux étapes.

Dans un premier temps, une analyse visuelle des différentes images du quartier du Vieux Port de Marseille est effectuée par un photo-interprète qualifié. Ces comparaisons sont effectuées entre les canaux panchromatiques à 5 m et à 10 m (figure 3) et entre les compositions colorées des canaux multi-bandes à 10 m et à 20 m (figure 1, page 37). La comparaison porte sur la netteté des structures (organisation du système linéaire,

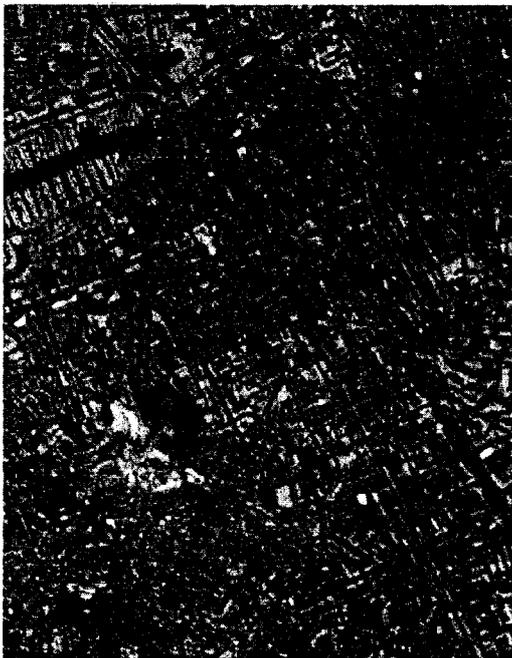
agencement des formes, ...) et des textures (taille des constructions, niveau de densité, ...) dans les images.

Dans un deuxième temps, une estimation de la superficie des segments de rue cartographiés a été effectuée sur les images du squelette de la voirie urbaine à 10 m et à 20 m de résolution spatiale. La comparaison des différentes superficies entre elles se fait par rapport à la superficie "exacte" de ces segments, superficies de référence mesurées sur les cartes au 1:2000 de la société ICOREM.

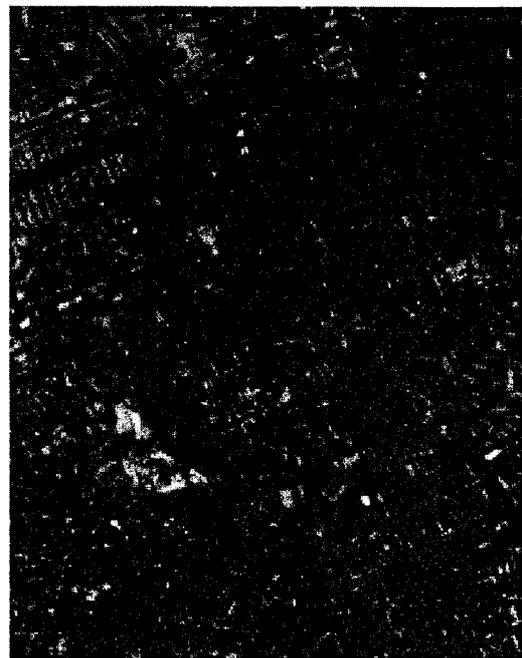
La superficie que couvrent les segments de rue cartographiés est estimée par la mesure à l'écran de la largeur et de la longueur du segment de rue considéré. Puis, l'erreur commise au niveau de l'estimation de la superficie du segment est calculée en prenant la différence, en valeur absolue, entre la superficie de

référence et la superficie estimée de ce segment. Cette erreur est mesurée relativement à la superficie de référence. Nous concluons alors quant à l'apport des futures données de SPOT 5 par rapport aux données simulées de SPOT 1-3 à la cartographie de la voirie urbaine.

Pour les données simulées de SPOT 1-3, les mesures effectuées sur les segments de rue cartographiés sur l'image du squelette de la voirie urbaine à 20 m de résolution spatiale (figure 4) sont résumées dans les tableaux I et II, et celles effectuées sur l'image du squelette de la voirie urbaine à 10 m de résolution spatiale (figure 2, page 37), *i.e.* pour les données simulées de SPOT 5, sont réunies dans les tableaux I et III.



(a) 5 m de résolution



(b) 10 m de résolution

Figure 3. Extrait du panchromatique simulé de Marseille pour SPOT 5 (a) et pour SPOT 1-3 (b) (CNES © 1993)

5. Analyse des résultats

5.1. comparaison visuelle

5.1.1. au niveau du panchromatique

A 10 m de résolution spatiale (figure 3.b), la voirie est observable à partir d'une largeur de 8-10 m autour du Vieux Port et d'une largeur de 14-16 m dans les quartiers plus denses (coin haut gauche de l'image). Autour de la colline de la basilique Notre Dame de la Garde (centre gauche de l'image), la vieille ville de Marseille montre des rues et des bâtiments plus difficiles à discriminer.

A 5 m de résolution spatiale (figure 3.a), la voirie est perçue en totalité autour du Vieux Port et cela quelles que soient la largeur, la longueur et l'orientation des rues. Dans les quartiers denses (coin haut gauche de l'image), les rues sont parfois visibles même lorsqu'elles ont une largeur inférieure à la taille du pixel (3-4 m), le seuil de perception dépendant de la direction du soleil,

de la taille des bâtiments et de la signature spectrale des objets environnants. La basilique et les rues de largeur excédant 8-10 m autour de la colline commencent à être visibles.

Ainsi, les structures (voirie, bâtiments) sont mieux définies sur le panchromatique issu des données simulées du futur SPOT 5 que sur celui provenant des données simulées de SPOT 1-3. En effet, la description des transitions existant entre la voirie et son environnement est plus précise à 5 m qu'à 10 m de résolution spatiale.

5.1.2. au niveau de la composition colorée

La composition colorée des canaux multi-bandes permet de différencier la végétation des différentes constructions afin de renseigner l'interprète sur les différents tissus urbains existant dans la ville.

A 20 m de résolution spatiale (figure 1.b, p- 37), seuls les grands axes de la voirie (rues de largeur supérieure à 16 m) sont identifiables. La résolution

spatiale de cette image ne permet pas de percevoir les détails ponctuels existant dans la ville.

A 10 m de résolution spatiale (figure 1.a, p. 37), les rues dont la largeur excède 8-10 m sont visibles (comme pour le panchromatique de SPOT 1-3) dans l'image. Les différents tissus urbains présents y sont bien délimités et les détails de la voirie apparaissent : arbres le long de certaines rues, ombre, asphalte, ...

Ainsi, les structures (voirie, tissus urbains) sont mieux définies sur l'image multi-bande issue des données simulées du futur SPOT 5 que sur celle provenant des données simulées de SPOT 1-3. De plus, l'identification de la voirie urbaine est facilitée avec les données simulées du futur SPOT 5 par rapport à celles de SPOT 1-3.

5.1.3. conclusion

Pour le photo-interprète, la comparaison des données simulées du futur SPOT 5 avec celles de SPOT 1-3 montre l'apport de l'accroissement de la résolution spatiale à la cartographie urbaine. En effet, les structures (voirie, bâtiments, tissus urbains) sont mieux définies avec les images issues des données simulées du futur SPOT 5. Les transitions existant entre la voirie et son environnement sont également plus précises, que ce soit sur l'image panchromatique ou sur l'image multi-bande.

Les données simulées du futur SPOT 5 permettent une cartographie urbaine plus pertinente que celle issue des données simulées de SPOT 1-3.

Tableau I. Mesures des segments de référence et estimés à 10 et à 20 m de résolution

| | | longueur (m) | | largeur (m) | | superficie (m2) | |
|------------------|-----------|--------------|----------------|-------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | référence | estimée - réf. | référence | estimée - réf. | référence | estimée - réf. |
| Lieutaud | référence | 518 | | 20 | | 10360 | |
| | 10 m | 524 | 6 | 20 | 0 | 10479 | 119 |
| | 20 m | 502 | -16 | 20 | 0 | 10032 | -328 |
| Notre Dame | référence | 462 | | 20 | | 9240 | |
| | 10 m | 470 | 8 | 20 | 0 | 9391 | 151 |
| | 20 m | 492 | 30 | 20 | 0 | 9839 | 599 |
| les 3 Barthélémy | référence | 305 | | 16 | | 4880 | |
| | 10 m | 294 | -11 | 20 | 4 | 5882 | 1002 |
| | 20 m | 284 | -21 | 20 | 4 | 5685 | 805 |
| Chave | référence | 298 | | 24 | | 7152 | |
| | 10 m | 320 | 22 | 20 | -4 | 6403 | -749 |
| | 20 m | 330 | 32 | 20 | -4 | 6597 | -555 |
| Baille | référence | 290 | | 30 | | 8700 | |
| | 10 m | 308 | 18 | 30 | 0 | 9242 | 542 |
| | 20 m | 312 | 22 | 20 | -10 | 6248 | -2452 |
| Lieutaud2 | référence | 203 | | 20 | | 4060 | |
| | 10 m | 208 | 5 | 20 | 0 | 4162 | 102 |
| | 20 m | 213 | 10 | 20 | 0 | 4252 | 192 |
| Prado | référence | 227 | | 60 | | 13620 | |
| | 10 m | 241 | 14 | 60 | 0 | 14450 | 830 |
| | 20 m | 244 | 17 | 60 | 0 | 14648 | 1028 |
| Puget | référence | 252 | | 28 | | 7056 | |
| | 10 m | 244 | -8 | 30 | 2 | 7305 | 249 |
| | 20 m | 224 | -28 | 40 | 12 | 8944 | 1888 |

5.2. comparaison de la superficie de la voirie urbaine

5.2.1. mesures à 20 m de résolution spatiale

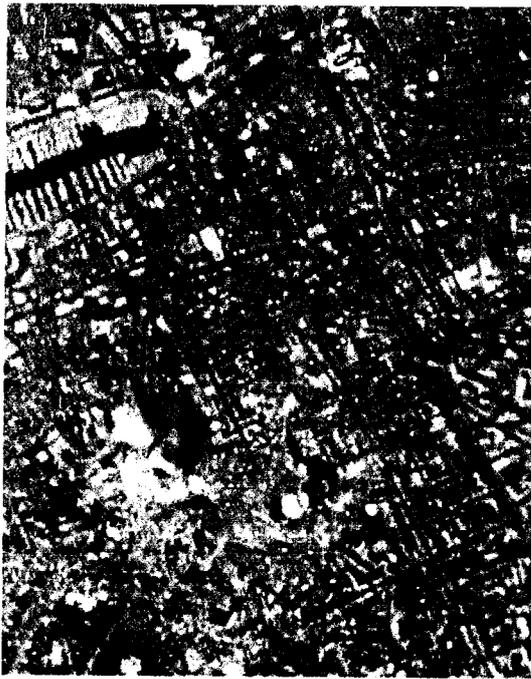
L'analyse du tableau II entraîne deux observations :

- si aucune erreur n'est commise sur la mesure de la largeur, l'erreur sur l'estimation de la superficie du segment de rue cartographié varie entre 3 et 8% ; l'estimation de la superficie de la voirie est donc relativement correcte. Dans ce cas, l'erreur sur la superficie est due à la difficulté de visualiser les deux extrémités du segment à mesurer. Cette longueur est estimée avec une erreur de 1 à 1,5 pixels, ce qui entraîne une erreur de ± 30 m sur la longueur du segment à la résolution de 20 m.

- si une erreur est commise sur l'estimation de la largeur, l'erreur sur la superficie des segments cartographiés est alors comprise entre 8 et 28%, et devient non négligeable. L'erreur commise sur la longueur des segments est le résultat de la même difficulté que précédemment. L'erreur sur la superficie est due majoritairement au taux d'erreur sur la largeur. En effet, ce dernier est compris entre 17 et 43%. Ces erreurs sont commises sur les segments de rue dont la largeur de référence n'est pas un multiple de la résolution de l'image du squelette de la voirie urbaine, i.e. 20 m. Il s'agit des quatre rues : les 3 Barthélémy (16 m), Chave (24 m), Baille (30 m) et Puget (28 m).

Tableau II. Taux d'erreur entre mesures de référence et mesures estimées à 20 m

| | Lieutaud | Notre Dame | les 3 Barthélémy | Chave | Baille | Lieutaud2 | Prado | Puget |
|------------|----------|------------|------------------|-------|--------|-----------|-------|-------|
| longueur | 3% | 6% | 7% | 11% | 8% | 5% | 8% | 11% |
| largeur | 0% | 0% | 25% | 17% | 33% | 0% | 0% | 43% |
| superficie | 3% | 6% | 16% | 8% | 28% | 5% | 8% | 27% |



(a) à 10 m de résolution



(b) à 20 m de résolution

Figure 1. Composition colorée des canaux multi-bandes simulés (avec R < XS3, V < XS2 et B < XS1) de l'extrait de Marseille pour le futur SPOT 5 (a) et pour SPOT 1-3 (b) (CNES © 1993)



légende :

- cours P. Puget
- avenue du Prado
- cours Lieutaud (2)
- boulevard Baille
- boulevard Chave
- rue des 3 Barthélémy
- boulevard Notre Dame
- cours Lieutaud

Figure 2. Squelette de la voirie urbaine à 10 m de résolution - Segments de rue cartographiés utilisés dans l'évaluation de la superficie de la voirie urbaine

5.2.2. mesures à 10 m de résolution spatiale

L'analyse du tableau III permet de dégager les deux mêmes observations que précédemment :

- lorsqu'il n'y a aucune erreur sur la mesure de la largeur des segments de rue cartographiés, l'erreur sur la superficie de ces segments varie entre 1 et 6%. Cette erreur est donc relativement faible et l'estimation de la superficie de la voirie est proche de la superficie de référence.

- lorsqu'il y a erreur au niveau de la largeur des segments de rue cartographiés, la superficie de ces segments est calculée avec une erreur comprise entre 4% et 21%. Elle est due à l'accumulation des erreurs sur les mesures de longueur et de largeur de ces segments avec une prépondérance à l'erreur sur la mesure de largeur (7 à 25%). Il s'agit des rues Puget, Chave et les 3 Barthélémy dont la largeur de référence n'est pas un multiple de la résolution (10 m) de notre image.

Tableau III. Taux d'erreur entre mesures de référence et mesures estimées à 10 m

| | Lieutaud | Notre Dame | les 3 Barthélémy | Chave | Baille | Lieutaud2 | Prado | Puget |
|------------|----------|------------|------------------|-------|--------|-----------|-------|-------|
| longueur | 1% | 2% | 4% | 7% | 6% | 3% | 6% | 3% |
| largeur | 0% | 0% | 25% | 17% | 0% | 0% | 0% | 7% |
| superficie | 1% | 2% | 21% | 10% | 6% | 3% | 6% | 4% |

5.2.3. conclusion

Nous remarquons, en comparant les tableaux II et III que la plupart des surfaces estimées sont plus proches des surfaces de référence pour les données issues de SPOT 5 que pour celles provenant de SPOT 1-3. Seuls deux cas (les 3 Barthélémy et Chave) présentent des surfaces plus proches des références à 20 m qu'à 10 m de résolution spatiale. En effet, l'erreur effectuée au niveau de la largeur est très forte (17% et 25%) par rapport à celle effectuée sur la longueur (4 à 11%). De plus, l'erreur commise sur la largeur est la principale responsable de l'erreur commise sur la superficie des deux segments de rue.

Cependant, l'analyse du tableau I des mesures estimées pour les différentes résolutions spatiales montre que la différence entre les superficies estimées à 10 et 20 m de résolution n'est pas aussi importante dans tous les cas. En effet, cette différence est inférieure à 3% dans trois cas (Prado, Lieutaud2 et Chave) et à 5% pour les segments de rue Notre Dame, Lieutaud et les 3 Barthélémy. Ce qui représente une erreur de superficie avec les superficies de référence comprise entre 90 et 448 m², ce qui est assez faible. Seuls deux cas présentent une grande différence entre les superficies estimées à 10 et 20 m de résolution : Puget et Baille. Ceci s'explique par le fait que le taux d'erreur sur l'estimation de la largeur subit une baisse très importante (de 43 à 7% pour Puget et de 33 à 0% pour Baille). Pour ces deux cas, la largeur devient très proche de la largeur exacte de la rue, i.e. 30 m.

Nous en concluons donc que les mesures de la superficie de la voirie sont généralement plus précises pour les images à 10 m de résolution spatiale que pour les images à 20 m de résolution spatiale, puisque la visibilité des extrémités des segments est plus nette à 10 m qu'à 20 m. Et lorsque la largeur des segments de rue est multiple, ou très proche, de 10 m, sans l'être de 20 m, cette différence de précision s'accroît encore.

6. Conclusion

Cette étude démontre que l'accroissement de la résolution est un atout pour la cartographie de la voirie urbaine. En effet, la cartographie est d'une part plus riche et d'autre part plus précise lorsque les résultats

sont issus des données simulées du futur SPOT 5 que lorsqu'ils proviennent des données simulées de SPOT 1-3. La composition colorée à 10 m de résolution permet de visualiser les routes dont la largeur est supérieure à 6-8 m, alors que sur celle à 20 m, les routes ne sont perceptibles qu'à partir de 14-16 m. De plus, l'analyse visuelle des données issues de SPOT 5 est plus aisée que celle des données provenant de SPOT 1-3. Il sera donc plus confortable de travailler avec les images du futur SPOT 5 dans le cadre de la cartographie urbaine.

Comme pour le satellite SPOT 1-3, des traitements supplémentaires sont possibles et permettraient, par fusion de données, d'obtenir des images multi-bandes avec la meilleure résolution spatiale disponible (5 m) dans le jeu d'images de SPOT 5 (Mangolini *et al.*, 1993). Une cartographie de la voirie urbaine plus précise serait ainsi créée.

Remerciement

Ce travail a été réalisé avec le soutien du CNES dans le cadre de la préparation des utilisations des données du futur SPOT 5.

Références

- Albuisson M. (1993) Codage trichrome et classification. In *Actes du colloque de Toulouse. Outils micro-informatiques et télédétection de l'UREF, 13-16 novembre 1990, Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy (Québec)*, pp. 167-173.
- Baudoin A., Fratter C. & Munier Ph. (1996) Le programme SPOT 5 et la préparation des utilisations. *Bulletin de la S.F.P.T.* 141, pp. 9-21.
- C.N.E.S. (1995) Chap. 4 : Moyens de simulation. In *Catalogue Simulations SPOT 5*, pp. 13-19.
- Mangolini M., Ranchin T. & Wald L. (1993) Fusion d'images SPOT multispectrales (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. *De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS, Cépaduès-Éditions*, 574 pages, pp. 199-209.
- Pauc G., Latry Ch., Pasquet A. & Breton E. (1996) Pourquoi et comment simuler des images SPOT 5. *Bulletin de la S.F.P.T.* 141, pp. 22-27.
- Ranchin T. & Wald L. (1996) Benefits of fusion of high spatial and spectral resolutions images for urban mapping. To appear in *Proc. of the 26th International Symposium on Remote Sensing of Environment and the 18th Annual Symposium of the Canadian Remote Sensing Society*, Vancouver, British Columbia, Canada, March 25-29, 1996, pp. 262-265.

Annexe 2

Benefit of the future SPOT 5 and of data fusion to urban mapping.

Couloigner *et al.*

International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n°8, 1998,
pp.1519-1532.

Benefit of the future SPOT-5 and of data fusion to urban roads mapping

I. COULOIGNER†, T. RANCHIN†, V. P. VALTONEN‡* and L. WALD†

†Ecole des Mines de Paris, Centre d'Energétique, Groupe Télédétection & Modélisation, rue Claude Daunesse—B.P. 207—F. 06904 Sophia Antipolis Cedex—France

‡Aerial Photography Section, Topographic service, Pasila Office Center, PB 60—FIN. 00521 Helsinki, Finland

(Received 3 October 1996; in final form 9 October 1997)

Abstract. This article deals with the contribution of both the future SPOT-5 (which will produce images with the same bands as the existing SPOT 1–3 ones but with an improved spatial resolution) and a sensor fusion method to urban mapping. The ARSIS concept (in French: *Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures*) is used for sensor fusion. It allows the improvement of spatial resolution of the multi-band images, while preserving spectral information, by use of the high frequencies of panchromatic images. A well-proven method for urban mapping is then applied to all multi-spectral images available in the context of the study. A photo-interpretation of the latter confirms the benefit of fine image resolutions to urban roads mapping, in the limit of the sensor studied here. Then, when comparing the roads surface at all resolutions with reference extracted from accurate maps of the city, we demonstrate quantitatively that the finer the resolution, the more accurate the cartography.

1. Introduction

Urban mapping by means of satellite images is a promising market for Earth observation in the next decade. For such application, on the one hand, a high spatial resolution is necessary for an accurate description of the forms and structures within the cities. On the other hand, the different types of land use are better mapped if high spectral resolution images are available. Thus it is necessary to have both high resolutions for a better knowledge of urban areas. However, at present there is not such an operational system. One of the few solutions to this problem is the future SPOT-5 satellite from CNES—the French Spatial Agency. This satellite will produce images with the same spectral bands as the existing HRV sensors of SPOT-1–3 but with an improved spatial resolution (Baudoin *et al.* 1996): the panchromatic band of the future SPOT-5 satellite will provide an image with a spatial resolution of 5 m and the multi-spectral bands, B1, B2 and B3 (similar to XS1, XS2 and XS3) with a spatial resolution of 10 m.

This article focuses on the mapping of urban roads network. It deals firstly with the contribution of the SPOT-5 imagery compared with the SPOT-1–3 one and secondly with the benefit of a sensor fusion method applied to both SPOT-5 and SPOT-1–3. It is proposed to use the ARSIS concept (in French: *Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures*) for sensor fusion. This concept, pre-

sented shortly in section 3, allows the improvement, in a set of images with different spatial and spectral resolutions, of the images with the lower spatial resolution up to the best spatial resolution available in this set. In order to assess precisely the benefit of SPOT-5 and of the sensor fusion to urban roads mapping, an already proven method for the mapping of urban roads has been selected. Indeed, this semi-automatic method, presented in section 4, is not associated with any particular sensor.

The contribution of finer and finer spatial resolution to urban roads mapping is discussed according to two points of view. In the same way, the contribution of the ARSIS concept to the transitions between roads and their surroundings is shown. Firstly, a photo-interpreter has made a visual analysis (section 5.2) of all images available. He has compared, on the one hand, the SPOT-5 images with the SPOT-1-3 ones and with the SPOT-5 ARSIS ones, and, on the other hand, the SPOT-1-3 images with the SPOT-1-3 ARSIS ones. The parameters used in this assessment are the geometry of the structures and the local contrast which allows a distinction to be made between two different areas. Secondly, an application of the urban roads mapping method to the SPOT imagery and ARSIS data is discussed in section 5.3. The extracted urban roads are quantitatively compared to references extracted from accurate maps of the city (section 4.2). To conclude, we discuss the contribution of high spatial resolution to urban roads mapping.

2. The data

The test site is the district of the Old Harbour of the city of Marseille (France). It represents an area of 1 km by 1.28 km. The spectral data, whose bands are the same as the XS1, XS2 and XS3 bands of SPOT-1-3, have been obtained from the R.A.M.I. (radiomètre aéroporté multispectral imageur) airborne sensor of CNES during the campaign of September 1993 (CNES 1995). The airborne images were acquired with a 1.67 m resolution. A colour composite of the three spectral bands is displayed in figure 1. This site presents four typical zones:

1. In the upper-left quarter of this image, one can see well organised and large structures, main roads (with a width between 14 and 30 m), straight secondary roads and high buildings.
2. In the upper-right quarter, the zone is denser, roads are thinner (3-4 m of width) and sometimes sinuous, and structures are less organised.
3. In the lower left quarter, one finds residential district, individual houses, a lot of vegetation, thin and sinuous secondary roads, big buildings like the church of Notre Dame de la Garde, different altitudes, steep relief gradients and various textures within this zone;
4. The lower right quarter shows main straight roads, high buildings, residential district, thin and sinuous secondary roads and a lot of vegetation.

From the R.A.M.I. airborne images, the following have been numerically simulated by CNES (Pauc *et al.* 1996) and made available to us:

1. A panchromatic band at 5 m and multi-spectral bands B_i ($i=1,2,3$) at 10 m to simulate SPOT-5 data;
2. A panchromatic band at 10 m and multi-spectral bands XS_i ($i=1,2,3$) at 20 m to simulate SPOT-1-3 data.

We have demonstrated in a previous work that there is no particular interaction between the different mathematical tools used for the simulation and for the fusion

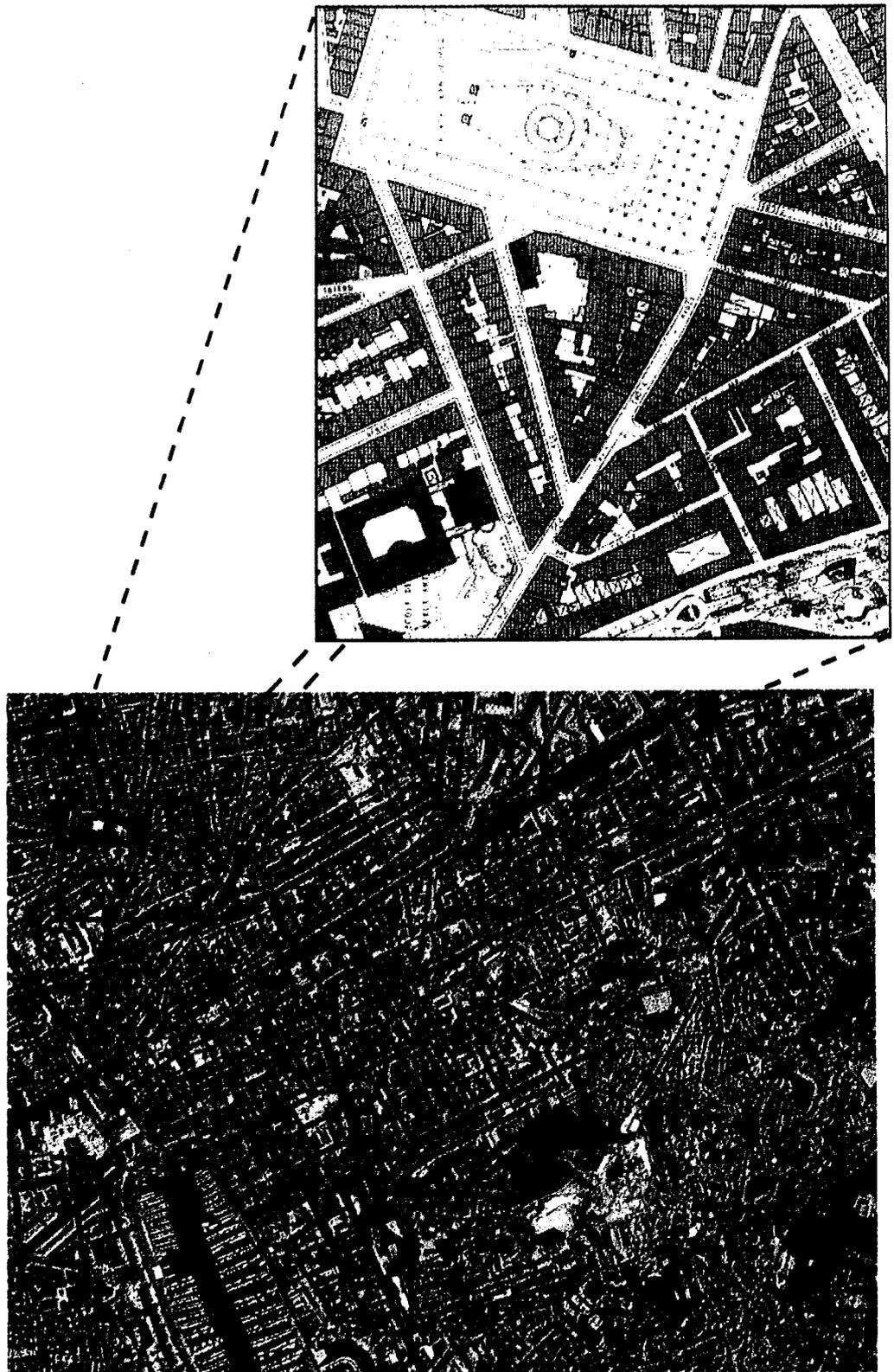


Figure 1. (Bottom) Colour composite of the 1.67 m data of the city of Marseille (France), CNES©1993 (red: B3, green: B2 and blue: B1).

Figure 2. (Top) Extract of the 1:2000 map of the city of Marseille, ©ICOREM.

of the information (Couloigner *et al.* 1996). Thus, for our purpose, these simulated images can be considered as images obtained by an actual sensor having the appropriate resolution: 5, 10 and 20 m.

Accurate maps of Marseille at a 1:2000 scale are produced by the French company ICOREM (figure 2). They constitute the ground truth and are used as a reference.

3. The ARSIS concept

Given a set of images with different spatial and spectral resolutions, the ARSIS concept allows the improvement of the spatial resolution of images up to the best spatial resolution available. The concept makes use of the wavelet transform and the multi-resolution analysis. The multi-resolution analysis allows the computation of successive approximations of an image with coarser and coarser spatial resolutions. Associated with the multi-resolution analysis, the wavelet transform describes the difference of information existing between two successive approximations. Practically, the computation of the multi-resolution analysis is done by applying low-pass filters on the image and the computation of the difference of information between two successive approximations is done by a pass-band filter. Thus, the difference of information, represented by the wavelet coefficients, allows the isolation of the structures whose scales are included between the two resolutions of the successive approximations, e.g., between 5 and 10 m, or 10 and 20 m. The multi-resolution analysis can be reversed and the original image exactly reconstructed from an approximation and the wavelet coefficients. The description of the information content of the image with the best spatial resolution is used to model the missing information needed to synthesise the lower spatial resolution images with the best spatial resolution. The model performing the injection of information from the panchromatic into the multi-spectral images, takes into account the physics of both images.

The ARSIS concept was first applied to the case of the existing SPOT-1-3 imagery (Mangolini *et al.* 1993). In this case, the set of images is composed by a panchromatic image with a spatial resolution of 10 m and three XS multi-spectral images with a spatial resolution of 20 m. ARSIS allows the synthesis of XS-HR multi-spectral images with a spatial resolution of 10 m. Other sensor fusion methods were designed to improve the spatial resolution of images, but analyses of the different families showed that ARSIS gives the best achievable results with respect to the preservation of the spectral content of the original images methods (Mangolini *et al.* 1993, 1995, Wald *et al.* 1997). The ARSIS concept was also applied to the merging of the Thematic Mapper (TM) band 6 (spatial resolution 120 m) of the Landsat satellite with the other bands of TM sensor (spatial resolution 30 m) (Ranchin 1993), the merging of TM images with the panchromatic image provided by SPOT (Blanc *et al.* 1996) and the merging of SPOT XS images (spatial resolution 20 m) with the image provided by the Russian sensor KVR-1000 (panchromatic band at a spatial resolution of 2 m) (Ranchin *et al.* 1996).

By this concept, synthesised images with an improved spatial resolution are built from the simulated SPOT-5 and SPOT-1-3 data. The available sets of the images are summarised in table 1.

An evaluation of the synthesised images (i.e., the XS_i-HR and B_i-HR images) has been made (Couloigner *et al.* 1996) following the approach proposed by Mangolini *et al.* (1995). This quantitative assessment produces many parameters which are not

Table 1. Sets of images used in this study.

| | Name | Spatial resolution (m) | Number of spectral bands | Type |
|----------------|------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|
| SPOT-1-3 | XS_i | 20 | 3 | simulated |
| | panchromatic, P_{10} | 10 | 1 | simulated |
| SPOT-1-3 ARSIS | XS_i -HR | 10 | 3 | synthesised for this study |
| SPOT-5 | B_i | 10 | 3 | simulated |
| | panchromatic, P_5 | 5 | 1 | simulated |
| SPOT-5 ARSIS | B_i -HR | 5 | 3 | synthesised for this study |

discussed here for the sake of brevity. It confirms that the spectral content of the simulated images (i.e., the XS_i and B_i images) has been preserved when increasing the spatial resolution. It justifies the need for the present further assessment of the contribution of this fusion method in urban mapping.

4. Numerical methods for urban mapping

A semi-automatic method for urban roads mapping is applied to the available simulated and synthesised data. This method has been developed by Ranchin and Wald (1995). It is not linked to any particular sensor. It was applied to the SPOT-1-3 imagery and to some images of the SPOT satellite and of the Russian KVR-1000 sensor (Ranchin and Wald 1996). It consists in the detection of urban roads followed by their mapping.

4.1. The detection of urban roads

The detection intends to locate urban roads by semi-automatic processes and to find a skeleton of urban roads. To begin, an unsupervised classification is applied to the multi-spectral bands of the different sets of images (Albuisson 1993). It results into a hierarchical ascending tree of the different classes. This tree is analysed by photo-interpretation to enhance at best the urban roads (figure 3 (a)). It provides a binary mask containing the streets, neighbouring areas as well as misclassified pixels (figure 3 (b)). Then the multi-spectral bands are masked to retain these areas. The classification scheme is iterated only on the masked multi-spectral image. This second



Figure 3. First step of the classification, (a) resulting mask of roads, (b) and the skeleton image, (c) of the urban roads computed from the colour composite of the 10 m XS_i bands.

iteration improves the skeleton of urban roads (figure 3 (c)) by reducing the number of misclassified pixels and by a better separation between streets and surrounding pixels. The images of the skeleton of urban roads, called the skeleton images, have been built in this way at different resolutions: i.e., 5, 10 and 20 m.

4.2. *The mapping of urban roads*

Adobe Photoshop[®] software is used to produce the final map of the urban roads. This step consists in drawing rectangles on the skeleton images, which fit the detected roads. In that way, missing parts of the roads and more general incompleteness in the network are overcome. It results in a final map which looks similar to standard maps, such as in figure 2.

In this study, this step is used to assess the benefit of increasing resolution in urban mapping. Some rectangles are drawn which correspond to a few segments of road. These segments (figure 5) have been chosen wide enough to be visible on all skeleton images, i.e., at 5, 10 and 20 m (*B-HR*, *B*, *XS-HR* and *XS* skeleton images). The width of these segments is adjusted visually to the width of the roads to map the corresponding skeleton images. The surface of each rectangle and for each resolution is then computed and compared to the actual surface given by the ICOREM map reference.

4.3. *Evaluation of the urban maps*

The contribution of the improvement of spatial resolution to urban mapping is evaluated according to, on the one hand, photo-interpretation criteria, and on the other hand, retrieval of actual surfaces and distances.

In a first step, a skilled photo-interpreter has evaluated the different images of the Old Harbour district for all spatial resolutions available in the sets of images. This analysis is done by the means of the colour composite of the multi-spectral bands (figure 4) at 5 m (*B-HR* image), 10 m (*XS-HR* and *B* images) and 20 m (*XS* image). The discussion deals with the sharpness of the structures (roads, buildings, etc) in the images and will conclude on the contribution of both SPOT-5 and the ARSIS method to urban roads mapping. It has been found that the panchromatic bands were unnecessary, for the photo-interpretation, if they had the same spatial resolutions as those of the multi-spectral images (i.e., P_5 and B_i -*HR*, P_{10} and B_i or P_{10} and XS_i -*HR*).

In a second step, we determined the accuracy of the estimated surface of road segments which have been mapped (figure 5) on the skeleton images at 5 m (*B-HR* image), 10 m (*XS-HR* and *B* images) and 20 m (*XS* image). The actual surface of these road segments has been measured on the maps at a 1:2000 scale (see for example, figure 2) and is used as reference. The surface of the mapped road segments is estimated by the measure, in pixels, of the width and the length of the considered road segment. The error made in assessing the surface is equal to the difference, in absolute value, between the reference surface and the estimated surface, computed in square metres. This error is expressed relative to the reference surface. By analysing the error rates between the different spatial resolutions, we show how the accuracy of the estimated urban roads surface improved as the spatial resolution increases.

5. Results and discussion

5.1. *Photo-interpretation*

The colour composite of the spectral bands was used to discriminate the vegetation from buildings. The photo-interpreter can clearly observe the different urban areas within the city.

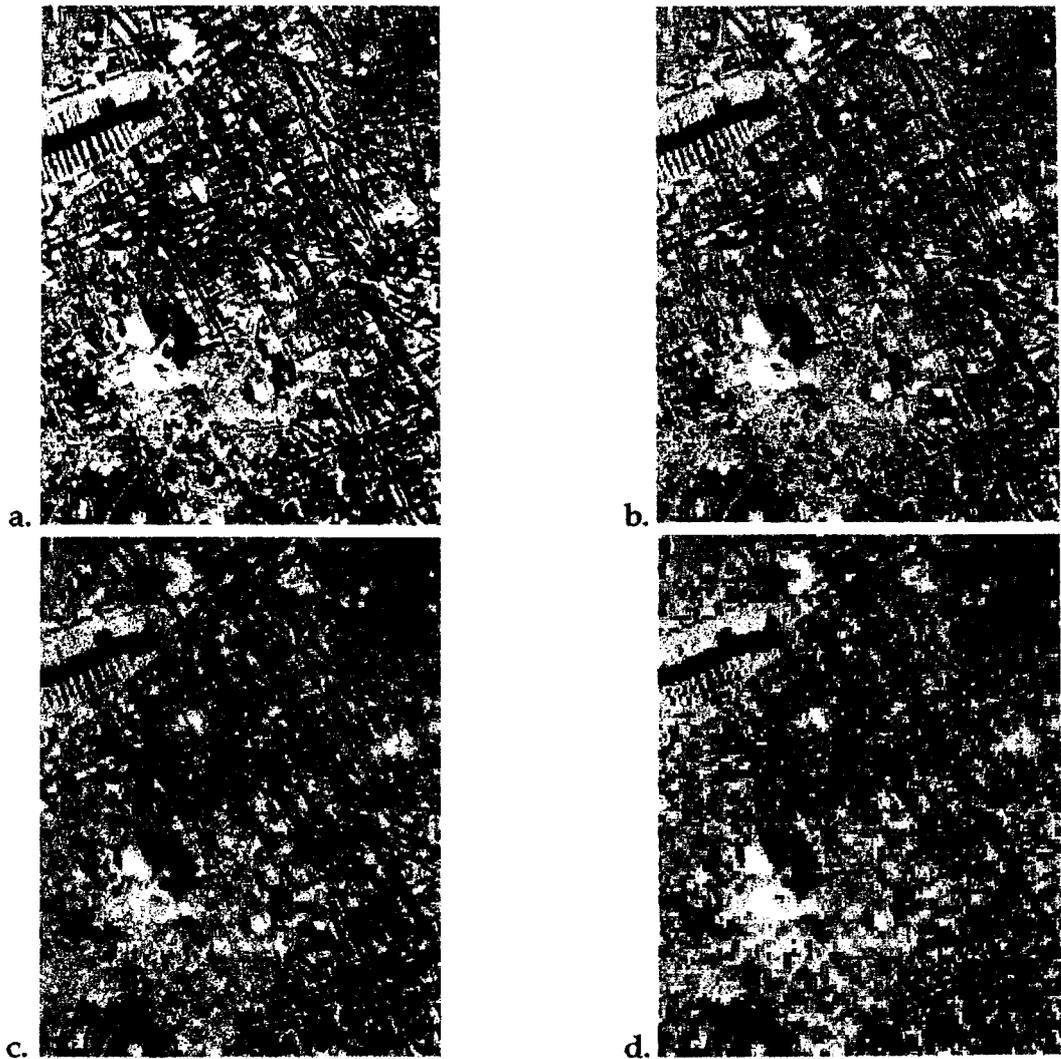


Figure 4. Colour composite images of the city of Marseille at 5 m ARSIS (a) at 10 m, (b) CNES©1993—for SPOT-5 and at 10 m ARSIS, (c) at 20 m, (d) CNES©1993—for SPOT-1-3.

At the 20 m resolution (figure 4(d)) only the main roads of the city (i.e. streets whose width is larger than 16 m) are clearly visible. In the lower-left quarter, one cannot identify the large church Notre Dame de la Garde without an *a priori* knowledge. But we can clearly separate the different textures of the city (vegetation, building areas, ...). This spatial resolution does not allow the observation of the small details within the city.

At the 10 m resolution (figures 4(b) and 4(c)) we can discern the streets whose width is larger than 8–10 m in the upper-left quarter. The upper and lower-right quarters show only the main roads of the city (streets larger than 14 m). We can well distinguish vegetal and human beings areas from the lower-right and left quarters. Thus, the different urban areas are well discriminated. Moreover, some details of the streets appear like trees along some roads, shadows, asphalt. The colour composite image obtained from simulated multi-spectral bands is better than the one resulting from the synthesised images. The latter is more blurred than the first one. However

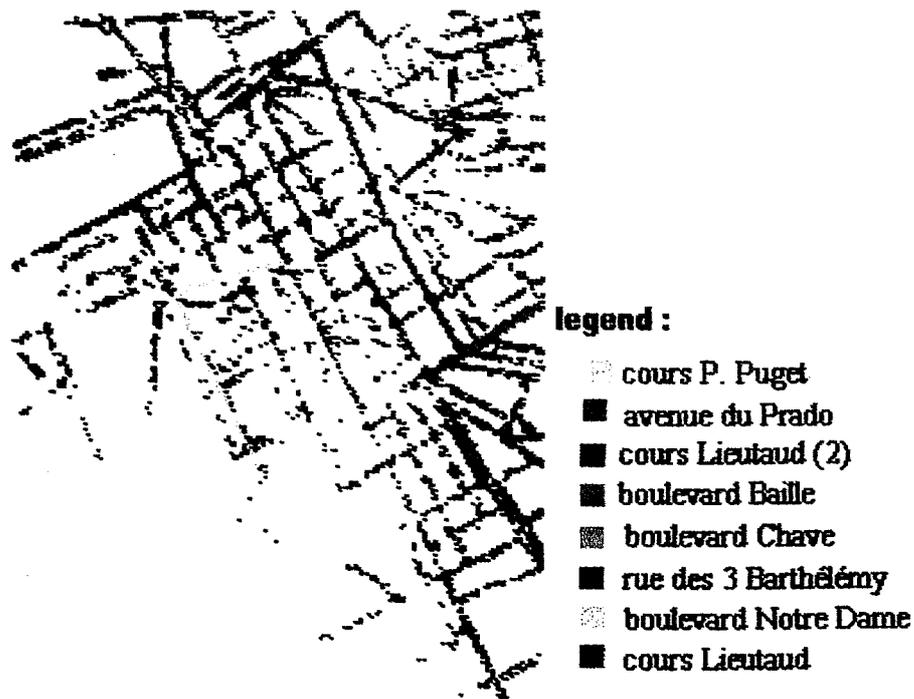


Figure 5. Skeleton image extracted from the colour composite image of SPOT-5 at 10 m—road segments mapped for the evaluation of the surface of the urban roads.

the colour composite made from synthesised images at 10 m shows more details than the one obtained from the simulated images at a 20 m resolution.

At the 5 m resolution (figure 4(a)) in the upper-left quarter, all streets around the Old Harbour of the city are well visible for all widths, lengths and directions. In districts with a denser network, i.e. in the upper- and lower-right quarters, streets are sometimes perceptible even if their width is lower than one pixel resolution (3–4 m, for example). The detection of these roads depends on the direction of the Sun, the spectral signature of the roads compared to their surroundings and the height of the buildings. In the lower-left quarter, roads are perceptible from 8–10 m (around the hill). Consequently, roads are more accurate and more detectable on the SPOT-5 multi-spectral image (10 m of resolution) than on the SPOT-1–3 one (20 m of resolution). Indeed, the finer the spatial resolution, the easier the discrimination between two adjoining urban objects (Forster 1985).

We obtained the same results when we compared the synthesised multi-spectral *XS-HR* (10 m) and *B-HR* (5 m) images with the simulated *XS* (20 m) and *B* (10 m) ones, respectively, for SPOT-1–3 and SPOT-5. Hence, the finer the spatial resolution, the more accurate the description of the transitions between the streets and their surroundings and the more numerous the visible urban roads.

5.2. Comparison of surface of urban roads

For the simulated data of SPOT-1–3, the measures are done on the road segments mapped on the *XS* and *XS-HR* skeleton images (i.e. at 20 and 10 m respectively). The results are summarised in table 2. As the 20 m skeleton image clearly shows the main roads of the city, only the streets whose width is larger than 15 m, have been measured.

Table 2. Reference and estimated measures of road segments mapped on XS and XS-HR images.

| | Lieutaud | | | Notre Dame | | | les 3 Barthelemy | | | Chave | | |
|---------------------------|----------|-------|-------|------------|-------|------|------------------|-------|------|-------|-------|------|
| | ref. | XS-HR | XS | ref. | XS-HR | XS | ref. | XS-HR | XS | ref. | XS-HR | XS |
| Length | 518 | 528 | 502 | 462 | 474 | 492 | 305 | 292 | 284 | 298 | 323 | 330 |
| Estimated-reference | | 10 | -16 | | 12 | 30 | | -13 | -21 | | 25 | 32 |
| Relation to reference (%) | | 2 | -3 | | 3 | 6 | | -4 | -7 | | 8 | 11 |
| Width | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 16 | 20 | 20 | 24 | 20 | 20 |
| Estimated-reference | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | 4 | 4 | | -4 | -4 |
| Relation to reference (%) | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | 25 | 25 | | -17 | -17 |
| Area | 10360 | 10560 | 10038 | 9240 | 9483 | 9839 | 4880 | 5841 | 5685 | 7152 | 6456 | 6597 |
| Estimated-reference | | 200 | -328 | | 243 | 599 | | 961 | 805 | | -696 | -555 |
| Relation to reference (%) | | 2 | -3 | | 3 | 6 | | 20 | 16 | | -10 | -8 |

| | Baillie | | | Lieutaud (2) | | | Prado | | | Puget | | |
|---------------------------|---------|-------|-------|--------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | ref. | XS-HR | XS | ref. | XS-HR | XS | ref. | XS-HR | XS | ref. | XS-HR | XS |
| Length | 290 | 311 | 312 | 203 | 211 | 213 | 227 | 242 | 244 | 252 | 242 | 224 |
| Estimated-reference | | 21 | 22 | | 8 | 10 | | 15 | 17 | | -10 | -28 |
| Relation to reference (%) | | 7 | 8 | | 4 | 5 | | 7 | 8 | | -4 | -11 |
| Width | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 20 | 60 | 60 | 60 | 28 | 30 | 40 |
| Estimated-reference | | 0 | -10 | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | 2 | 12 |
| Relation to reference (%) | | 0 | -33 | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | 7 | 43 |
| Area | 8700 | 9319 | 9248 | 4060 | 4219 | 4252 | 13620 | 14524 | 14648 | 7056 | 7260 | 8944 |
| Estimated-reference | | 619 | -2452 | | 159 | 192 | | 904 | 1028 | | 194 | 1888 |
| Relation to reference (%) | | 7 | -28 | | 4 | 5 | | 7 | 8 | | 3 | 27 |

Three cases bring out from the analysis of table 2.

1. If the width error rate is null for the mapped road segment in the *XS* and *XS-HR* skeleton images (Lieutaud, Notre Dame, Lieutaud (2) and Prado), the surface error rate is better for the synthesised image than for the simulated one. Moreover, this surface error is weak relative to the actual surface (from 2 to 8 per cent). The differences between the measures of the surface at 20 m and those at 10 m range between 1 and 5 per cent.
2. If there is an error for the measures of the road segment width (les 3 Barthelemy and Chave), the surface error rate becomes significant: from 8 to 20 per cent. This error occurs on roads whose width is not a multiple of the spatial resolution of the considered image. But as a whole, the difference between the measures of surface at 20 m and those at 10 m is weak (2 and 3 per cent).
3. If an important error made on the width measure of a road segment at 20 m decreases for the measure of a width of the considered segment at 10 m, the difference between the measures of surface at 20 m and those at 10 m is significant (24 per cent for Puget and 35 per cent for Baille). These two cases correspond to the roads whose width is not a multiple of the 20 m resolution but a multiple of the 10 m resolution or whose error on width is very weak at 10 m.

Consequently, most of the surfaces of mapped road segments are closer to the reference surfaces for the *XS-HR* skeleton image than for the *XS* one, except for two cases (les 3 Barthelemy and Chave). For these cases, even if the length error is weak and better for the *XS-HR* skeleton image, the error on the measure of the width of these road segments is mainly responsible for the error made on the surface and is large enough to reverse the results of surface error. We also noticed that when the width of the road segments is a multiple of the spatial resolution, there is no width error. In this case, only the length error enters into the surface error and it is generally weak due to the visibility of the extremities of the road segments on the skeleton image.

Moreover, the visually comparison between the two skeleton images shows that streets have more contrast compared to their surroundings and are more drawn and separate in the *XS-HR* skeleton image than in the *XS* one. Roads which were undetectable on the *XS* skeleton image appear on the *XS-HR* one. Thus, the injection of the wavelet coefficients of the best spatial resolution image in the lower image through ARSIS allows the discrimination between roads and their surroundings to be made. So, the mapping of urban roads of the Old Harbour of the city is richer with the skeleton image computed from the synthesised multi-spectral images at 10 m.

For the simulated data of SPOT-5, the road segments mapped on the *B* and *HR* skeleton images (i.e., at 10 and 5 m respectively) have also been measured. Table 3 summarises the results.

The same three cases are observed for the study of table 3.

1. If there is no error on the measure of the road width (Lieutaud, Notre Dame, Baille, Lieutaud (2) and Prado), the surface error rate is weak (from 0 to 6 per cent). The difference between the measures of surface at 10 m (i.e. on the *B* skeleton image) and those at 5 m (i.e. on the *B-HR* skeleton image) ranges between 0 and 5 per cent. The results of the synthesised image are closer to actual values.

Table 3. Reference and estimated measures of road segments mapped on B and B-HR images.

| | Lieutaud | | | Notre-Dame | | | les 3 Barthelemy | | | Chave | | |
|---------------------------|----------|--------|--------|------------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ref. | B-HR | B | ref. | B-HR | B | ref. | B-HR | B | ref. | B-HR | B |
| Length | 518 | 520 | 524 | 462 | 467 | 470 | 305 | 300 | 294 | 298 | 289 | 320 |
| Estimated-reference | | 2 | 6 | | 5 | 8 | | -5 | -11 | | -9 | 22 |
| Relation to reference (%) | | 0 | 1 | | 1 | 2 | | -2 | -4 | | -3 | 7 |
| Width | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 16 | 15 | 20 | 24 | 25 | 20 |
| Estimated-reference | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | -1 | 4 | | 1 | -4 |
| Relation to reference (%) | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | -6 | 25 | | 4 | -17 |
| Area | 10 360 | 10 400 | 10 479 | 9 240 | 9 348 | 9 391 | 4 880 | 4 500 | 5 882 | 7 152 | 7 234 | 6 403 |
| Estimated-reference | | 40 | 119 | | 108 | 151 | | -380 | 1 002 | | 82 | -749 |
| Relation to reference (%) | | 0 | 1 | | 1 | 2 | | -8 | 21 | | 1 | -10 |

| | Baille | | | Lieutaud (2) | | | Prado | | | Puget | | |
|---------------------------|--------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | ref. | B-HR | B | ref. | B-HR | B | ref. | B-HR | B | ref. | B-HR | B |
| Length | 290 | 294 | 308 | 203 | 202 | 208 | 227 | 235 | 241 | 252 | 247 | 244 |
| Estimated-reference | | 4 | 18 | | -1 | 5 | | 8 | 14 | | -5 | -8 |
| Relation to reference (%) | | 1 | 6 | | 0 | 3 | | 4 | 6 | | -2 | -3 |
| Width | 30 | 30 | 30 | 20 | 20 | 20 | 60 | 60 | 60 | 28 | 30 | 30 |
| Estimated-reference | | 0 | 10 | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | 2 | 2 |
| Relation to reference (%) | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | 0 | 0 | | 7 | 7 |
| Area | 8 700 | 8 823 | 9 242 | 4 060 | 4 050 | 4 162 | 13 260 | 14 103 | 14 450 | 7 056 | 7 409 | 7 305 |
| Estimated-reference | | 123 | 542 | | -10 | 102 | | 483 | 830 | | 353 | 249 |
| Relation to reference (%) | | 1 | 6 | | 0 | 3 | | 4 | 6 | | 5 | 4 |

2. If an error is made on the measure of the road segment width (Puget), this error is relatively weak (7 per cent) and the difference between the measure of surface at 10 m and those at 5 m is very weak (1 per cent).
3. If the width error rate decreases (from 17 to 4 per cent for Chave and from 25 to 6 per cent for les 3 Barthelemy) as the spatial resolution increases, the difference between the measures of the surface at 10 m and those at 5 m is significant (12 and 28 per cent).

Table 3 reveals that the measures of the surface of the mapped road segments were closer to the actual values when we worked with the *B-HR* skeleton image than when we work with the *B* one. We can also verify that when the width of road segments was a multiple of the resolution of the skeleton image, the surface error was only due to the length error. This explains why as the resolution increases, the surface error decreases. Hence, the surface covered by urban roads are better estimated and closer to reference surface with the skeleton image computed from the synthesised multi-spectral images at 5 m than with the one provided by the simulated multi-spectral bands at 10 m.

Moreover, by comparing visually the *B-HR* and the *B* skeleton images, we found that the transitions between the streets and their surroundings was more accurate on the *B-HR* one. This is due to the injection of the structures, present in the wavelet coefficients, whose scales are included between the best spatial resolution (5 m) and the lower spatial resolution (10 m) in the lower spatial resolution image through the model. We also notice that the little structures are better discriminated. The *B-HR* skeleton image makes appear roads indiscernible on the *B* one.

Finally, we compare the measures computed from the *B* skeleton image with the ones provided by the *XS* skeleton image in order to display the benefit of the SPOT-5 imagery compared with the SPOT-1-3 one (see tables 2 and 3). The analysis of the results is comparable to the ones provided by the comparison between the *XS* and *XS-HR* skeleton images this analysis provides the same three cases as the previous analyses. Hence, we observe that the *B* skeleton image gives a surface of urban roads closer to reference surface than this provided by the *XS* one. Moreover, the skeleton image at 10 m is visually better for photo-interpretation. Indeed, the edges of urban roads are enhanced and also better drawn in the *B* skeleton image. This latter makes roads appear which were not detectable on the *XS* skeleton image.

6. Conclusion

Urban road mapping is, on the one hand, richer and, on the other hand, more accurate when the results are obtained from the simulated SPOT-5 data than when they come from the simulated SPOT-1-3 data. Indeed, the improvement of the spatial resolution between the two sets of images allows the detection of more urban roads and these are closer, in terms of surface, to the reference maps of the city. This is because the transitions between the streets and their surroundings are enhanced as the spatial resolution increases. So, the photo-interpretation of the future SPOT-5 imagery will be easier than for SPOT-1-3 and the results of the detection and mapping of urban roads will be improved.

It has been found that more information is extracted by photo-interpretation from the colour composite of multi-spectral images than from panchromatic images of similar spatial resolution. Moreover, it has been concluded that the latter are

unnecessary for photo-interpretation if multi-spectral images of similar spatial resolution are available.

The ARSIS method for sensor fusion improves the spatial resolution in preserving the spectral content of the simulated images from SPOT-1-3 and from SPOT-5. In this way, the synthesised images built by ARSIS improve the results of the urban road mapping method with a richer (more perceptible roads) and more accurate cartography (the surface of urban roads on the 5 m skeleton image is very close to the actual one). Indeed, the transitions between the roads and their surroundings become still more accurate with the synthesised images. Accordingly, these synthesised images allow the photo-interpreter to work more easily and more accurately. Fusion methods should be recommended in urban mapping.

Acknowledgment

This work has been supported by the Centre National d'Etudes Spatiales as part of the preliminary experiments of the uses of the future SPOT-5 data.

References

- ALBUISSON, M., 1993, Codage trichrome et classification. In *Actes du colloque de Toulouse. Outils micro-informatiques et télédétection de l'UREF, 13-16 November 1990* (Québec, Canada, Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy), pp. 167-173.
- BAUDOIN, A., FRATTER, C., and MUNIER, P., 1996, Le programme SPOT 5 et la préparation des utilisations. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, **141**, 9-21.
- BLANC, Ph., RANCHIN, T., BLU, T., WALD, L., and ALOISI, R., 1996, Using iterated rational filter banks within the ARSIS method for producing 10 m Landsat multispectral images. *Proceedings of the Conference Fusion of Earth Data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images, Cannes, France, 6-8 February 1996*, edited by T. Ranchin and L. Wald (Nice: SEE/URISCA), pp. 69-74.
- C.N.E.S., 1995, Moyens de simulation. In *Catalogue Simulations SPOT5* (Toulouse: C.N.E.S.—Centre Spatial de Toulouse), pp. 13-19.
- COULOIGNER, I., RANCHIN, T., and WALD, L., 1996, Synthèse d'images multispectrales à haute résolution spatiale pour l'étude de la ville, report of preliminary experiments of SPOT 5-6. Report T&M/96/R/03 to CNES, March 1996, Ecole des Mines de Paris, Paris, France.
- FORSTER, B. C., 1985, An examination of some problems and solutions in monitoring urban areas from satellite platforms. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 139-151.
- MANGOLINI, M., RANCHIN, T., and WALD, L., 1993, Fusion d'images SPOT multispectrales (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. In *De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS* (Toulouse, France, Cépaduès-Editions), pp. 199-209.
- MANGOLINI, M., RANCHIN, T., and WALD, L., 1995, Evaluation de la qualité des images multispectrales à haute résolution spatiale dérivées de SPOT. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, **137**, 24-29.
- PAUC, G., LATRY, Ch., PASQUET, A., and BRETON, E., 1996, Pourquoi et comment simuler des images SPOT 5. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, **141**, 22-27.
- 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, France.
- RANCHIN, T., and WALD, L., 1995, Fusion d'images HRV de SPOT panchromatique et multibande à l'aide de la méthode ARSIS: apports à la cartographie urbaine. In *Actes des 6èmes journées scientifiques du réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF: Télédétection des milieux urbains et périurbains, Liège, Belgique, 2-5 October, 1995* (Ed. Aupelf. Uref), pp. 283-290.
- RANCHIN, T., and WALD, L., 1996, Benefits of fusion of high spatial and spectral resolutions images for urban mapping. In *Proceedings of the 26th International Symposium on*

Remote Sensing of Environment and the 18th Annual Symposium of the Canadian Remote Sensing Society, Vancouver, British Columbia, Canada, 25–29 March, 1996 (Canada:ISRSE and CRSS), pp. 262–265.

- RANCHIN, T., MANGOLINI, M., and WALD, L., 1996, The ARSIS method: a general solution for improving the spatial resolution of images with respect of the spectral content by the means of sensor fusion. *Proceedings of the Conference Fusion of Earth Data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images, Cannes, France, 6–8 February, 1996* edited by Thierry Ranchin and Lucien Wald (Nice, France, SEE/URISCA), pp. 53–58.
- 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*, **63**, 691–699.

RECONNAISSANCE DE FORMES DANS DES IMAGES DE TELEDETECTION DU MILIEU URBAIN.

Cette thèse présente une nouvelle méthode, semi-automatique et hiérarchique, d'extraction du réseau routier urbain à partir d'images de télédétection de très haute résolution spatiale.

La méthode est basée sur le modèle de rues développé dans cette thèse, et sur les deux outils mathématiques que sont l'analyse multirésolution et la transformée en ondelettes.

Le modèle de rues intègre les propriétés radiométriques, géométriques et topographiques des différents types de rues présents dans les réseaux routiers urbains. Il est explicite et générique. Un modèle de réseau routier a également été élaboré. Il est basé sur des propriétés de connexité simplifiée et de hiérarchie du réseau.

L'analyse multiéchelle des images, obtenue par une analyse multirésolution, conduit à l'extraction, hiérarchique, des bords des différentes rues du réseau. La modélisation de l'information à différentes échelles caractéristiques, par la transformée en ondelettes, permet d'en établir la topographie, *i.e.* d'en extraire les terre-pleins. Ces extractions s'effectuent par deux algorithmes multirésolutions et itératifs.

Des critères quantitatifs d'évaluation ont été développés en liaison avec des cartographes urbanistes. Ils sont basés sur l'emprise et la localisation des rues, et sur des indices de connexité du réseau routier quadrangulaire.

Cette méthode a été appliquée à des images de différentes résolutions spatiales et spectrales. Les rues ainsi extraites sont positionnées avec une erreur moyenne de 2 pixels quelle que soit la résolution des images originales.

Cette méthode permet une automatisation partielle des tâches de cartographie du milieu urbain.

Mots-Clés

Extraction hiérarchique, Réseau routier, Urbain, Multirésolution, Ondelettes, Haute Résolution Spatiale, Evaluation quantitative.

PATTERN RECOGNITION FROM REMOTELY-SENSED IMAGES OF URBAN AREAS

The Ph.D. studies deal with a new method of the extraction, semi-automatic and hierarchic, of quadrangular urban road network from high spatial resolution imagery.

The method is based on a model of streets, and makes use of both the multiresolution analysis and the wavelet transform.

The model of streets integrates the geometrical, radiometric and topographical properties of the different classes of streets. It is explicit and generic. A model of road network has been elaborated too. This model is based on the properties of simplified connectivity and hierarchy.

The multiresolution analysis, by way of a multiscale analysis of images, allows the extraction of both sides of streets in a class-by-class way. The wavelet transform enables the modeling of information at different characteristic scales, and permits the drawing of their topography by the extraction of their reservations. These extractions have been made by two iterative and multiresolution algorithms.

Several quantitative criteria have been defined in cooperation with urban cartographers. They are based on the surface and the location of streets, and on some connectivity indices of the road network.

The method has been applied to spaceborne and airborne images of urban areas with different spatial and spectral resolution. The extracted streets are located to around 2 pixels from references whatever the resolution.

The method allows a partial automation of the cartographic tasks of urban areas.

Keywords

Hierarchical Extraction, Road Network, Urban, Multiresolution, Wavelets, High Spatial Resolution, Quantitative Assessment.