

Détection et restitution automatique du réseau routier sur des images aériennes

Automatic Detection and Plotting of the Road Network from Aerial Images

par Sylvain AIRAULT, Olivier JAMET

Laboratoire MATIS¹ – Institut Géographique National
2, avenue Pasteur
F-94160 Saint Mandé
E-mail : airault.jamet@matis.ign.fr

Résumé

L'analyse d'image, dans le domaine cartographique, ne se réduit pas à la reconnaissance des objets mais nécessite d'extraire leur géométrie avec une grande précision. Nous nous orientons, pour l'extraction automatique du réseau routier à des fins cartographiques, vers une approche où ces deux phases — détection et restitution — seraient distinctes : la phase de détection ayant pour but d'extraire un graphe exhaustif du réseau avec une topologie exacte et la phase de restitution ayant en charge le calcul de la géométrie de l'axe des routes en apportant à l'ensemble du réseau détecté une précision suffisante et une bonne représentation cartographique. Pour la détection, nous avons développé un algorithme de suivi de route basé sur l'optimisation d'un critère d'homogénéité directionnelle. Pour la phase de restitution, nous préconisons une méthode basée sur la recherche de la position d'équilibre des tronçons de route soumis à des contraintes internes — basées sur la connaissance de la forme générale des routes — et externes — basées sur la connaissance de la géométrie exacte de certains points de passage de la route.

Mots clés : Analyse d'image, reconnaissance de formes, suivi de route, contours actifs.

Abstract

Image analysis, in the field of cartography, is not limited only to object recognition, but also includes the precise computation of object geometric shapes. Our approach, for automatic extraction of road network for use in cartography, involves two distinct steps. Step one, recognition, extracts a topologically correct exhaustive graph of the network and step two, geometric shape extraction, computes all centerlines for the complete road network with good quality results both in accuracy and in cartographic representation. For object recognition, we have developed a road following algorithm based on the minimization of a cost function which evaluates the homogeneity. For geometric shape computation, we propose a method based on the calculation of a well balanced position of road sections with respect to a set of constraints : internal constraints — derived from a knowledge of road-shape characteristics — and external constraints — which force the connection between sets of well known points.

Key words : Image analysis, pattern recognition, road following, active contours.

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

L'IGN² a entrepris, depuis quelques années, la constitution d'une base de données topographique³, de couverture nationale,

reprenant tous les thèmes de la carte topographique traditionnelle au 1:25000 avec une précision géométrique de l'ordre du mètre en x , y et z ⁴. Cette base est actuellement saisie par restitution photogrammétrique manuelle à partir de clichés argentiques à l'échelle du 1:30000. Dans l'état actuel des techniques, cette saisie photogrammétrique demande du temps et un investissement considérable, en opérateurs comme en matériel — 2 à 3 millions d'heures de restitution pour l'ensemble du pays. L'effort de recherche en interprétation automatique d'images aériennes soutenu par l'IGN répond au besoin d'accroître la productivité des chaînes de saisie photogrammétrique sans dégrader la qualité du produit final.

1. Méthodes d'analyse et de traitement d'images pour la stéréorestitution.

2. Institut Géographique National.

3. BDtopo®.

4. en écart-type sur des points bien identifiés.

L'aide à la saisie du réseau routier est l'un de nos axes de recherche. Bien que le thème routier apparaisse comme l'un des plus faciles à interpréter automatiquement, la saisie manuelle des routes est rapide, par rapport aux autres thèmes cartographiques (bâtiments, végétation, courbes de niveau), et l'on ne pourra espérer un gain de temps avec des outils automatiques que s'ils ont une très grande fiabilité.

1.2. CONTRAINTES

Ce contexte de recherche appliquée fixe un certain nombre de contraintes, à la fois sur les données de départ et sur la qualité des résultats attendus.

Afin de pouvoir insérer les nouvelles techniques dans la chaîne de saisie existante sans augmenter les coûts en amont, nous conservons les photographies au 1:30000 panchromatiques comme données de départ. Une fois numérisées avec un pas de 20 microns, nos images ont une résolution terrain de 60 cm.

L'application à la BDtopo® nous oblige à la fois à reconnaître les routes dans l'image et à extraire une géométrie précise des axes de routes. Cela implique d'extraire précisément l'axe de route sur les images puis, pour pouvoir passer du repère des images vers le repère cartographique, de prendre en compte l'aspect stéréoscopique. Ce dernier point représente une contrainte dans la mesure où il sera nécessaire de disposer d'une connaissance fine du relief mais nous pourrions en tirer parti en associant un modèle numérique de terrain à l'image pour guider la détection et filtrer les erreurs.

Une contrainte supplémentaire en cartographie est de rester fidèle à des spécifications de saisie qui réclament à la fois une bonne précision géométrique et une représentation « lisible » faisant apparaître un nombre limité de détails. En ce qui concerne la représentation du réseau routier au 1:25000, ce problème de généralisation des formes paraît particulièrement sensible au niveau des carrefours, le reste du réseau ayant une représentation cartographique très proche du terrain.

2. Extraire la géométrie des routes

2.1. NOTRE STRATÉGIE : LA DÉTECTION PUIS LA RESTITUTION

2.1.1. Choix méthodologiques

L'originalité de notre approche réside dans la séparation entre une phase de détection et une phase de restitution, la détection correspondant à l'extraction d'un graphe du réseau routier à la fois exhaustif et topologiquement correct mais avec une géométrie

imprécise et la restitution correspondant au recalage de ce graphe sur les axes de routes avec calcul d'une géométrie 3-D (figure 1).

La phase de détection est assurée par un algorithme de suivi de route qui, basé sur un modèle radiométrique (recherche de la meilleure homogénéité), ne cherche pas à extraire la géométrie de l'axe de la route, mais assure seulement que le tracé se trouve entre les deux bords.

La phase de restitution a ensuite pour rôle de recalibrer précisément le résultat du suivi sur les axes de route à partir du graphe et d'une liste de points de passage, ces points de passage provenant du suivi lui-même (sous forme de coefficients de confiance attachés à la géométrie extraite et calculés localement par analyse des profils radiométriques) ou d'un traitement indépendant (recherche plus globale de bords parallèles dans un résultat de segmentation).

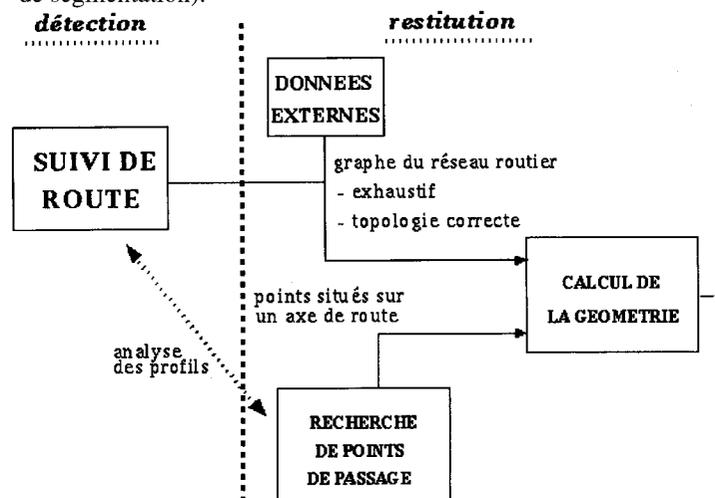


Figure 1. – La stratégie employée : séparation entre détection et restitution.

La frontière entre la détection et la restitution (figure 1) peut être temporelle dans un processus tout automatique — deux phases successives — mais n'est que formelle si l'on se replace dans le contexte d'un processus semi-automatique, où les tronçons pourraient être recalés au cours du suivi entre les points de passage probables détectés (afin que l'opérateur puisse juger immédiatement la qualité du résultat et rejeter le cas échéant une mauvaise extraction).

2.1.2. Pourquoi ces choix?

Concernant la séparation entre une phase de détection et une phase de restitution, notre choix repose surtout sur la souplesse de pouvoir remplacer — ou compléter —, au sein de ce processus, la phase de détection automatique par l'introduction de données externes de précision insuffisante — comme des données issues des autres bases de données de l'IGN, des saisies manuelles à des résolutions dégradées ou des résultats d'extractions à partir de cartes numérisées — en les recalant ensuite sur l'image à haute résolution. Cela paraît intéressant dans la mesure où la phase

de restitution est à la fois celle qui semble la plus abordable en automatique et celle qui est la plus coûteuse en temps pour un opérateur. En effet, si pour un opérateur humain l'identification de la route est dans bien des cas presque immédiate, les pointés de précision représentent la plus grosse partie du temps de restitution [AIR93].

D'autre part, il paraît difficile, même avec un algorithme basé sur une détection des bords de route, d'obtenir une géométrie parfaite de l'axe tant les obstacles (ombres, véhicules, ...) sont nombreux. Le fait de baser la détection sur un critère exclusivement radiométrique (sans contrainte sur la régularité du tracé) permet en revanche d'assurer la continuité de la détection même le long de routes partiellement masquées par des obstacles, le relâchement des contraintes assurant une meilleure exhaustivité que si l'on avait cherché à introduire conjointement des contraintes géométriques.

Concernant la détection automatique, le suivi de routes présente pour nous quelques avantages :

- d'un point de vue général, compte tenu de la grande diversité des routes sur les images, il est important de disposer d'une méthode très adaptative : des paramètres tels que la radiométrie de la route, sa largeur ou son orientation sont mis à jour dynamiquement au cours du suivi.
- dans la perspective de l'intégration des détections dans un processus industriel de saisie, le fait d'avoir préféré le suivi de route à une méthode globale pour la détection permet de ne pas trancher dès maintenant sur le fait de s'orienter vers un processus tout-automatique ou vers un processus plus interactif : utilisé tel quel, le suivi peut être intégré à un processus de saisie interactive assistée; combiné à un algorithme de recherche de points de départ, il peut déboucher sur une détection automatique du réseau routier.

Concernant la restitution automatique, le fait de traiter a posteriori le calcul de la géométrie n'est pas une contrainte puisqu'il nous fallait de toutes façons effectuer un post-traitement global pour calculer la géométrie dans le repère cartographique. De plus, en envisageant la restitution des axes de routes comme un traitement global, on pourra aborder avec plus de facilité des questions comme la représentation des carrefours ou l'introduction de modèles de courbes dans la calcul de la géométrie.

2.2. LES CONNAISSANCES QUE L'ON A DES ROUTES

Les algorithmes que nous avons développés reposent sur quelques connaissances simples sur le réseau routier. Le modèle utilisé pour la détection est principalement basé sur des hypothèses radiométriques, celui utilisé pour la restitution étant lui bâti sur des hypothèses géométriques :

- radiométrie : Aucune hypothèse n'est émise sur la valeur de la radiométrie, trop dépendante du type de revêtement et

l'on préfère caractériser les routes par leur texture. En effet, les routes sont caractérisées par une bonne homogénéité radiométrique le long de leur axe. Cette texture (ou absence de texture) doit être facilement mesurable dans la mesure où la largeur des routes sera rarement inférieure à 5 ou 6 pixels. Inversement, en bord de route, dans la direction orthogonale à l'axe, on peut s'attendre à trouver de forts contrastes entre la route et son environnement. On pourra donc, localement, obtenir de façon fiable la position de l'axe de route, entre deux bords détectés. En revanche, on préfère ne pas émettre d'hypothèses sur la faible variabilité de ce contraste (cf. propagations basées sur la corrélation avec un modèle de profil [GRO82] [McK88] [GUN91]). En effet, la quantité de détails visibles en bord de routes, notamment en zone urbaine (bâtiments, voitures, voies d'accès, arbres, haies, ...) risque d'infirmier trop souvent cette hypothèse.

- forme : les tronçons de route ont une forme allongée, une largeur constante (bords parallèles) et à peu près connue (quelques mètres). La mise en évidence locale de bords parallèles de part et d'autre de la route fournira une information fiable non seulement en localisation mais également en orientation, information capitale tant en détection (où l'on disposera d'un prédicteur sur la position du point suivant) qu'en restitution (où l'on pourra contraindre le lissage par des tangentes).
- courbure : en dehors des carrefours, la courbure des routes est relativement faible et varie lentement. Il faut tout de même prévoir de rencontrer exceptionnellement des angles droits (zones urbaines) ou même des angles aigus (routes de montagne). Cette connaissance est utilisée en détection pour limiter le domaine de recherche des directions possibles de propagation pendant le suivi, mais elle est surtout indispensable pour la restitution où il sera nécessaire de disposer d'un modèle géométrique des routes permettant d'interpoler la position de l'axe lorsque l'on ne dispose pas localement d'informations fiables dans l'image.
- connexité : il est rare de rencontrer des extrémités libres sur le réseau routier et il est exceptionnel de rencontrer des tronçons de route isolés. Cette connaissance n'est pas pleinement utilisée pour le moment. Elle devrait cependant intervenir au niveau de la détection pour générer des hypothèses de connexions topologiques entre tronçons proches de même orientation.

On retrouve la plupart de ces connaissances « bas-niveau » dans les modèles proposés par de nombreux auteurs [FIS81] [McK88] [GAR89] [GUN91]. Cependant, l'utilisation de l'homogénéité de la route comme critère principal pour assurer la détection est originale, de même que le petit nombre de critères utilisés. Notre sélection vise à réduire le nombre de ces critères, poursuivant les deux objectifs suivants :

- soit obtenir une extraction non exhaustive mais très fiable, objectif pour lequel la réduction du nombre de critères permet d'avoir des règles de contrôle simples.
- soit obtenir une extraction exhaustive mais sur-abondante. Dans ce cas, il est intéressant d'avoir une détection bas-niveau peu contrainte et d'intégrer petit à petit des connaissances de plus haut-niveau (connaissance de la scène, du contexte [GAR89]) pour filtrer les primitives.

Dans la mesure où l'on envisage, dans un contexte opérationnel, de faire participer l'opérateur à la détection, il est intéressant de réduire le nombre des paramètres qui pourraient être adaptés interactivement.

3. La détection : le suivi de route

Notre algorithme de suivi de routes est principalement basé sur l'optimisation d'un critère d'homogénéité directionnelle. Il fonctionne pour l'instant avec une saisie interactive des amorces de routes.

A chaque point détecté sont associés plusieurs attributs, mis à jour dynamiquement pendant le suivi :

- la direction de propagation.
- la radiométrie de la route.
- la largeur de la route.

3.1. CONTRAINTE SUR LA RADIOMÉTRIE

La contrainte sur la radiométrie consiste à générer un arbre de chemins possibles, de longueur suffisante pour être significative à l'échelle d'une route (50-150 mètres), et à les évaluer grâce à une fonction de coût sur l'homogénéité de la texture afin de conserver le meilleur. Chaque chemin est composé de segments de droite choisis localement suivant le critère d'homogénéité. Le fait d'optimiser ensuite ce critère sur un ensemble de segments permet de s'adapter à la forme de la route et de franchir de petits obstacles.

3.1.1. Calcul local de l'homogénéité

Des calculs de variances sont effectués dans les directions de propagation possibles sur des voisinages allongés de longueur et de largeur variables. Les voisinages utilisés généralement ont une longueur comprise en 10 et 30 pixels et une largeur comprise entre 1 et 9 pixels. Un tour complet est échantillonné sur 32 directions. L'efficacité du critère d'homogénéité est illustrée sur la figure suivante (figure 2) avec les variances représentées en niveaux de gris :



Figure 2. - Montpellier 512 x 512
Variance sur un voisinage de 20 pixels
Minimum sur 12 directions.

Bâti suivant le même principe que le filtre de Nagao [NAG80], ce filtre possède la propriété de préserver la forme générale et la position des bords de zones homogènes, tout en éliminant les irrégularités locales.

Le nœud suivant dans l'arbre des chemins possibles est calculé en fonction de l'orientation et de la longueur du voisinage pour lequel la variance est minimale. La radiométrie moyenne à partir de laquelle les écarts sont calculés est une donnée du suivi et ses variations sont limitées, ce qui permet de contrôler les franchissements entre deux régions homogènes de radiométries différentes.

3.1.2. Détermination des directions

En fonction des nœuds de l'arbre déjà générés, on définit les directions possibles pour les branches filles. La direction de propagation est une donnée du suivi et chaque nouveau pas a une liberté angulaire de -45 à $+45$ degrés.

Si la majorité des routes ne nécessitent pas une telle liberté angulaire, il faut néanmoins prévoir de pouvoir franchir occasionnellement des angles droits, dans les zones urbaines notamment. Il peuvent donc ici être franchis en deux sauts (figure 3). Entre ces deux bornes, un poids fort est associé aux directions les plus probables, la ligne droite étant pour l'instant choisie comme direction préférentielle. On peut cependant envisager dans l'avenir d'extrapoler la direction probable en fonction de la courbure sur les derniers points.

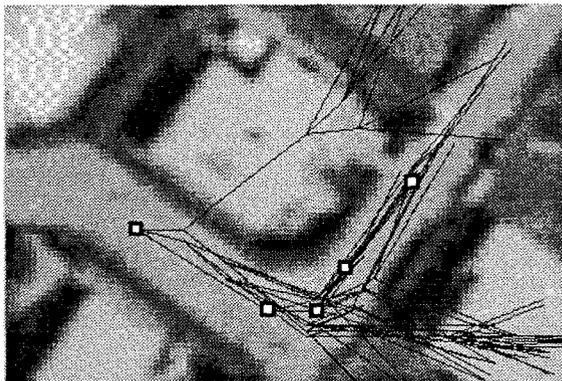


Figure 3. – Valréas 120 × 80
Franchissement d'un angle droit.

3.1.3. Choix du meilleur chemin

La robustesse de l'algorithme est assurée par une optimisation du critère d'homogénéité sur une distance assez grande. Cela permet de franchir de fortes courbures ou des obstacles (changement de revêtement, arbre, ...). Les 3 meilleures directions sont conservées à chaque nœud de l'arbre de recherche et la profondeur généralement choisie est 4 (figure 4).

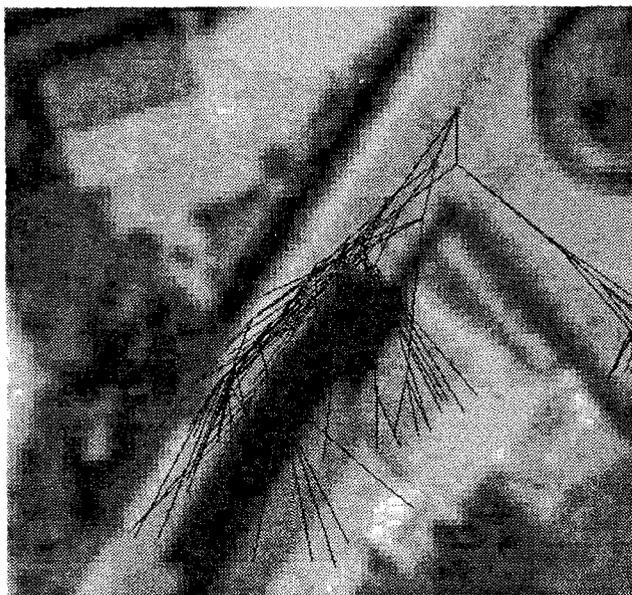


Figure 4. – Valréas 120 × 80
Arbre des chemins possibles.

Le chemin optimal est celui qui minimise la variance, qui maximise la distance parcourue et qui est le plus rectiligne.

Pour ce faire, on minimise un coût associé à chacun des n_{bdir}^{prof} chemins étudiés, calculé de la façon suivante :

$$COUT_{chemin} = \frac{\sum_{i=1}^{prof} (variance_i \times (\Delta dir_i \times rigid))}{\sum_{i=1}^{prof} longueur_i}$$

où :

n_{bdir} = nombre de directions retenues à partir de chaque nœud

$prof$ = profondeur de l'arbre

$variance_i$ = variance sur le segment de la profondeur i

$longueur_i$ = longueur du segment de la profondeur i

dir_i = variation d'orientation entre le segment i et le segment précédent

$rigid$ = coefficient de rigidité

Le poids accordé à la longueur des segments est aussi important car les variances ont d'autant plus de chance de bien qualifier la texture que les segments sont longs. Plus la confiance que l'on a dans la mesure est grande, plus on diminue le coût du chemin.

3.2. MISE EN ÉVIDENCE DE BORDS PARALLÈLES

La mise en évidence de bords parallèles est utilisée un peu en marge de la propagation, c'est à dire que l'on n'utilise pas ce résultat pour affirmer ou infirmer le fait que l'on soit ou non sur une route. La recherche des bords n'intervient que pour assurer un recalage géométrique de l'axe de la route aux endroits où il est suffisamment facile à interpréter et pour calculer, en vue du recalage global, des indicateurs de confiance sur la géométrie du réseau extrait.

La technique utilisée consiste à assimiler localement les bords de la route à des segments de droites et à rechercher le meilleur couple de droites parallèles dans un gradient calculé suivant la direction orthogonale à la direction de propagation (on utilise un filtre [1, 1] sur une imagerie rééchantillonnée suivant la direction estimée). Cette détection de bords est paramétrée (dynamiquement pendant le suivi) par des domaines de recherche autour de la position du point précédemment recalé, autour du point estimé par le critère d'homogénéité et autour de la largeur de route courante (figure 5).

On conserve, à l'issue de cette détection un indicateur de confiance qui est la moyenne du gradient le long des deux bords détectés.

3.3. RATTACHEMENT AU RÉSEAU ROUTIER

L'approche par suivi de routes implique le fait que les routes soient traitées les unes après les autres, posant le problème de

la représentation des carrefours. Dans la mesure où la phase de détection sera suivie d'une phase de recalage géométrique, on ne recherche ici qu'une bonne représentation topologique : en tentant de raccorder tout nouveau point détecté au reste du réseau (au point le plus proche dans la direction de propagation), on obtient une représentation topologique correcte des carrefours, même si leur représentation géométrique est loin d'être parfaite, puisqu'elle dépend grandement de l'ordre dans lequel les routes sont saisies (figure 6).

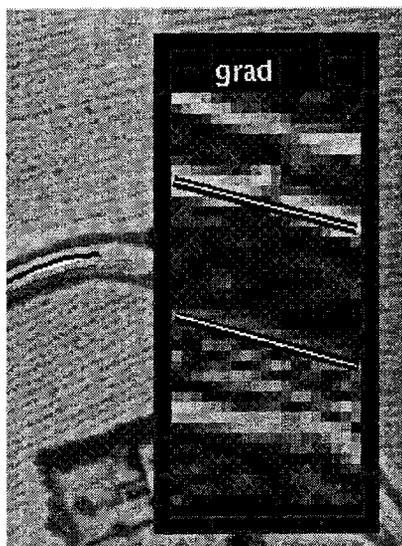


Figure 5. – Détermination de l'axe de route
Mise en évidence locale de bords parallèles.

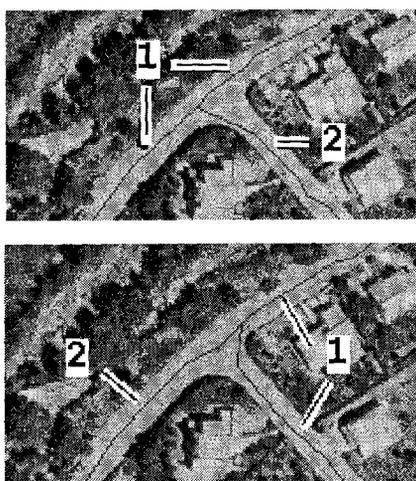


Figure 6. – Montpellier 120 x 80
Deux saisies du même carrefour.

4. La restitution : re-positionnement des axes

On part donc du principe, pour cette phase, que l'on dispose d'un graphe du réseau routier dont la géométrie est imprécise à une demi largeur de route près. On va chercher à recaler ce graphe sur l'axe des routes en utilisant deux types de connaissances : d'une part la connaissance locale de points de passage très probables de l'axe de la route et, d'autre part, une connaissance générale sur la forme des routes.

La méthode que nous proposons est basée sur le principe des contours actifs [KAS87] [WIL92]. Cela revient à assimiler le réseau routier à un ensemble de lignes élastiques liées par des relations topologiques figées. Ce réseau élastique est soumis à des contraintes internes (liées à une modélisation géométrique donnée) et externes (liées à des primitives image) et l'on détermine sa position d'équilibre.

Ce choix algorithmique est lié au fait que les contours actifs permettent une grande souplesse dans la réalisation de tests, notamment en ce qui concerne l'introduction de nouvelles contraintes ou l'application locale de contraintes spécifiques, qui pourraient notamment être introduites par l'opérateur dans le cadre d'une application interactive.

Les contraintes que nous avons définies pour le moment sont les suivantes; elles vont s'exprimer sous la forme d'énergies potentielles que l'on va chercher à minimiser.

4.1. LES CONTRAINTES « INTERNES »

Elles sont liées à la connaissance générale que l'on a de la forme des routes. Le modèle géométrique que nous utilisons est identique aux modèles courants de la littérature [KAS87] [WIL92], à savoir que l'on cherche à obtenir un tracé le plus régulier possible en minimisant la somme des carrés de la dérivée première et de la dérivée seconde.

Si chaque tronçon est représenté par un vecteur ν ayant pour dimension le nombre de points du tronçon avec $\nu(s) = (x(s), y(s))$

$$E_{int} = \frac{(C_1 |\nu'(s)|^2 + C_2 |\nu''(s)|^2)}{2}$$

Afin de pouvoir approximer les dérivées par des différences de coordonnées entre points du tracé, on introduit une contrainte qui tend à maintenir un écart constant en les points.

$$E_{elas} = \frac{1}{2} C_3 (l - l_{moy})^2$$

4.2. LES CONTRAINTES « EXTERNES »

Les contraintes externes « attirent » le tracé vers des points pour lesquels on a déterminé avec une bonne confiance qu'ils correspondaient à l'axe de la route. Quelle que soit la méthode utilisée pour obtenir ces points de passage (mise en évidence de bords parallèles soit locale soit dans un résultat de segmentation), les primitives obtenues sont des segments, fournissant une indication en localisation et en orientation. Nous avons donc deux types de contraintes externes, l'une qui privilégie le passage du tracé par des primitives et l'autre qui privilégie le parallélisme avec les primitives :

– E_{loc} : énergie de « localisation »

L'énergie externe de localisation s'exprime comme une fonction de la distance moyenne de la primitive au tracé :

$$E_{loc} = \frac{1}{2} C_4 q_i d_{moy_i}^2$$

où q_i est un coefficient de confiance attaché à la primitive.

– E_{ori} : énergie « d'orientation »

L'énergie externe d'orientation s'exprime comme une fonction de la variance sur la distance du tracé à la primitive.

Cette contrainte permet de corriger l'influence sur l'énergie externe des primitives extraites qui ne correspondraient pas à des bords de route. En effet, la plupart des leurres qui viennent bruyter la détection correspondent à des bords parallèles à celui de la route : toits des bâtiments, ombre des bâtiments, bas-côté de la route,...

4.3. EXTRACTION DES PRIMITIVES

Deux approches sont proposées pour l'obtention des primitives qui vont servir à calculer les énergies externes. Dans les résultats figurants en fin d'article, seule la détection locale de bords parallèles est employée.

4.3.1. Recherche locale de bords parallèles dans l'image

On a vu que le profil radiométrique le long des routes était trop bruité et trop variable pour permettre à lui seul la propagation le long de toutes les routes de façon continue. En revanche, ce critère peut être localement très robuste pour indiquer avec une grande confiance qu'un point est sur l'axe de route. Suivant l'importance des bords détectés lors du suivi, on attribue un coefficient de confiance à la géométrie extraite.

4.3.2. Recherche de bords parallèles dans un résultat de segmentation

Les segmentations d'images aériennes par des méthodes classiques — croissance de régions, bassins versants, ... — ne donnent

pas de bons résultats lorsqu'il est impératif d'obtenir des bords de route de façon exhaustive et non sur-abondante. Or, pour la détection de points de passage, nous n'avons pas ces exigences :

- si les contours sur-abondants sont trop éloignés du tracé de la route détectée (plus d'une demi largeur), ils ne seront pas pris en compte.
- s'il y a des interruptions dans les contours, les connaissances introduites sur la forme générale des routes (contraintes internes) permettront d'interpoler la position de l'axe.

Nous utilisons une segmentation par délimitation de bassins versants puis, grâce à la connaissance que l'on a de l'homogénéité des routes, on fusionne entre elles toutes les zones non homogènes (figure 7). Les bords parallèles sont ensuite détectés par mise en correspondance de chaque pixel d'un contour avec son plus proche voisin sur un autre contour [AIR94]. Deux bords sont alors parallèles si l'on observe une continuité des distances et des directions qui lient un contour à un autre. On conserve alors le milieu de chaque liaison comme passage probable de l'axe de route (figure 8).



Figure 7. – Montpellier 512 × 512 : segmentation

4.4. L'ÉNERGIE TOTALE

L'énergie totale du tronçon, que l'on cherche à minimiser, s'exprime comme la somme, pour tous les points $\nu(s) = (x(s), y(s))$ du tronçon, des quatre énergies :

$$E_{tot} = \sum_s (E_{int}(\nu(s)) + E_{clas}(\nu(s)) + E_{loc}(\nu(s)) + E_{ori}(\nu(s)))$$

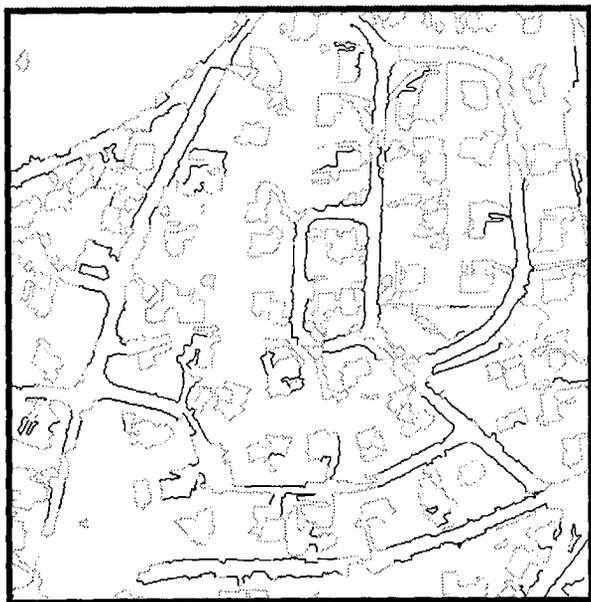


Figure 8. – Montpellier 512 × 512. Détection de bords parallèles.

4.5. TRAITEMENT DES CARREFOURS

Afin de pouvoir déplacer les carrefours sans modifier la topologie, on introduit des contraintes spécifiques qui sont exclusivement des contraintes internes.

La première est une contrainte sur la dérivée première des tronçons entrants, qui doivent être le plus rectiligne possible.

Une force tend à déplacer le carrefour vers la position qui optimise l'alignement des points des tronçons entrants (figure 9).

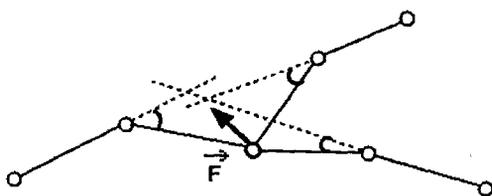


Figure 9. – Contrainte interne pour le positionnement des carrefours.

La deuxième prend en compte une connaissance a priori sur les carrefours que nous n'avons pas encore citée : on rencontre souvent des angles droits et des angles plats entre les tronçons issus d'un carrefours.

Les angles entre tronçons entrants initialement proches d'un angle droit ou d'un angle plat vont tendre vers l'angle droit ou l'angle plat si l'écart est inférieur à un seuil donné (figure 10). Nous avons choisi 20 degrés comme valeur pour ce seuil.

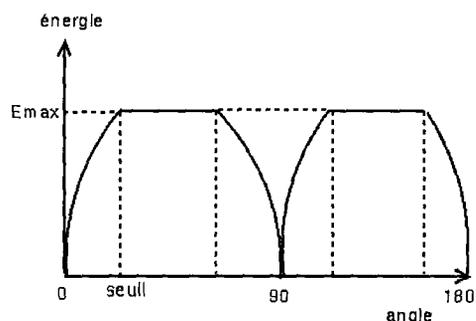


Figure 10. – Fonction utilisée pour la prise en compte d'angles préférentiels au niveau des carrefours.

5. Résultats

5.1. LA DÉTECTION

Des résultats, il ressort que dans bien des cas le critère d'homogénéité directionnelle se montre efficace (figure 11).



Figure 11. – Montpellier 200 × 250. Détection brute avec saisie manuelle des amorces de route.

Les critères d'arrêt utilisés sont les suivants :

- seuil en radiométrie (pour interdire les changements trop brutaux)
- seuil en variance
- seuil sur la dispersion spatiale de l'arbre de recherche. (pour interdire les passages dans des régions où l'homogénéité est isotrope)

Seul le seuil en variance est légèrement dépendant de l'image, les deux autres n'étant pas sensibles. Cependant, certaines améliorations semblent nécessaires :

- gérer les « retours en arrière »
Partant de la connaissance selon laquelle une route ne s'arrête pas sans raison, on peut chercher à perfectionner notre outil de détection bas-niveau en le dotant de la possibilité de revenir à une position antérieure en cas d'échec pour emprunter un chemin différent. Dans le même ordre d'idée et toujours sans interprétation, on peut imaginer, à l'occasion d'un échec, d'extrapoler une position possible de la route derrière l'obstacle et de reprendre l'analyse de l'homogénéité.
- utiliser conjointement d'autres critères
Il va de soi que le seul critère d'homogénéité ne permettra pas de traiter correctement tous les types de routes, notamment celles qui ont un fort marquage au sol, un revêtement très dégradé ou un nombre trop important de véhicules en circulation. Mais aucun critère ne saurait être parfait et il faudra sans doute envisager une coopération entre plusieurs algorithmes utilisant des critères de propagation différents.

5.2. LA RESTITUTION

5.2.1. Les points de passage probables

On utilise pour cela des indicateurs calculés pendant le suivi. En chaque point provenant de la détection, on dispose d'une primitive (figure 12) à laquelle est associée une mesure de confiance (moyenne du gradient le long des deux bords détectés). Sur le résultat suivant, les primitives ont été seuillées en fonction de ces mesures avec un seuil fixé à 150, les valeurs du gradient étant étalées entre 0 et 255 lors de la détection pour s'affranchir des variations locales du contraste.

En minimisant la fonction d'énergie totale sur l'ensemble des tronçons et carrefours, on obtient le résultat suivant (figure 13) qui nous donne une représentation du réseau routier assez conforme à celle que l'on peut trouver dans une saisie manuelle de la BDtopo® (figure 14).

Cependant, le modèle géométrique implémenté n'est pas suffisant (voir la mauvaise représentation des virages à forte courbure) et devra être complété, plusieurs solutions étant envisageables :

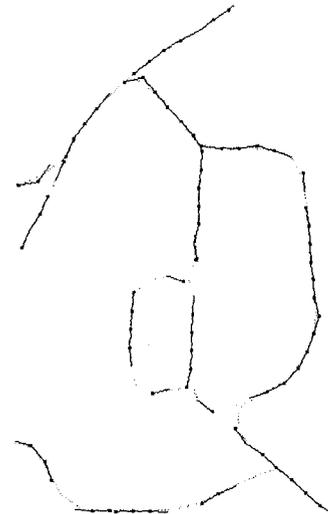


Figure 12. - Montpellier 250 x 350. Confiance dans la géométrie du suivi.

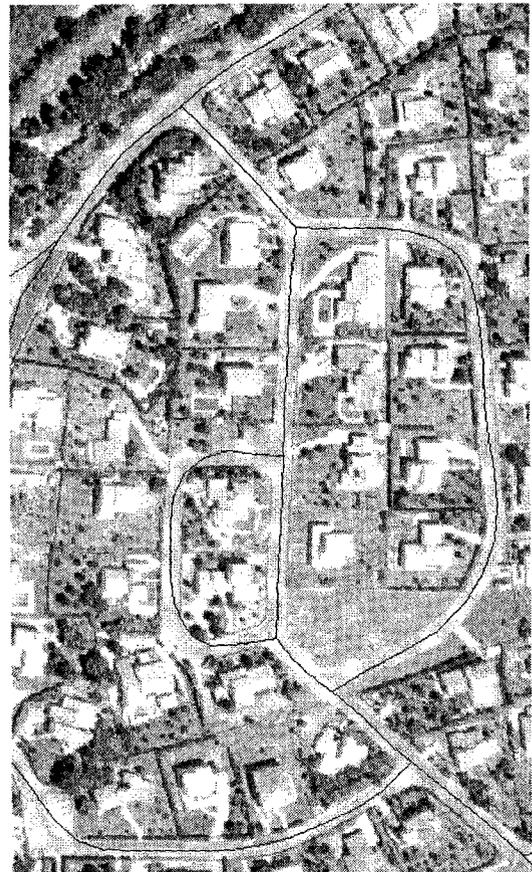


Figure 13. - Montpellier 200 x 250. Réseau après lissage.

- prendre en compte les ruptures
Certaines routes (en ville notamment) ont des tracés anguleux. Il est donc nécessaire de relâcher, de modifier ou d'annuler, aux points de rupture, les contraintes internes que nous avons définies.



Figure 14. – Montpellier 200 × 250. BDtopo®.

- utiliser des modèles de courbes
Les contraintes internes que nous avons utilisées tendent toujours à réduire les courbures et ont tendance à couper les virages lorsque les contraintes externes sont faibles. Ce défaut devrait pouvoir être corrigé en introduisant dans la fonction d'énergie une autre composante interne visant à faire passer les tronçons par des arcs de cercle en cas de forte courbure.
- effectuer des retours bas-niveau
Une solution pourrait permettre de ne pas complexifier le modèle géométrique en introduisant plus de contraintes externes. Il s'agirait de densifier au cours du lissage les informations image aux endroits où elles ne sont pas suffisamment contraignantes, étant aidé en cela par une connaissance plus fine de la géométrie de la route qu'au moment de la détection. (re-segmentation [FUA89])

5.3. ÉVALUATION DE LA QUALITÉ GÉOMÉTRIQUE DES RÉSULTATS

Afin de pouvoir évaluer quantitativement la qualité géométrique des résultats finaux, nous avons développé une interface de saisie permettant de saisir l'intégralité du réseau routier sur des images de grande taille de façon semi-automatique, l'opérateur indiquant

les amorces de routes et validant au fur et à mesure les axes de routes obtenus par une propagation automatique.

Les graphes obtenus peuvent alors être comparés à des saisies traditionnelles issues de la BDtopo® (considérées comme données de référence) en effectuant des mesures statistiques sur les écarts obtenus après un appariement automatique au plus proche voisin. Plusieurs expériences ont été réalisées pour évaluer la qualité géométrique des résultats et sa variabilité en fonction de certains paramètres : répétitivité des mesures, influence de la qualité de l'image, influence du type de paysage.

Les différentes saisies ont été effectuées sur deux images de la région de Valréas à une résolution de 40 cm (prise de vue 1 :20000 numérisée à 20µm). La première couvre une région péri-urbaine sur 4000 × 4000 pixels, la seconde couvre une zone rurale sur 2000 × 4000 pixels. L'outil d'extraction automatique génère un graphe 2-D dans la géométrie d'une des deux images d'un couple stéréoscopique. Pour les besoins de l'évaluation, les données de référence ont été projetées dans la même géométrie et les résultats sont exprimés en pixels.

- répétitivité des mesures : afin d'avoir une idée de la variabilité de la qualité géométrique des résultats obtenus, deux saisies successives ont été effectuées sur la même zone avec un choix d'amorces et un séquençement différents (figure 15).

	n	%rejet	m _x	m _y	m _{xy}	EMQ _x	EMQ _y	EMQ _{xy}
saisie 1	1806	3,99	0,29	0,26	2,88	2,35	2,86	3,69
saisie 2	1727	1,03	0,20	0,31	2,89	2,46	2,94	3,82

Figure 15. – Ecart à la BDtopo® pour deux saisies indépendantes (en pixels).

La variabilité des mesures est négligeable sur cet exemple, ce qui montre que l'algorithme de suivi de routes n'est pas sensible aux conditions d'initialisation. Par ailleurs, les écarts quadratiques obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux qualifiant la précision moyenne de la BDtopo® (3 – 4 pixels représentent grossièrement 1 – 1,5m en projection cartographique). Il est par conséquent possible que la qualité des routes extraites automatiquement soit en moyenne meilleure que celle des données de référence (saisies à partir de prises de vue au 1 :30000).

- influence de la qualité des images : l'utilisation d'images compressées permet d'ajouter une grande souplesse à l'interface opérateur en permettant d'accélérer les déplacements dans l'image. En effet, les images brutes sont de trop grande taille pour être chargées intégralement en mémoire et les lectures sur disque impliquent des interruptions assez longues dans la saisie (1 à 2 secondes). L'utilisation d'images compressées par une méthode de classification permet de réduire le volume des données (divisé par 4). Les images peuvent alors être intégralement chargées en mémoire et sont décompressées en temps réel au fil des besoins (quelques 1/10e de seconde). Cependant, cette compression occasionne une perte d'information radiométrique

dont il est intéressant d'évaluer l'influence sur la qualité finale des résultats.

	n	%rejet	mx	my	mxy	EMQx	EMQy	EMQxy
image compressée	1806	3,99	0,29	0,26	2,88	2,95	2,86	3,69
image brute	1704	0,23	0,45	0,57	2,92	2,27	3,06	3,79

Figure 16. – Ecarts à la BDtopo® pour deux qualités d'image (en pixels).

Sur cet exemple (figure 16), l'utilisation d'une image compressée n'a occasionné aucune perte sur la qualité des résultats. Cette troisième saisie confirme également la non-variabilité des écarts.

– influence du type de paysage : il est important d'évaluer le comportement des algorithmes dans des paysages de différents types, où les routes apparaissent dans des contextes différents. Les deux exemples traités ne permettront bien sûr pas de conclure, ce test devant prendre en compte un grand nombre d'images pour être significatif. Cependant, ils représentent deux classes importantes compte tenu du critère utilisé pour la détection : routes bordées par des jardins et des bâtiments en milieu peri-urbain (radiométries hétérogènes) et routes bordées par des cultures en milieu rural (radiométries homogènes). On peut redouter un moins bon comportement de l'algorithme de détection sur les routes bordées par des zones homogènes.

	n	%rejet	mx	my	mxy	EMQx	EMQy	EMQxy
zone péri-urbaine	1806	3,99	0,29	0,26	2,88	2,35	2,86	3,69
zone rurale	410	0,48	-1,07	0,48	3,17	2,63	2,88	3,87

Figure 17. – Ecarts à la BDtopo® pour deux types de paysage (en pixels).

Cet exemple (figure 17) montre une faible variation des écarts entre les deux saisies. Cependant, la saisie en milieu rural a nécessité un plus grand nombre d'amorces, les interruptions du suivi automatique étant plus fréquentes.

6. CONCLUSION

Chacun sait qu'il sera difficile d'obtenir, à court comme à moyen terme, de bons résultats dans le domaine de l'interprétation automatique des images aériennes avec des processus complètement automatiques. Notre point de vue d'industriel nous incite à nous pencher sur des solutions plus interactives dont on peut penser tirer un profit dans des délais plus courts. Cependant, le problème de

l'intégration de l'interactivité dans les processus d'interprétation automatique n'est pas toujours simple. L'intérêt de notre approche est de déboucher « naturellement » sur des solutions interactives sans remettre en cause des ambitions à plus long terme. En effet, grâce à une décomposition très modulaire du problème de l'extraction des routes sur images aériennes, nous gardons la possibilité d'introduire une intervention de l'opérateur au niveau de la détection comme au niveau de la restitution. Les évaluations que nous avons réalisées montrent que la solution interactive peut fournir des résultats de qualité satisfaisante même si les gains de productivité resteront faibles dans la mesure où la participation de l'opérateur est encore importante. Par ailleurs, cette architecture modulaire peut nous permettre d'évoluer vers un système plus automatique qui intégrerait des connaissances de plus haut niveau permettant de gérer la coopération avec d'autres outils bas-niveau et d'auto-évaluer la fiabilité des résultats obtenus.

BIBLIOGRAPHIE

- [NAG80] M. Nagao & T. Matsuyama, « A structural analysis of complex aerial photographs », *Plenum Press*, New-York 1980.
- [FIS81] M.A. Fischler, J.M. Tenenbaum & H.C. Wolf, « Detection of roads and linear structures in low resolution aerial imagery using a multisource knowledge integration technique », *Computer graphics and image processing*, 1981, pp. 201-223.
- [GRO82] W.D. Groch, « Extraction of line shaped objects from aerial images using a special operator to analyse the profiles of functions », *Computer graphics and image processings*, 1982, pp. 347-358.
- [KAS88] M. Kass, A. Witkin & D. Terzopoulos, « Snakes : active contour models », *International journal of computer vision*, 1988, pp. 321-331.
- [McK88] D.M. McKeown & J.L. Delinger, « Cooperative methods for road tracking in aerial imagery », *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, Ann Arbor, June 5-9, 1988.
- [GAR89] P. Garnesson, G. Giraudon & P. Montesinos, « Messie : un système multi-spécialiste en vision. Application en imagerie aérienne », *Rapport de recherche, INRIA*, avril 1989.
- [FUA89] P. Fua, « Une approche variationnelle pour la reconnaissance d'objets », *Thèse Paris XI*, septembre 1989.
- [GUN91] M.E. De Gunst, « Automatic extraction of roads from Spot images », *graduation report*, Delft University of Technology, july 1991.
- [WIL92] D. Williams & M. Shah, « A fast algorithm for active contours and curvature estimation », *Image understanding*, vol. 55, N°1, january 1992, pp. 14-26.
- [AIR93] S. Airault & O. Jamet, « Automatisation de la saisie des routes sur images aériennes », *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n°131, décembre 1993, pp. 12-23.
- [AIR94] S. Airault, R. Ruskoné & O. Jamet, « Road detection from aerial images : a cooperation between local and global methods », *European Symposium on Satellite Remote Sensing (Image and Signal Processing for Remote Sensing)*, Rome, september 1994.

Manuscrit reçu le 3 Novembre 1994.

LES AUTEURS

Sylvain AIRAULT



Sylvain Airault est chargé de recherche à l'Institut Géographique National (IGN-France) au laboratoire Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Images pour la Stéréorestitution (MATIS). Ses sujets de recherche sont liés à l'extraction automatique d'objets topographiques sur images aériennes. Il travaille principalement sur la détection du réseau routier depuis 2 ans.

Olivier JAMET



Olivier Jamet est chef du laboratoire MATIS depuis 1992 mais va se consacrer désormais à des sujets de recherche dans le domaine de la stéréovision et de l'interprétation automatique du milieu urbain à partir d'images aériennes. Il a reçu en 1986 son diplôme d'ingénieur de l'école Polytechnique (Palaiseau, France) avant d'effectuer une spécialisation d'ingénieur Géographe à l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG). Il a obtenu en 1988 un Diplôme d'Études Approfondies (DEA) en traitement d'images à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris, France).