

## Détection et restitution automatique du réseau routier sur images aériennes

Sylvain AIRAULT

Olivier JAMET

Laboratoire MATIS<sup>1</sup>

Institut Géographique National

2, avenue Pasteur

94160 SAINT-MANDE

### 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, extract 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.

**Keywords :** image analysis, pattern recognition, road following, active contours

<sup>1</sup> Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Image pour la Stéréorestitution

# 1. INTRODUCTION

## 1.1. contexte

L'IGN<sup>1</sup> a entrepris, depuis quelques années, la constitution d'une base de données topographiques<sup>2</sup>, 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<sup>3</sup>. 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.

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 facile 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 -- borne inférieure en dessous de laquelle les effets de discrétisation liés au grain photo sont perceptibles --, 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 qui est à la fois une contrainte dans la mesure où il sera nécessaire de disposer d'une connaissance fine du relief, et à la fois un avantage dans la mesure où un modèle numérique de terrain pourra être associé à l'image pour guider la détection.

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. COMMENT EXTRAIRE LA GEOMETRIE DES ROUTES ?

## 2.1. notre stratégie : la détection puis la restitution

### 2.1.1. la méthode

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

<sup>1</sup> Institut Géographique National

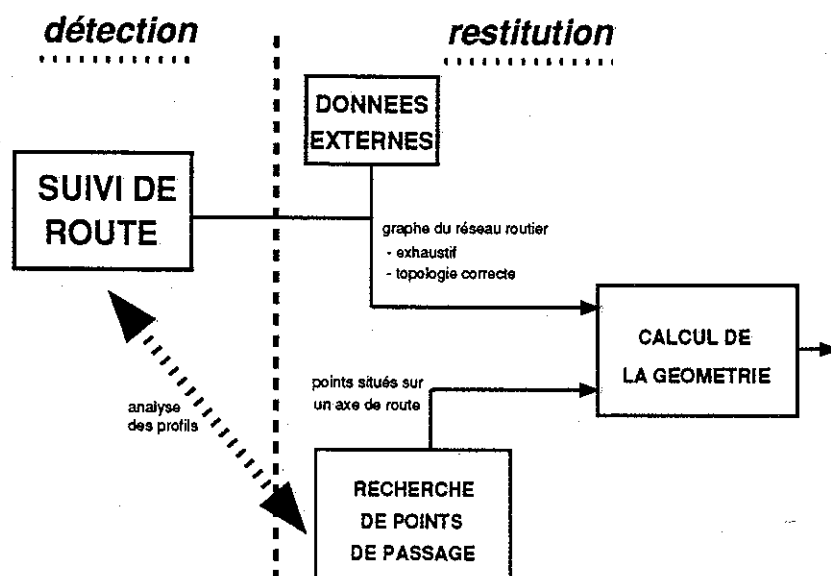
<sup>2</sup> BDtopo

<sup>3</sup> en écart-type sur des points bien identifiés

au recalage de ce graphe sur les axes de routes avec calcul d'une géométrie 3-D.

La phase de détection est assurée par un algorithme de suivi de route qui, basé sur la 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 recaler 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 pouvant provenir du suivi lui-même (sous forme de coefficients de confiance attachés à la géométrie extraite) ou d'une recherche de bords parallèles dans une segmentation



La frontière entre la détection et la restitution 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.

### 2.1.2. pourquoi ces choix ?

Le choix de séparer clairement la phase détection de la phase restitution 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 ou des saisies manuelles à des résolutions dégradées -- 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.

Concernant la détection automatique, le suivi de route, compte tenu de la grande diversité des routes sur les images, présente l'avantage d'être 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. 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 critère d'homogénéité permet en revanche d'assurer la continuité du tracé même le long de routes partiellement masquées par des obstacles, le relâchement des contraintes assurant ici une meilleure exhaustivité.

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.

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**

L'algorithme actuel repose sur quelques connaissances simples sur le réseau routier, qui semblent pouvoir être discriminantes sur des images aériennes à des résolutions de l'ordre de 60 cm :

- **radiométrie** : 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 doit trouver des discontinuités radiométriques importantes. On pourra donc, localement, obtenir de façon fiable la position de l'axe de route, entre les deux bords. En revanche, on ne préfère pas émettre d'hypothèses sur la faible variabilité du profil (cf. propagations basées sur la corrélation avec un modèle de profil [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 cette hypothèse trop souvent.
- **forme** : les tronçons de routes ont une forme allongée, une largeur constante (bords parallèles) et à peu près connue (quelques mètres).
- **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 peut être utilisée en détection pour limiter le domaine de recherche des directions préférentielles pendant le suivi. On peut imposer des contraintes plus fortes pour la phase de restitution en assimilant les routes à une combinaison de segments de droite et d'arcs de cercle.
- **connexité** : il est rare de rencontrer des extrémités libres sur le réseau routier et il est exceptionnel de rencontrer des tronçons de routes isolés.

## **3. LA DETECTION : LE SUIVI DE ROUTE**

L'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.

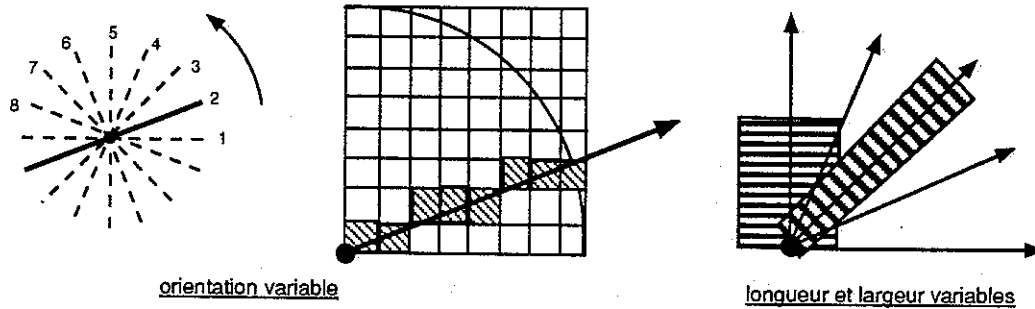
A chaque point détecté sont associés plusieurs attributs, mis à jour pendant le suivi :

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

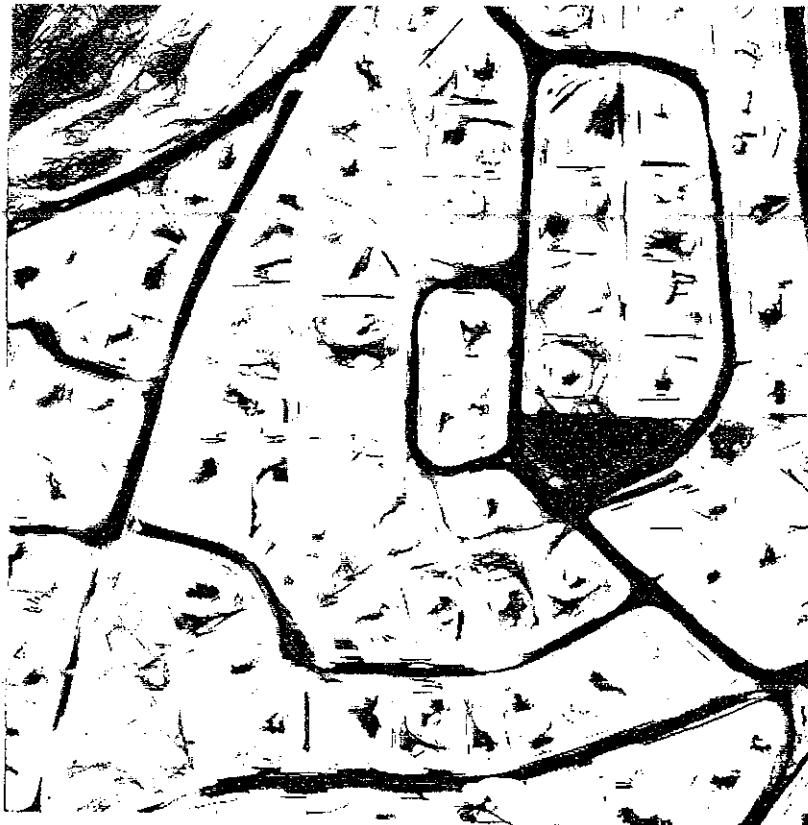
Les contraintes qui régissent la propagation sont les suivantes :

### 3.1. Contrainte sur la radiométrie :

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.

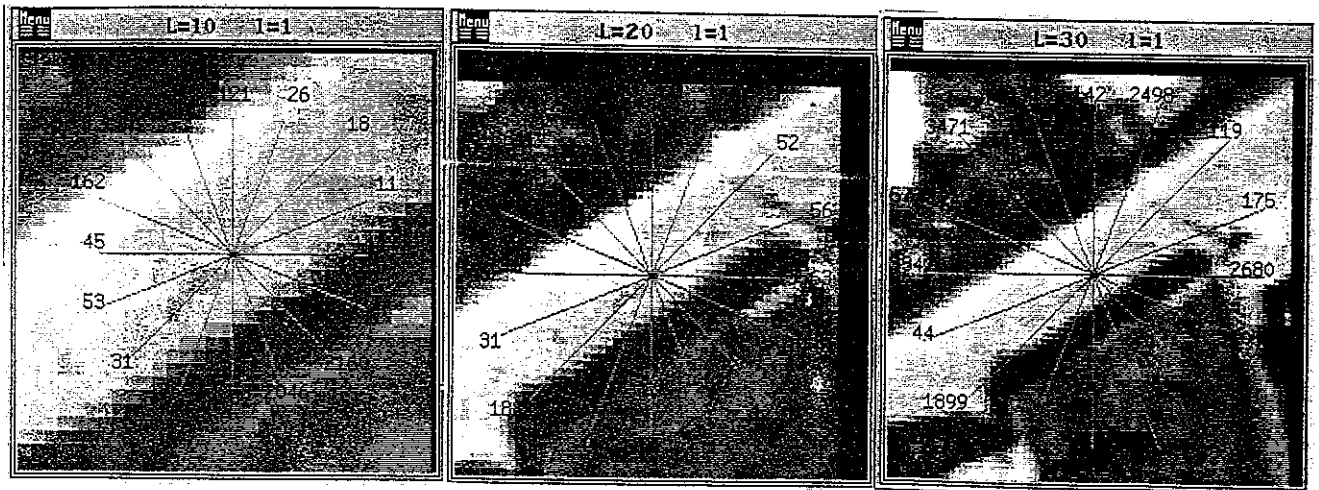


L'efficacité du critère d'homogénéité est illustrée sur les figures suivantes :



**fig 1 :** Montpellier 512 x 512 Variances sur un voisinage de 20 pixels Minimum sur 12 directions.

Filtrage affectant à chaque pixel le minimum des variances rencontrées sur l'ensemble des 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.

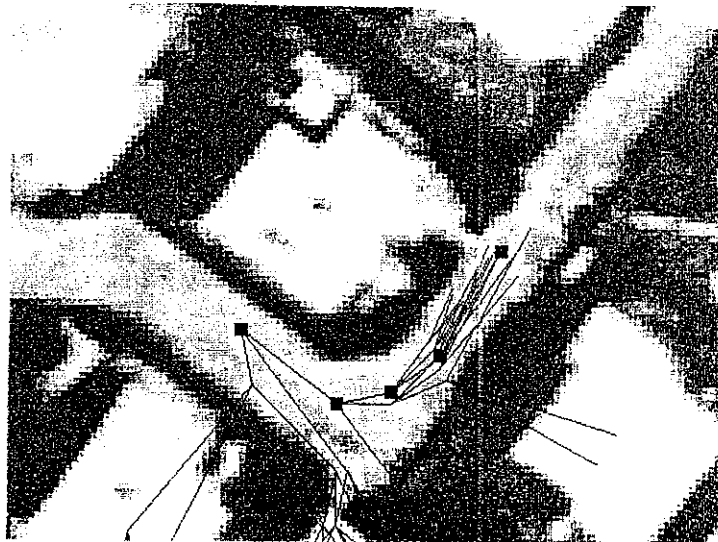


**fig 2 :** Valréas 70 x 70 Variances dans 16 directions pour 3 longueurs de voisinage.  
L = longueur en pixels      l = largeur en pixels

Le nouveau point retenu 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.

### 3.2.2. Contrainte sur la trajectoire :

En fonction des points déjà détectés, on définit des directions de propagation possibles. La direction de propagation est une donnée du suivi et chaque nouveau pas a une liberté angulaire de -45 à +45 degrés. En effet, si la majorité des routes ne nécessitent pas une telle liberté angulaire, il faut au moins prévoir de pouvoir franchir occasionnellement des angles droits, dans les zones urbaines notamment. Il peut donc ici être franchis en deux sauts.



**fig 3 :** Valréas 120 x 80 Franchissement d'un angle droit.

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.

### 3.2.3. Optimisation de la propagation :

La robustesse de l'algorithme est assurée par une optimisation du critère d'homogénéité sur une distance assez grande. On explore, avant de retenir un point, les possibilités futures de propagation en construisant un arbre des chemins possibles basé sur la conservation, à chaque pas, des meilleures directions. Cela permet de fiabiliser le suivi et de franchir de fortes courbures ou des obstacles (changement de revêtement, arbre, ...). Les 3 meilleures directions sont conservées à chaque noeud de l'arbre de recherche et la profondeur généralement choisie est 4.



fig 4 : Valréas 120 x 80 Arbre des chemins possibles.

Le chemin optimal est celui qui minimise la variance, qui minimise la courbure et qui maximise la distance parcourue. Pour ce faire, on minimise un coût associé à chacun des  $n_{bdir} \text{ }^{prof}$  chemins étudiés, calculé de la façon suivante :

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

où :  $n_{bdir}$  = nombre de directions retenues à partir de chaque noeud

$prof$  = profondeur de l'arbre

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

$longueur$  = longueur du segment de la profondeur  $i$

$rigid$  = coefficient de rigidité

$\Delta dir$  = variation d'orientation entre le segment  $i$  et le segment précédent

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.

### 3.2.4. Utilisation du profil radiométrique et de la largeur de route :

L'étude du profil radiométrique transversal 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. Le profil 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 sortir, en vue du recalage global, des indicateurs de confiance sur la géométrie du réseau extrait.

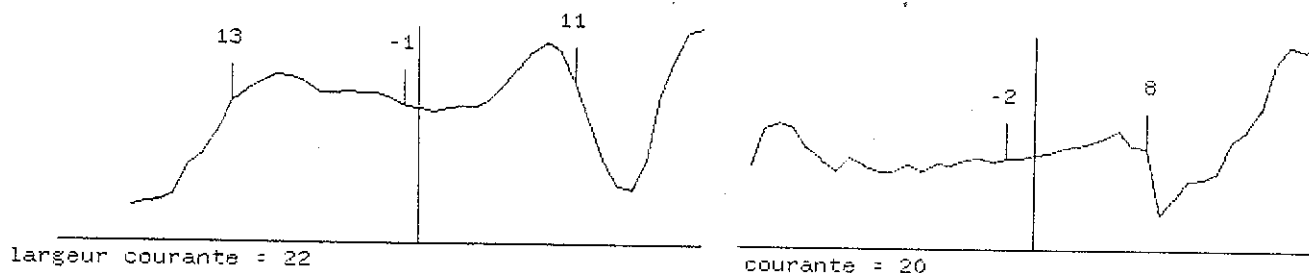


fig 5 : Détermination de l'axe de route d'après le profil radiométrique.

Le premier exemple montre un profil idéal sur lequel il est aisé de reconnaître les bords de la route. De la position des bords, on peut alors déduire deux informations :

- la position de l'axe, entre les deux bords, qui correspond ici à un déplacement de 1 pixel du point étudié.
- la largeur de la route qui va permettre la mise à jour d'une largeur de route courante. Elle était ici de 22 pixels avant l'étude du profil, elle doit être augmentée puisque la nouvelle largeur calculée est de 24 pixels.

Sur le deuxième exemple, on utilise la largeur de route courante pour déterminer la position de l'axe. En effet, l'étude du profil ne permet de reconnaître qu'un seul bord. On recale l'axe à une demi largeur du bord détecté, ce qui correspond ici à un déplacement de 2 pixels.

### 3.2.5. 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.

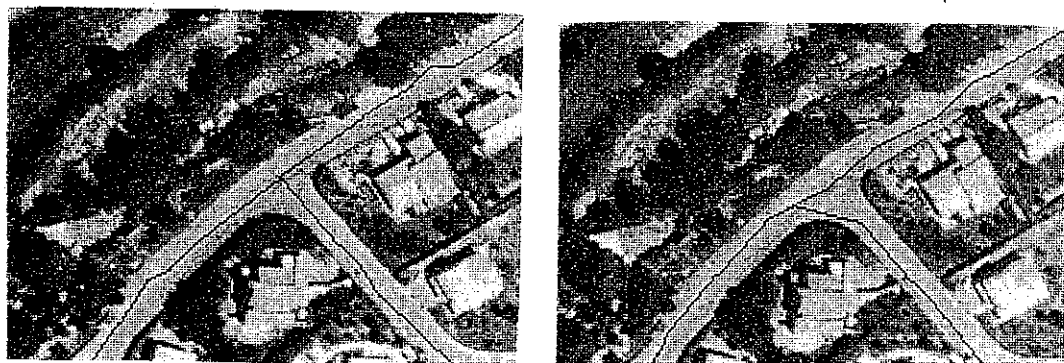


fig 6 : Montpellier 120 x 80 Deux saisies du même carrefour.



## 4. RESTITUTION DES AXES DE ROUTE

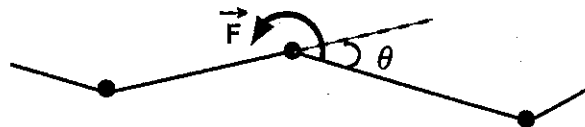
On part donc du principe, pour cette phase, que l'on dispose d'un graphe du réseau routier dont la géométrie est imprécise à une demi largeur de route près. On va chercher à recaler ce graphe sur l'axe des routes en utilisant deux types de connaissances : d'une part la connaissance locale de points de 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 inspirée des algorithmes de contours actifs [WIL92]. Cela revient à assimiler chaque tronçon détecté à une ligne élastique, fixe au niveau des carrefours et soumise à des contraintes, dont on va chercher la position d'équilibre. Les contraintes que l'on définit 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. On cherche à avoir le tracé le plus régulier possible, les contraintes externes se chargeant de maintenir le tronçon sur l'axe de route y compris dans les virages.

- $E_{flex}$  : énergie de "flexion"  
à chaque articulation entre segments, une force tend à les aligner.

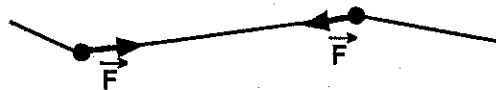


L'énergie de flexion s'exprime sous la forme :

$$E_{flex} = \int_0^{\theta} F d\theta = \frac{1}{2} C_1 \theta^2$$

où  $C_1$  est la raideur d'un ressort placé sur l'articulation

- $E_{elas}$  : énergie "élastique"  
une force tend à réduire la taille des segments.



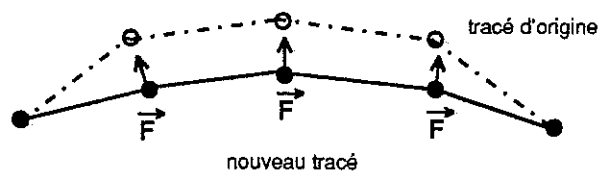
Cette force ne doit pas tendre vers une réduction de la taille de tous les segments (elle aurait alors le même rôle que la force de flexion) mais ne s'applique que sur les segments de taille supérieure à la taille moyenne des segments sur le tronçon. L'énergie élastique s'exprime sous la forme :

$$E_{elas} = \int_{l_{moy}}^l F dl = \frac{1}{2} C_2 (l - l_{moy})^2$$

où  $C_2$  est la raideur d'un ressort placé sur l'axe du segment

## 4.2. les contraintes "externes"

- $E_{dist}$  : énergie de "distance à la position d'origine"  
une force tend à ramener chaque point vers le tracé d'origine.



La fonction d'énergie utilisée est nulle au voisinage de la position d'origine (demi largeur moyenne d'une route) et fortement croissante après.

- $E_{conf}$  : énergie de "confiance dans la géométrie détectée"  
une force tend à ramener les points vers les points de passage probables.



La fonction d'énergie utilisée est nulle aux points de passage probables et croit d'autant plus fortement à leur voisinage que la probabilité qui leur est attachée est grande.

### Recherche des points de passage probables :

- analyse du profil : 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 de façon claire 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.

- 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 permettront d'interpoler la position de l'axe.

Un essai a été réalisé à partir d'une segmentation par délimitation de bassins versants. On utilise ensuite la connaissance que l'on a de l'homogénéité des routes en fusionnant entre elles toutes les zones non homogènes.

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. 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.



fig. 7 : Montpellier 512 x 512  
segmentation

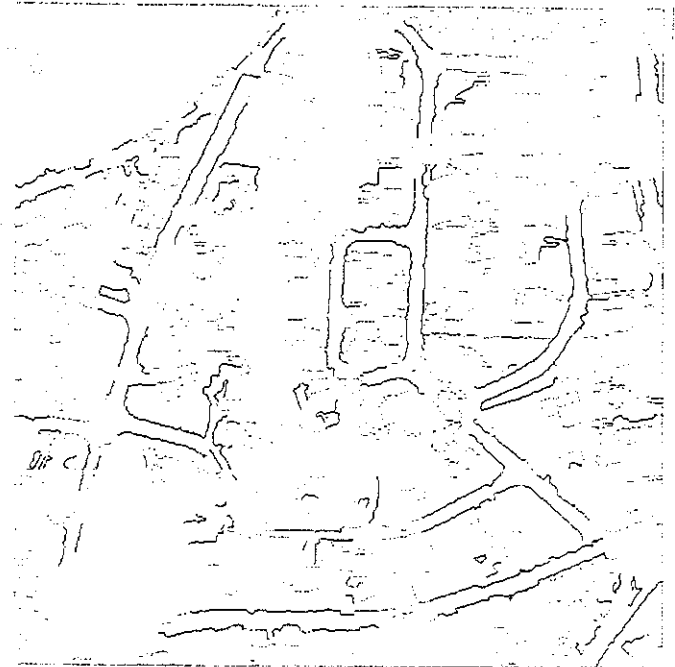


fig. 8 : Montpellier 512 x 512  
détection de bords parallèles

### 4.3. l'énergie totale

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

$$E_{totale} = \sum_{ij} \left( E_{flex}(i,j) + E_{elas}(i,j) + E_{dist}(i,j) + E_{conf}(i,j) \right)$$

## 5. RESULTATS

### 5.1. la détection

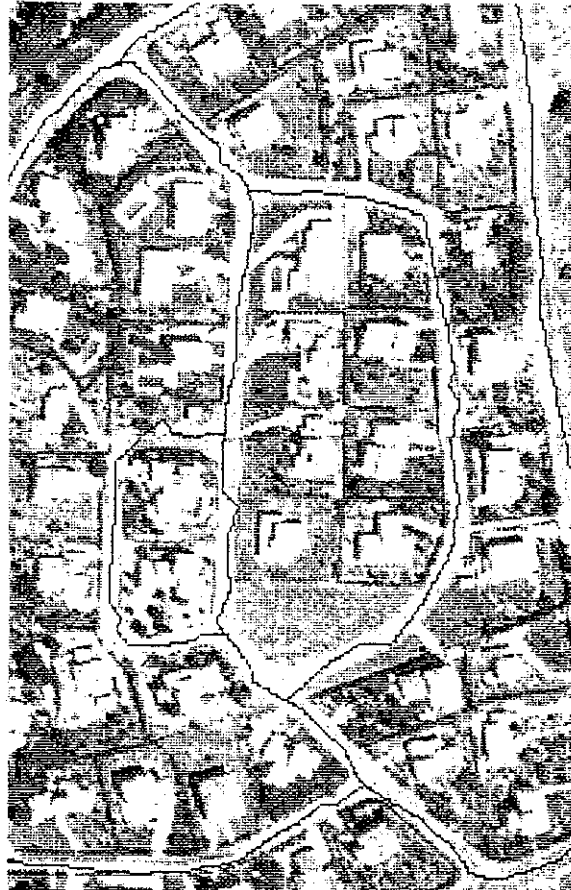


fig. 9 : Montpellier 200 x 250  
détection brute avec saisie  
manuelle des amorces de route.

## **les améliorations possibles :**

### ■ mieux formaliser les règles d'application des différents critères :

Les règles qui permettent de choisir les tailles de voisinage, de déterminer le chemin optimal ou d'interrompre la propagation gagneront sans doute à être mieux formalisées. Il faut également penser à joindre au critère d'arrêt des possibilités de retour en arrière -- repartir d'une position antérieure en empruntant un chemin différent -- et d'extrapolation -- voir si derrière un obstacle on ne retrouve pas une route propre..

### ■ considérer non plus le chemin optimal mais un ensemble de chemin optimaux :

Il sera sans doute possible d'exploiter l'information contenue dans la géométrie de l'arbre autant que dans les mesures d'homogénéité qu'il contient. En effet, en caractérisant la dispersion des points autour d'une courbe régulière, la séparation éventuelle des points en plusieurs populations ayant une faible dispersion, on disposerait d'indicateurs de confiance semble-t'il assez fiables sur le fait qu'il y ait une route, qu'il y ait un carrefour. On extrairait alors la géométrie d'un chemin moyen.

### ■ 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**

### **la fonction d'énergie sur les points de passage probables :**

On utilise pour cela des indicateurs calculés pendant le suivi. En chaque point provenant de la détection, une valeur rend compte de l'importance des discontinuités radiométriques rencontrées orthogonalement à la direction de propagation.

Sur l'illustration ci-dessous, on a effectué une convolution du semi de point obtenu avec une gaussienne puis on a visualisé le résultat avec une fonction périodique, les courbes fermées imbriquées correspondant à des pics de confiance :

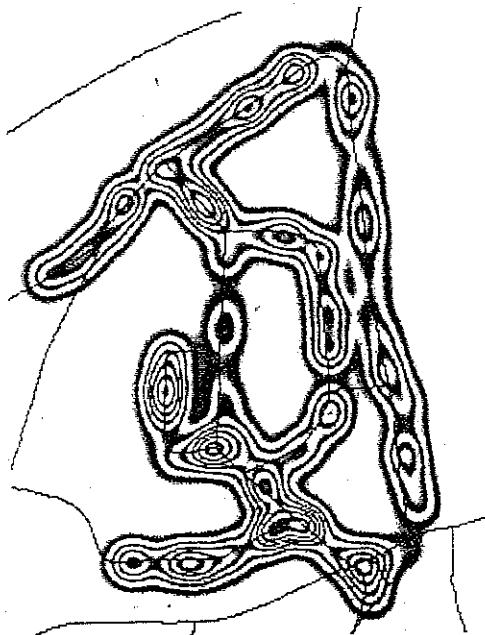


fig. 10 : Montpellier 250 x 350  
confiance dans la géométrie du suivi  
avec saisie BDtopo manuelle

En minimisant la fonction d'énergie totale sur l'ensemble des tronçons, on obtient le résultat suivant qui nous donne une représentation du réseau routier assez conforme à celle que l'on peut trouver dans une saisie manuelle de la BDtopo :

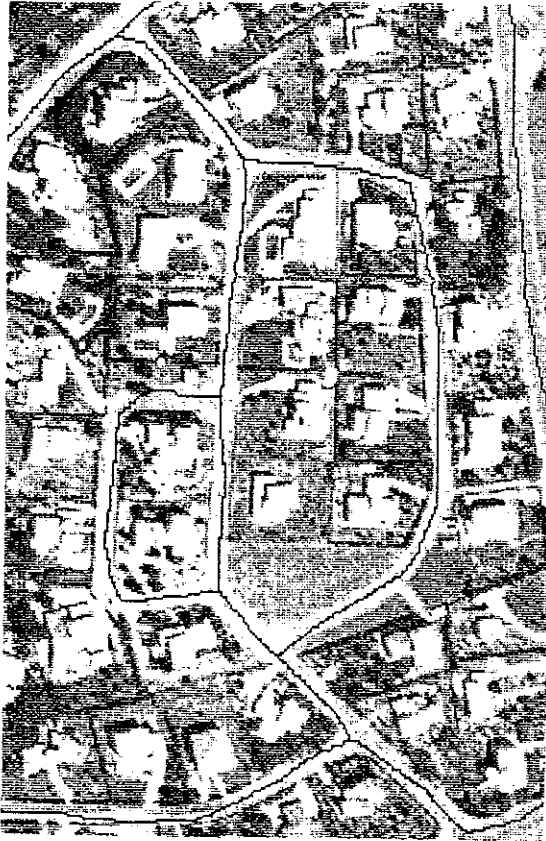


fig. 11 : Montpellier 200 x 250  
réseau après lissage

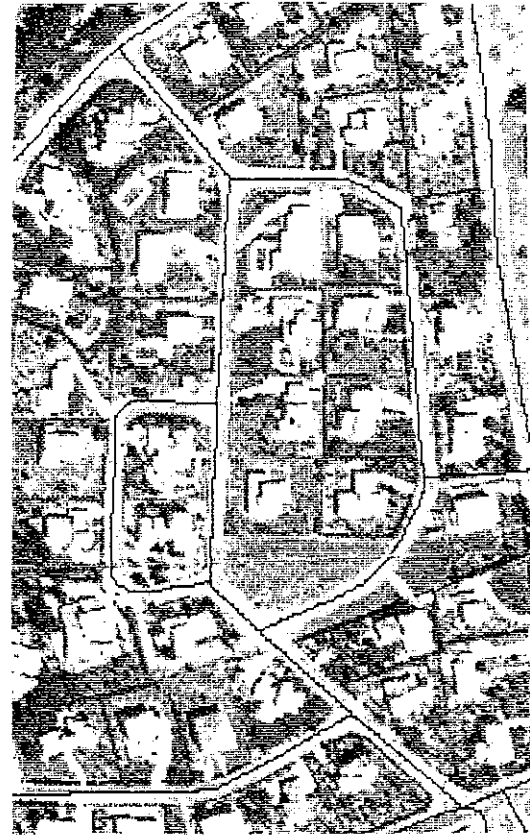


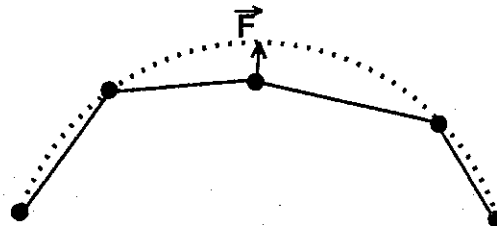
fig. 12 : Montpellier 200 x 250  
BDtopo

### Les améliorations possibles :

- introduction de modèles de courbes dans la fonction d'énergie :

Les contraintes internes que nous avons utilisées tendent toujours à réduire les courbure 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 le tronçon par des arcs de cercle en cas de forte courbure.

$E_{\text{cercle}}$  : énergie de "distance au cercle"  
une force tend à déplacer chaque point vers le meilleur cercle.



La fonction d'énergie utilisée pourrait être une fonction du résidu sur le rayon du cercle dans un calcul du type moindres carrés.

#### ■ fiabilisation des analyse de profils :

Les mesures de confiance que nous obtenons d'après le profil radiométrique sont pour l'instant très locales et indépendantes des profils voisins le long de la route mais on obtiendra des mesures sans doute plus fiables en comparant chaque nouveau profil à un modèle de profil mis à jour au cours du suivi. [McK88] [GUN91]

#### ■ représentation des carrefours :

Les carrefours ne sont pour l'instant pas traités puisqu'ils sont pris comme points fixes. Il sera indispensable de les traiter et l'on peut parfaitement imaginer une méthode identique basée sur la minimisation d'une fonction d'énergie, en définissant de nouvelles énergies propres aux carrefours.

## 5. CONCLUSION

Chacun sait qu'il sera difficile d'obtenir, à court comme à moyen terme, de bons résultats dans ce 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'une des raisons pour lesquelles notre approche semble intéressante est qu'elle permet de déboucher "naturellement" sur des solutions interactives sans remettre en cause des ambitions à plus long terme. En effet, on peut envisager de tester dans un avenir proche l'apport d'un processus de saisie où la phase de détection serait prise en charge par un opérateur -- saisie manuelle grossière -- et où la phase de restitution serait prise en charge par la machine.

## Références

- [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, pp. 201-223, 1981.
- [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 processing, pp. 347-358, 1982.
- [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.
- [GUN91] M.E. DE GUNST, "Automatic extraction of roads from Spot images", graduation report, Delft University of Technology, july 1991.
- [GEM91] D. GEMAN & B. JEDYNAK, "Detection of roads in Spot satellite images", working paper, INRIA, march 1991.
- [WIL92] D. WILLIAMS & M. SHAH, "A fast algorithm for active contours and curvature estimation", Image understanding, vol. 55, No. 1, pp. 14-26, january 1992.
- [GUN92] M.E. DE GUNST & M.J.P.M. LEMMENS, "Automatized updating of road databases from scanned aerial photographs", XVII ISPRS Congress, Washington, august 2-14, 1992.