

Développement d'une méthode semi-automatique pour l'extraction de Réseaux Routiers à partir des images satellites

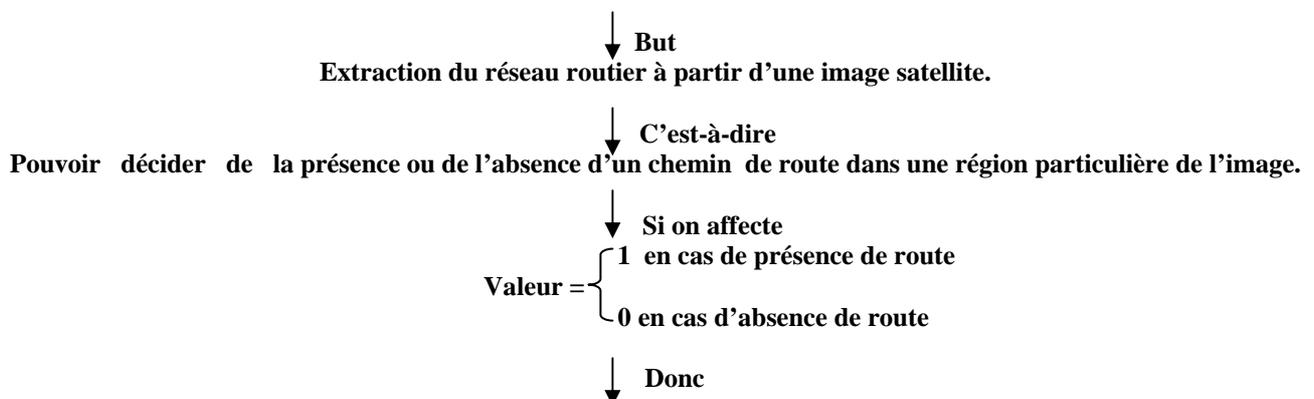
BACHARI¹N. I., NOUGRARA² Z. and BENYETTOU² A.

1 Département de physique,
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran,
B.P 1501 Bir el djir Oran 31000, Algérie .
bachari10@yahoo.fr

2 Département d'informatique,
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran,
B.P 1501 Bir el djir Oran 31000, Algérie.

1. Introduction

L'extraction des réseaux routiers à partir d'images satellites met en œuvre des critères nombreux et complexes grâce auxquels on peut extraire l'information recherchée, ceci dans des domaines variés, on peut citer comme exemples : domaine militaire, cartographie pour l'aménagement urbain des routes, contrôle du réseau routier en cas des catastrophes naturelles (inondation, tremblement de terre, ensablement, enneigement, guerre, etc.), contrôle de la densité de la circulation routière, etc. L'interprétation totale d'une scène réelle, présente une complexité algorithmique importante. Les images sont généralement riches en détails et les quantités de données fournies au système d'interprétation sont trop importantes pour envisager une interprétation globale, [1,2,3,4,5]. Le problème posé est de savoir s'il est possible d'extraire les routes en tenant compte de certaines difficultés telles que : dimension réduite de l'information route, présence d'obstacles qui peuvent cacher l'information route, confusion avec d'autres structures tels les canaux, les rivières, etc. Deux catégories sont généralement distinguées. Les méthodes locales qui se basent sur le critère radiométrique de l'image, ont pour objectif la classification des pixels comme appartenant soit à la zone route ou à la zone hors route. On peut citer : détecteurs de contours génériques, détecteurs de lignes de crêtes, opérateurs morphologiques [6,7,8]. Les méthodes globales qui s'appuient sur les critères radiométrique et spatial de l'image, ont pour objectif la détection partielle du réseau routier. On peut citer : méthodes basées sur la théorie des graphes et méthodes basées sur des modèles statistiques et géométriques, [1,9,10,11,12,13.]



Trouver une solution au problème d'extraction \Leftrightarrow Trouver une configuration binaire X.

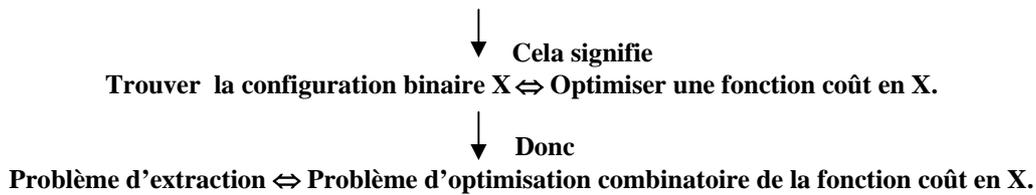


Fig. 1: Principe général de la méthode d'extraction

2. Méthodologie D'extraction

Notre approche est un développement de la méthode proposée par B. Jedynak [1]. Elle est résumée par le schéma (Fig. 1). Les connaissances que nous avons utilisées pour l'extraction du réseau routier reposent à la fois sur l'aspect radiométrique des routes pour le calcul local de l'homogénéité et leur aspect spatial (largeur, orientation et connexité) afin de compléter le processus d'extraction.

2.1 Algorithme d'extraction

L'algorithme d'extraction comporte deux phases essentielles :

- La première consiste à générer une collection de chemins possibles et à les évaluer grâce à une fonction de coût sur l'homogénéité d'éléments de route afin de conserver le meilleur chemin. 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. Le chemin optimal est celui qui minimise la variance calculée dans les directions de propagation possibles sur des voisinages allongés de longueur et de largeur variables, qui maximise la distance parcourue et qui est le plus rectiligne. Pour ce faire, nous devons détecter des éléments homogènes puis des composantes linéaires de route.
- La seconde permet de combiner les résultats obtenus dans la première phase (ensemble de chemins de route) en s'appuyant sur un opérateur morphologique (la transformation ensembliste : union) afin d'obtenir une image dont les objets sont que les routes. Pour évaluer les performances de la méthode développée, nous choisissons une image de haute résolution spatiale. L'image choisie représente une région d'Oran (Algérie) prise par le satellite Indien IRS1-C .



Fig. 2 : Image originale

3. Extraction D'une Route

3.1 Calcul local de l'homogénéité : La détection d'éléments homogènes de route nécessite la construction de quatre masques pour chacune des directions : 0 , $\pi/4$, $\pi/2$ et $3\pi/4$. On reconnaît pour chaque masque une zone route et deux zones hors route. Il s'agit de mesurer pour chaque masque : l'homogénéité relative à l'intérieur de la zone route du masque et l'hétérogénéité relative entre la

zone route du masque et la zone hors route. Soit S un système de voisinage. Une clique c est un sous-ensemble non vide de S, tel que deux points distincts de c sont voisins. Les différents masques sont représentés dans la table1 suivante.

Nombre de cliques de la zone route et les deux zones hors route respectivement	13	5	5
Coordonnées de chaque clique de la zone route et les deux zones hors route respectivement	(-2,0) (-2,1) (-1,0) (-1,1) (0,0) (0,1) (1,0) (1,1) (2,0) (2,1) (-2,0) (-1,0) (-1,0) (0,0) (0,0) (1,0) (1,0) (2,0) (-2,1) (-1,1) (-1,1) (0,1) (0,1) (1,1) (1,1) (2,1)	(-2,-1) (-2,0) (-1,-1) (-1,0) (0,-1) (0,0) (1,-1) (1,0) (2,-1) (2,0)	(-2,1)(-2,2) (-1,1)(-1,2) (0,1) (0,2) (1,1) (1,2) (2,1) (2,2)

Nombre de cliques de la zone route et les deux zones hors route respectivement	9	5	5
Coordonnées de chaque clique de la zone route et les deux zones hors route respectivement	(2,2) (2,1) (-2,-1) (-1,1) (-1,-1) (-1,0) (-1,0) (0,0) (0,0) (0,1) (0,1) (1,1) (1,1) (1,2) (1,2) (2,2) (2,2) (2,3)	(-2,-3)(-2,-2) (1,2) (1,1) (0,-1) (0,0) (1,0) (1,1) (2,1) (2,2)	(-2,-1) (-2,0) (-1,0) (-1,1) (0,1) (0,2) (1,2) (1,3) (2,3) (2,4)

Nombre de cliques de la zone route et les deux zones hors route respectivement	13	5	5
Coordonnées de chaque clique de la zone route et les deux zones hors route respectivement	(0,-2) (1,-2) (0,-1) (1,-1) (0,0) (1,0) (0,1) (1,1) (0,2) (1,2) (0,-2) (0,-1) (0,-1) (0,0) (0,0) (0,1) (0,1) (0,2) (1,-2) (1,-1) (1,-1) (1,0) (1,0) (1,1) (1,1) (1,2)	(-1,-2) (0,-2) (-1,-1) (0,-1) (-1,0) (0,0) (-1,1) (0,1) (-1,2) (0,2)	(1,-2) (2,-2) (1,-1) (2,-1) (1,0) (2,0) (1,1) (2,1) (1,2) (2,2)

Nombre de cliques de la zone route et les deux zones hors route respectivement	9	5	5
Coordonnées de chaque clique de la zone route et les deux zones hors route respectivement	(2,-2) (2,-1) (2,-1) (1,-1) (1,-1) (1,0) (1,0) (0,0) (0,0) (0,1) (0,1) (-1,1) (-1,1) (-1,2) (-1,2) (-2,2) (-2,2) (-2,3)	(2,-3) (2,-2) (1,-2) (1,-1) (0,-1) (0,0) (-1,0) (-1,1) (2,1) (2,2)	(2,-1) (2,0) (1,0) (1,1) (0,1) (0,2) (-1,2) (-1,3) (-2,3) (-2,4)

Table1 : différents masques pour les directions 0, $\pi/4$, $\pi/2$ et $3\pi/4$

3.2 Critère d'homogénéité : Soient : P : ensemble des sites pixels de l'image originale.

x_p : valeur radiométrique du pixel p, $x_p \in \{0, \dots, 255\}$.

K : direction de propagation de p, $k \in \{0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4\}$.

En chaque site p on calcule la valeur r_p vérifiant le critère d'homogénéité de la manière suivante:

Soient : R_k , R'_k et R''_k : zone route, 1^{ère} zone hors route et 2^{ème} zone hors route respectivement.

N_k , N'_k et N''_k : nombre de cliques de la zone R_k , entre la zone R_k et R'_k et entre la zone R_k et R''_k respectivement. S_k , S'_k et S''_k : valeurs permettant de mesurer l'homogénéité à l'intérieur de R_k , l'hétérogénéité relative entre R_k et R'_k et l'hétérogénéité relative entre R_k et R''_k , respectivement, obtenues par :

$$\begin{aligned}
 S_k &= \sum_{\langle i,j \rangle \in R_k, j \in R_k} \varphi(|x_i - x_j|) / N_k \\
 S'_k &= \sum_{\langle i,j \rangle \in R_k, j \in R'_k} (1 - \varphi(|x_i - x_j|)) / N'_k \\
 S''_k &= \sum_{\langle i,j \rangle \in R_k, j \in R''_k} (1 - \varphi(|x_i - x_j|)) / N''_k
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Où

$$\varphi(|x_i - x_j|) = \begin{cases} 1 - (|x_i - x_j|/t) & \text{si } |x_i - x_j| \in [0, t] \quad (t \text{ valeur arbitraire}) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

Pour chaque direction de propagation k , on calcule la valeur minimale suivante:

$$\min_k = \min (S_k, S'_k, S''_k) \quad (3)$$

La valeur r_p correspond au maximum des quatre valeurs \min_k correspondant aux quatre directions de propagation : $0, \pi/4, \pi/2$ et $3\pi/4$.

$$r_p = \max (\min_{k=0}, \min_{k=\pi/4}, \min_{k=\pi/2}, \min_{k=3\pi/4}) \quad (4)$$

Afin de pouvoir éliminer les valeurs trop faibles des r_p , on détermine pour chaque site p , des points adjacents qui se trouvent dans la même direction et autour de lui (voir fig. 8). Le nombre des points adjacents correspond au paramètre f qui définit la taille de la fenêtre fxf comme nous le verrons dans la section suivante : Si le site p correspond à la valeur maximale des valeurs radiométriques de tous les points adjacents alors sa valeur r_p est conservée sinon elle est mise à zéro.

3.3 Résultats : Le résultat de cette étape est une image numérique où les routes présentes sur l'image originale sont détectées mais apparaissent difficilement à cause du flou dû aux autres objets comme les obstacles (arbres, véhicules, etc.). L'image d'éléments homogènes de route (Fig. 3) obtenue sera utilisée d'une part pour le seuillage (le but: détection des points de rupture) et d'autre part pour la détection de composantes linéaires de route (le but: avoir une indication sur la localisation et l'orientation du tracé de route).



Fig. 3: Image d'éléments homogènes de route de l'image de la figure 2 avec $t=40, f=2$

3.4 Seuillage : Dans le but de diminuer le coût en temps de calcul, nous avons appliqué un seuillage sur l'image d'éléments homogènes de route obtenue dans la section précédente; ce type de méthodes prend en considération uniquement les valeurs de niveaux de gris d'un point pour décider de son appartenance au chemin de route. En effet, l'idée est de segmenter l'image en deux régions: route et non route. Le seuillage nécessite deux seuils, car il est difficile d'obtenir un seuil global pour toute l'image: Si un point que l'on considère un élément de route se trouve entre les deux seuils choisis sa valeur est 0 sinon sa valeur est 255.

3.5 Résultat : Le résultat de cette étape est une image binaire de valeurs 0 et 255. Les routes présentes sur l'image originale sont mieux détectées dans le cas où celle-ci est une image semi-urbaine que dans le cas d'une image urbaine (Fig. 4).



Fig. 4 : Seuillage de l'image de Fig. 3 entre les deux seuils 50 et 170

3.6 Détection de composantes linéaires de route : Le principe de cette étape est le suivant :

Tout d'abord on segmente l'image d'éléments homogènes de route en fenêtres de taille $f \times f$ (chaque fenêtre va représenter un point de passage du tracé de route), puis on associe à chaque couple de fenêtres une droite passant au mieux par tous les points des deux fenêtres en utilisant la transformée de Hough:

$$\xi = (y-y_0) \cdot \cos\theta - (x-x_0) \cdot \sin\theta \quad (5)$$

où, ξ : distance orthogonale signée de la droite au point (x_0, y_0) , elle doit être discrétisée en ξ^1, \dots, ξ^m . m est fixée.

(x_0, y_0) : point origine que l'on situe entre les deux fenêtres.

$\theta \in]-\pi/2, \pi/2[$: angle formé par la ligne droite et l'horizontale, il doit être discrétisé en $\theta^1, \dots, \theta^n$. n est fixée.

3.7 Résultat: Le résultat de cette étape est un vecteur Y , information de vraisemblance pour la présence d'un segment de route, d'autant plus proche de la valeur 1 que l'extraction en chaque couple de fenêtres a été bonne ; cette information est obtenue en normalisant la plus grande valeur des points ayant même angle $\theta^p \in \{\theta^1, \dots, \theta^n\}$ et même distance $\xi^q \in \{\xi^1, \dots, \xi^m\}$, entre 0 et 1.

3.8 Choix du meilleur chemin de route: Un chemin de route sera défini par une ligne brisée qui est une chaîne de segments reliés entre eux. Elle est déterminée par les points de rupture définissant les segments, qui ajuste au mieux sur les détections locales d'éléments homogènes de route. En effet, on veut reconstituer la forme d'un objet courbe (tracé de route) après sa numérisation. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de trouver le moyen de construire des courbes à partir d'éléments plus petits: des segments de courbes qui pourraient être dessinés à partir de petits segments de droite. La robustesse de l'algorithme du choix du meilleur chemin de route est assurée par un module de traitement qui utilise deux informations provenant d'une part de l'image binaire obtenue par seuillage (détermination des points de rupture) et d'autre part de l'image segmentée (une optimisation d'une fonction coût dont l'objectif est de disposer d'un vecteur binaire X pour la localisation exacte d'une route à chaque couple de fenêtres de l'image traitée).

Fonction coût et optimisation: La fonction coût proposée par B. Jedynak est écrit de la manière suivante :

$$H(X, Y) = G(X, Y) + \lambda V(X) \quad (6)$$

où : $G(X, Y) = \sum_{s \in S} X_s (c - Y_s)$

$c \in [0, 1]$, s est un couple de sites-fenêtres et S est un graphe composé d'un ensemble d'arcs joignant deux sommets voisins (un couple de fenêtres).

$V(X)$ est une fonction décrivant les contraintes de régularité que l'on s'impose a priori. $V(X) = 0$ pour une configuration X qui est un chemin sur le graphe S .

$\lambda \in [0,1]$ un paramètre servant à forcer la connexité d'une configuration en un site malgré une mauvaise détection de segment de route en ce site. L'algorithme d'optimisation est issu des algorithmes de recherche du plus court chemin dans un graphe valué. Il consiste à optimiser la fonction coût définie au-dessus sous la contrainte $V(X)=0$ et à calculer la configuration X définie comme suit: $X = \text{Argmin}_{X, V(X)=0} G(X, Y)$.

Une configuration route réalisant le minimum de la fonction coût $H(X, Y)$ en X est équivalente au meilleure vraisemblance d'une probabilité P en X . La fonction P est définie de la manière suivante :

$$P(X) = (\sum_{s \in S} X_s Y_s) / (\sum_{s \in S} X_s) \quad (7)$$

d'où l'algorithme d'optimisation s'écrit comme suit :

Choix d'une valeur initiale c , $c \in [0,1]$.

Calcul de $X'_c = \arg \min_X \sum_{s \in S} X_s (c - Y_s)$.

Si $c = P(X'_c)$ alors $X = X'_c$ sinon $c = P(X'_c)$ et aller à 2.

3.9 Extraction précise du chemin de route: Nous proposons à ce stade une méthode assez efficace qui permet l'extraction précise du chemin de route.

La méthode est décomposée en deux étapes: détermination des points de passage du tracé de route et liaison entre chaque deux points par utilisation de la notion de connectivité. Tout d'abord, les points de passage (points de rupture) sont déterminés comme ceux possédant une valeur de niveau de gris 0 (pixels provenant de l'image binaire obtenue par seuillage et qui sont situés sur le tracé de route) dont la position est donnée par la saisie manuelle (la saisie manuelle des nœuds du réseau routier est rapide par rapport aux autres thèmes cartographiques comme bâtiments, végétations, etc. [14] malgré qu'elle présente le désavantage de ne pas être très performante au niveau de la réduction de la quantité de données) et qui doivent satisfaire le critère de choix (les points ont la même direction de propagation et appartiennent aux fenêtres où il y a une localisation exacte d'une route assurée par le résultat de l'optimisation de la fonction coût). Ensuite, le traçage de la courbe est réalisé par une modélisation de celle-ci par une somme de plus petits segments de courbes qui pourraient être dessinés à partir de petits segments de droite.

3.10 Modélisation: Etant donné les points $P_0(x_0, y_0), \dots, P_n(x_n, y_n)$, on souhaite trouver une courbe passant par ces points, soit $f(z)$ cette courbe:

$$f(z) = \sum_{i=0}^n (P_i * \varphi_{i,n}(z)) \quad (8)$$

où $0 \leq z \leq 1$ et $\varphi_{i,n}(z)$: petits segments.

Algorithme

Fixer le nombre de nœuds n .

Entrer le point de départ P_0 et le point d'arrivée P_n .

Répéter

Déterminer le point suivant P_i .

Si le critère de choix est satisfait (de même direction que le précédent et appartient à une fenêtre où il y a une localisation exacte d'une route) alors on retient ce point sinon choisir un autre point. Jusqu'à ce que le nœud d'arrivée soit atteint.

$$f(z) = \sum_{i=0}^n (P_i * \varphi_{i,n}(z)).$$

Remarques: Pour la définition de la fonction $\varphi_{i,n}(z)$, de nombreux polynômes existent, on peut citer: Lagrange, Hermite, Bernstein, etc. Pour notre cas nous avons choisi le polynôme de Bernstein. Plus n est suffisamment grand, plus qu'il y aura une bonne extraction. Si la route n'était

pas limitée des deux points supports (initial et final), le risque d'affectation de points d'image à une classe erronée pourrait être important. Cette situation conduirait à une mauvaise extraction de la zone route.

3.11 Résultat: Le résultat de cette étape est une image comportant un chemin de route. C'est un résultat satisfaisant en le comparant avec l'image originale (Fig.5).

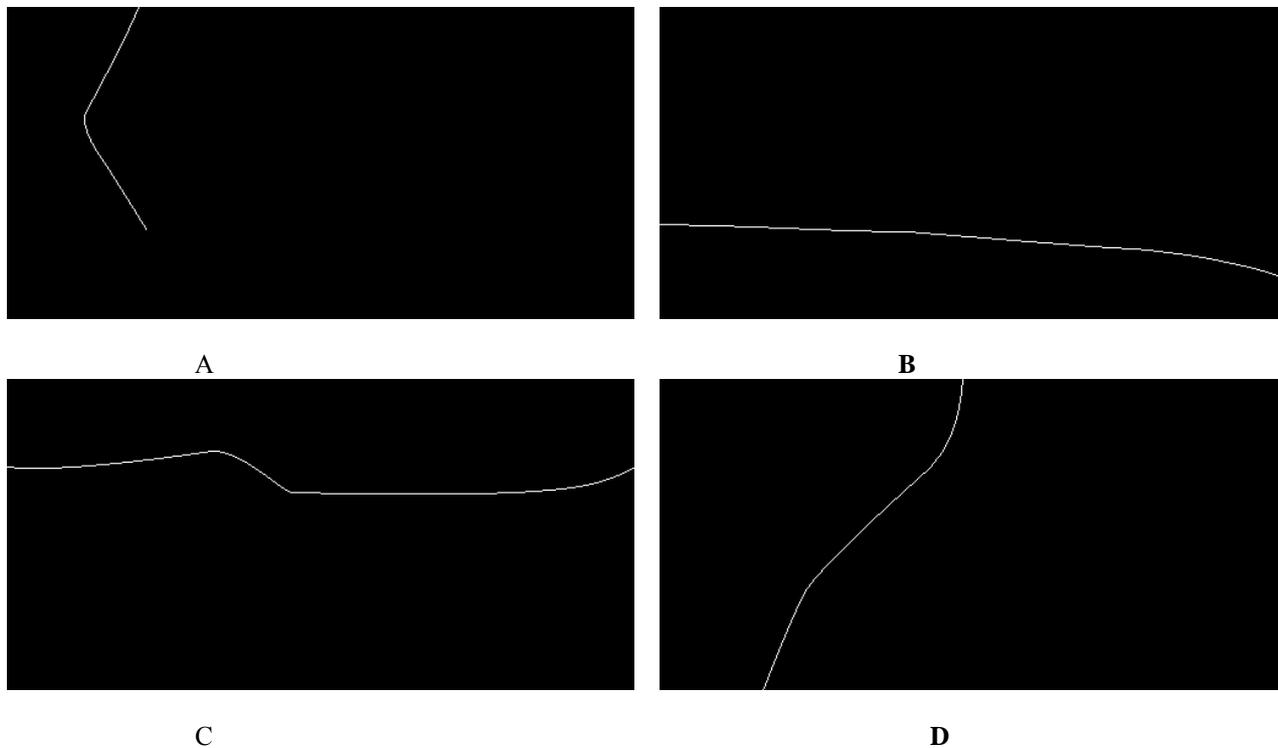


Fig. 5 : Extraction précise d'une route de l'image de Fig. 2

4. Réseau routier

Afin de pouvoir générer la méthode d'extraction définie dans la première phase, nous proposons dans cette partie une approche basée sur le principe de la morphologie mathématique, [8], [15] qui se base seulement sur des connaissances radiométriques des routes. La morphologie mathématique consiste à définir des objets comme ensembles de pixels et à étudier la forme de ces objets et les relations qui existent entre eux à l'aide de transformations ensemblistes (dilatation, érosion, ouverture, fermeture, union, intersection, etc.). La transformation ensembliste que nous avons utilisée est l'union.

Algorithme: L'algorithme de l'extraction est le suivant :

- Parcourir toutes les images dont chacune d'elles comporte seulement un chemin de route (résultat de la première phase) en parallèle.
- Examiner les nœuds correspondants et construire la nouvelle image: Si les nœuds sont noirs alors le nœud résultant est noir. Si les nœuds sont blancs alors le nœud résultant est blanc. Si l'un des nœuds est noir alors le nœud résultant est noir [2].

4.1 Résultats et discussion

Le résultat de cette phase est une image comportant plus qu'un chemin de route (un réseau routier). Pour visualiser ce résultat (Fig. 6), on applique l'opérateur morphologique l'union sur les images A, B, C et D de Fig. 5.

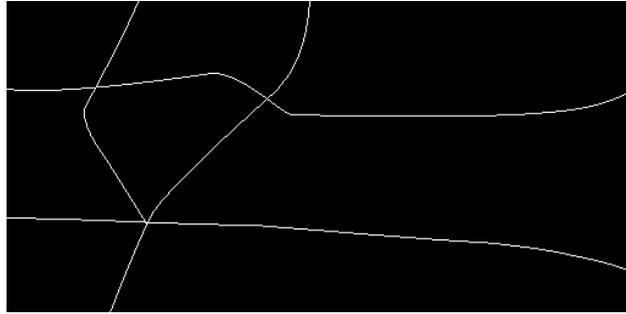


Fig. 6 : Extraction d'un réseau routier de Fig. 2

Afin de pouvoir discuter sur le résultat obtenu, on superpose le graphe du réseau routier de Fig. 6 sur son image originale de Fig. 2 en utilisant l'opérateur morphologique union. On prend le graphe négatif de Fig.6 (on inverse les couleurs) afin que le réseau routier extrait apparaisse mieux sur l'image originale (Fig.7).



Fig. 7 : Superposition de l'image de Fig. 6 sur son image originale

Les segments de route de couleur noir représentent le réseau routier superposé sur l'image originale. Le résultat est très satisfaisant.

5. Conclusions

Nous avons présenté dans cet article une approche issue d'un développement de la méthode de détection de réseaux routiers à partir d'images satellites proposée par B. Jedynak. Cette approche est systématique, elle apporte des solutions aux difficultés rencontrées dans des méthodes existantes actuellement et tient compte des améliorations apportées par les autres chercheurs. Elle traite le problème d'extraction du réseau routier d'une manière générale en tenant compte des caractéristiques tant locales que globales des réseaux routiers. La méthode systématique comporte deux phases : La première phase consiste à générer une collection de chemins possibles, de longueur suffisante pour être significative à l'échelle d'une route et à les évaluer grâce à une fonction de coût sur l'homogénéité d'éléments de route afin de conserver le meilleur chemin. 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. Le chemin optimal est celui qui minimise la variance calculée dans les directions de propagation possibles sur des voisinages allongés de longueur et de largeur variables, qui maximise la distance parcourue et qui est le plus rectiligne. Ce chemin est extrait en s'appuyant d'une part sur des données externes, des points de passage (points de rupture qui sont situés sur le tracé de route de l'image obtenue par seuillage) dont la position est donnée par la saisie manuelle (la saisie manuelle des nœuds du réseau routier est rapide par rapport aux autres thèmes cartographiques comme bâtiments, végétations, etc. malgré qu'elle présente le désavantage de ne pas être très performante au niveau de la réduction de la quantité de données) et qui doivent satisfaire le critère de choix (les points ont la même direction de propagation et appartiennent aux fenêtres où il y a une localisation exacte d'une route assurée par le résultat de l'optimisation de la fonction coût). Et d'autre part, en modélisant le tracé de route par une somme de plus petits segments de courbes qui pourraient être dessinés à partir de petits segments de droite (on raccorde tout nouveau point détecté au reste du chemin, au point le plus proche dans la direction de propagation). La seconde phase permet de générer la méthode d'extraction définie dans la première phase dont l'objectif est d'obtenir une image de réseau routier en s'appuyant sur le principe de la morphologie mathématique qui se base seulement sur des connaissances radiométriques des routes. L'opérateur morphologique que nous avons utilisé est la transformation ensembliste union.

Références :

- [1] B. Jedynak, " Utilisation de techniques et modèles stochastiques pour des problèmes de détection et de reconnaissance de formes. Détection de réseaux routiers à partir d'images satellites ", Document établi en exécution du contrat 89/1563 passé par la Direction des Recherches Etudes et Techniques, Direction Scientifique/Section soutien de la recherche, Délégation Générale pour l'armement.
- [2] Z.Nougrara, A.Benyettou and N.I.Bachari, "Methodology for road network extraction in satellite image ", Journal of Applied Sciences 6 (10):2185-2192, 2006
- [3] J. G. Postaire, " De l'image à la décision ", Ed. DUNOD, 1987.
- [4] C. Weber, " Images satellitaires et milieu urbain", Ed. Hermès, Paris, 1995.
- [5] T. Y. Young and K. S. Fu, " Handbook of pattern recognition", Academic Press, USA, 1986.
- [6] N. Selmaoui, " Les lignes de crêtes dans les images à niveaux de gris : Contribution de la prétopologie et de la classification automatique à leur détection. Taxinomie des méthodes", Thèse de Doctorat, Institut National des sciences appliquées de Lyon, 1992.
- [7] M. Daoud, C. Roux and A. Hillion, " Une application de la théorie des graphes à l'extraction automatique des réseaux de communication dans les images SPOT ", GRETSI, pp. 699-701, Jun. 1989.
- [8] I. Destival, " Morphologie mathématique appliquée aux images des satellites de télédétection ", Deuxième colloque image, traitement, synthèse, technologie et applications, Nice, Avril 1986.
- [9] N. Merle and J. Zerubia, " A Curvature-dependent energy function for detecting lines in satellites images ", Eighth SCIA Conf., May. 1993.
- [10] S. Airault and O. Jamet, " Détection et restitution automatique du réseau routier sur des images aériennes ", Traitement du signal, vol.12, no. 2, 1995.
- [11] M. Barzohar and D. B. Cooper, " Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric stochastic models and estimation ", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 18, no. 7, July. 1996.
- [12] F. A. Decarva Lho Gomes, " Utilisation d'algorithmes stochastiques en apprentissage " Thèse de Doctorat. Univ. Des sciences et techniques du Languedoc. Montpellier II, 1992.
- [13] S. Kirkpatrick, C. Gelatt et M. Vecchi, " Optimization by simulated annealing", IBM Research Report 9353, 1982.
- [14] S.Yu, Marc Berthod and Gérard Giraudon, " Toward Robust Analysis of Satellite Images Using Map Information – Application to Urban Area Detection ", IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 37, no. 4, July. 1999.
- [15] R.M. Haralick, S.R. Sternberg and X. Zhuang, " Image Analysis Using Mathematical Morphology ", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. PAMI-9, no. 4, July 1987.