

Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen
Département de Génie Electrique et d'Electronique
Faculté de Technologie

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister

DE L'ECOLE DOCTORALE DE TECHNOLOGIE ET APPLICATIONS SPATIALES

Spécialité: Télécommunications et Informatique Spatiales

Présenté par :

Melle HAOUZI Badra

Thème

**Extraction de réseaux linéiques à
partir des images à haute résolution**

Soutenu en 07 Décembre 2011 devant le jury composé de :

Pr	Fethi Tarik	BENDIMRAD	Président
Dr	Med Amine	CHIKH	Examineur
Dr	Hassane	BECHAR	Examineur
Pr	Abdelhafid	BESSAID	Encadreur
Mme	Lamia	CHAOUECHE RAMDANE	Co-Encadreur

Année Universitaire 2011-2012

Résumé

Extraction de réseaux linéiques à partir des images satellitaires à haute résolution spatiale.

Le présent mémoire aborde le problème de l'extraction de réseaux linéiques (en particulier le réseau routier) à partir des images satellitaires à haute résolution spatiale en milieu rural. Nous avons proposé deux techniques d'extraction du réseau. Dans la première méthode nous avons mis au point un algorithme de segmentation basée sur la Morphologie Mathématique : la Ligne des Partage des Eaux (LPE), qui permet la détection des bords parallèles de la route ainsi que l'extraction de son axe médian (le squelette) d'une manière robuste et efficace. La deuxième méthode est basée sur la localisation ou bien la détection de manière quasi automatique des portions rectilignes de route de la scène. Cette méthode de localisation utilise un filtrage de Canny pour la détection de contours sur lequel est appliqué l'algorithme de transformée de Hough bien connu pour l'extraction des segments de droite.

Mots clés : La cartographie, extraction de réseaux linéiques (réseau routier), images satellitaires à hautes résolutions spatiales, segmentation LPE, la transformée de Hough.

Abstract

Extraction of line networks from satellite images with high spatial resolution.

This thesis trait the problem of extracting line networks (in particular the road network) from satellite images with high spatial resolution in rural areas. We proposed two techniques for extracting the network. In the first method we have developed a segmentation algorithm based on mathematical morphology: Line of Watershed, which allows the detection of parallel edges of the road and the extraction of the median line (the skeleton) of a robust and efficient manner. The second method is based on the location or the detection of almost automatically drive straight portions of the scene. This method uses location filtering to Canny edge detection which is applied the Hough transform algorithm known for the extraction of line segments.

Key-words: The cartography, extraction of linear networks (road network), satellite images with high spatial resolution, segmentation LPE, the Hough transform.

ملخص

شبكات استخراج خط من صور الأقمار الاصطناعية مع القرار المكانية العالية.

هذه المذكورة يعالج مشكلة استخراج شبكات الإنترنت (خاصة شبكة الطرق) من صور الأقمار الصناعية لقرار مكانية عالية في المناطق الريفية. اقترحنا اثنين من التقنيات لاستخراج الشبكة. في الأسلوب الأول وضعنا خوارزمية التجزئة على أساس التشكل الرياضية: خط مساقط المياه (EPA)، والذي يسمح للكشف عن حواف موازية للطريق واستخراج خط الوسط (الهيكال العظمي) من بطريقة قوية وفعالة. ويستند الأسلوب الثاني على الموقع أو الكشف عن ما يقرب من أجزاء محرك تلقائيا مباشرة من مكان الحادث. يستخدم هذا الأسلوب تصفية لكشف مكان حافة حكيم الذي يتم تطبيق خوارزمية تحويل هوغ المعروفة لاستخراج شرائح الخط.

كلمات البحث: رسم الخرائط، واستخراج شبكات الخط (وخاصة شبكة الطرق)، وصور الأقمار الاصطناعية مع قرار مكانية عالية، وتجزئة وكالة حماية البيئة، وتحويل هوغ.

TABLE DES MATIERES

Listes des figures et tableaux

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Système d'Information Géographique

I. Introduction.....	6
I.1 La cartographie.....	7
I.1.1. la carte	7
I.2 Système d'Information Géographique	8
I.2.1 Définition	8
I.2.2 Mais pourquoi faire ?.....	9
I.2.3 Qu'appelle t-on une information géographique ?.....	10
I.2.4 La notion d'échelle.....	11
I.2.5 Types de données géographiques.....	12
I.2.5.1 Données raster.....	13
I.2.5.2 Données vectorielles	13
I.3 Domaine d'application des SIG.....	15

Chapitre II : Etat de l'art en extraction des réseaux

II.1 Les différents types de réseaux.....	16
II.1.1 Quels sont les réseaux d'intérêt ?.....	16
II.1.2 Caractéristiques communes.....	17
II.1.3 Variabilité des réseaux	18
II.2 Caractéristiques des réseaux routiers	19
II.2.1 Caractéristique du réseau routier dans le milieu urbain.....	20
II.2.1.1 Variabilité intra classe de la route.....	20
II.2.1.2 Système d'acquisition.....	21
II.2.1.3 Variabilité inter- classes de la route.....	22
II.2.1.4 Angle de prise de vue.....	23
II.2.1.5 La complexité de la scène urbaine	24
II.2.1.6 Les occlusions et artefacts.....	24
II.2.1.7 Contexte de la route.....	25
II.3 État de l'art sur l'extraction de réseau routier.....	28
II.3.1 Méthodes semi-automatiques.....	28
II.3.1.1 Algorithmes de suivi.....	29
II.3.1.2 Programmation dynamique.....	31
II.3.1.3 Contours Actifs.....	33
II.3.1.4 Analyse multi-résolution de profils transversaux.....	34

II.3.2 Méthodes automatiques.....	35
II.3.2.1 Méthodes de segmentation et de classification.....	35
II.3.2.2 Morphologie mathématique.....	36
II.3.2.3 Détecteurs de lignes.....	37
II.3.2.4 Champs de Markov sur graphe.....	39
II.3.2.5 Banc de filtres.....	40
II.3.2.6 Les réseaux de neurones.....	41
II.3.2.7 Approche multi-résolution.....	41
II.3.2.8 Systèmes d'interprétation.....	43
II.3.2.9 Apport de données cartographiques.....	44
II.4 Conclusion.....	45

Chapitre III : Morphologie Mathématique

III.1 Introduction.....	46
III.2 Quelques propriétés des opérateurs morphologiques.....	47
III.3 Transformation morphologiques élémentaires.....	48
III.3.1 L'éléments structurant.....	48
III.3.2 Erosion et dilatation morphologique.....	49
III.3.3 Le gradient Morphologique.....	51
III.4 Les filtres morphologiques.....	53
III.4.1 Les ouverture et Fermeture morphologique.....	53
III.4.2 Les chapeaux hauts de forme.....	56
III.4.3 Filtres Alternés Séquentiels (FAS).....	57
III.5 Morphologie Mathématique en niveau de gris.....	57
III.5.1 L'érosion et la dilatation en NG.....	58
III.5.2 L'ouverture et la fermeture en NG.....	60
III.6 Le point de vue de l'analyse granulométrique	61
III.6.1 Granulométrie.....	61
III.7 Notions de topologies, de distance et de géodésie	62
III.7.1 Extrema régionaux.....	62
III.7.2 Transformée de distance	63
III.7.3 Les transformations géodésiques et reconstruction.....	63
III.7.3.1 La dilatation géodésique.....	64
III.7.3.2 L'érosion géodésique	64
III.7.3.3 La reconstruction morphologique	65
III.8 Le squelette morphologique	66
III.9 Segmentation Morphologique.....	68
III.9.1 La Ligne des Partage des Eaux.....	68
III.9.2 Définition de la Ligne de Partage des Eaux.....	68
III.9.3 Le calcul de la Ligne de Partage des Eaux	69
III.9.4 Problème de la sur-segmentation	71
III.10 Conclusion	73

Chapitre IV : Extraction du réseau routier : Application

IV.1 Introduction.....	75
IV.2 Les entrées de la méthode.....	76
IV.3 Le processus d'extraction du réseau routier.....	77
IV.3.1 Passage en une image en niveaux de gris (NG).....	79
IV.3.2 Prétraitement des images	80
IV.3.3 Binarisation	82
IV.3.4 La détection des contours de la route par LPE.....	82
IV.3.4 .1 Calcul du gradient morphologique	83
IV.3.4 .2 Recherche des marqueurs internes et externes.....	84
IV.3.5 Modification d'homotopie du gradient (imposition des marqueurs).....	85
IV.4 La squelettisation	88
IV.4.1 Le squelette	88
IV.4.2 L'extraction de l'axe médian de la route à l'aide de la transformation de	92
Ligne de Partage des Eaux	
IV.4.2.1 Le préfiltrage.....	93
IV.4.2.2 Binarisation	94
IV.4.2.3 L'image marqueur.....	95
IV.4.2.4 Détection des lignes de crêtes à l'aide de la LPE.....	96
IV.4 Extraction des routes par la transformée de Hough.....	97
IV.4.1 Généralité sur la transformée de Hough.....	98
IV.4.1.1 Principe.....	98
IV.4.2 Algorithme de la transformée de HOUGH pour la détection de la	99
route.....	
IV.4.2.1 Problème de la transformée de Hough	102
IV.4.2.2 Pré-traitement (Filtrage) : suppression du bruit	103
IV.4.2.3 Détection de contours.....	103
IV.5 Conclusion	109
Conclusion générale et perspectives.....	111
Bibliographie.....	114

Figures

Figure I.1 : Un système d'Information Géographique en six couches.....	9
Figure I.2 : Information géographique.....	11
Figure I.3 : (a) : carte de l'Algérie à l'échelle de 1/200 000, (b) : carte de la ville d'Oran à l'échelle de 1/10 000.....	12
Figure I.4 : Type de données géographiques.....	12
Figure I.5 : (a) : image radar, (b): carte scannée, (c) : image satellite.....	13
Figure I.6 : Les objets géométriques.....	14
Figure II.1 - (a) réseau routier rural sur une image satellite, (b) réseau routier urbain sur une image radar, (c) réseau hydrographique, (d) réseau de fleuves et leurs affluents.....	17
Figure II.2 - Exemples de réseaux, (a) : réseau routier urbain 'San Francisco', (b) : réseau routier rural 'Phoenix'.....	20
Figure II.3 - Changements du milieu.....	21
Figure II.4 - Réseau routier rural d'une image aérienne, 50 cm de résolution.....	22
Figure II.5 - Réseau routier urbain d'une image IKONOS, 1 m de résolution.....	22
Figure II.6 - Occlusions et artefacts inhérents au contexte urbain.....	23
Figure II.7 - Prise de vue oblique.....	23
Figure II.8 - Variabilité d'apparition de la route.....	24
Figure II.9 - Exemples des occlusions.....	25
Figure II.10 - Les contextes locaux, (a) et (b) occlusion et ombre ; (c) Building drive way road segment; (d) véhicule dans la route.....	26
Figure II.11 - Les contextes globaux et locaux.....	28
Figure III.1 - Des éléments structurants de base ; Croix 4-connecte(a), hexagonale 6-connecte(b), carré 8-connecte(c).....	49
Figure III.2 - Effet de la dilatation et de l'érosion morphologique binaire Image binaire(a) ; image érodée (b) ; image dilatée (c).....	51
Figure III.3 - Application du gradient morphologique.....	52
Figure III.4 - Effet d'ouverture et de fermeture morphologique binaire Image binaire(a) ; image ouverte (b) ; image fermée(c).....	55
Figure III.5 - Application de transformation de chapeau haut de forme(b) sur l'image d'origine (a).....	56
Figure III.6 - Opérations morphologiques de base sur les images en NG.....	60
Figure III.7 - Effet d'ouverture de taille croissante sur un ensemble.....	61
Figure III.8 - Granulométrie et mesure.....	62
Figure III.9 - Les extrema régionaux.....	62
Figure III.10 - Transformée de distance d'un ensemble.....	63
Figure III.11 - Application de la reconstruction morphologique. (a) Image originale (masque) (b) Image marqueur. (c, d, e) Reconstruction après quelques itérations. (f) Extraction des objets marqués.....	66
Figure III.12 - Exemples de squelettes.....	67
Figure III.13 - La Ligne de Partage des Eaux.....	69

Liste des figures et tableaux

Figure III.14 - Processus de construction de LPE ;(a)Inondation du relief à partir de ses minima. (b) Quand deux bassins versants se rencontrent, on construit une digue. (c) Ligne de Partage des Eaux finale.....	70
Figure III.15 - Processus de LPE par inondation non contrainte (a), contrainte.....	72
Figure III.16 - Principe de la segmentation par LPE assistée par marqueurs.....	73
Figure IV.1 -Les principales étapes de l'algorithme d'extraction de la route.....	78
Figure IV.2 - Conversion en image en Niveau de Gris (NG) (b) de l'image en couleur (a).....	79
Figure IV.3 -Lissage de l'image : l'image originale en NG (a) ; lissage de l'image (filtre médian) (b).....	81
Figure IV.4 - (a)Résultat de binarisation ;(b) Résultat d'une ouverture surfacique.	82
Figure IV.5 - Effet de sur-segmentation : (a) gradient de l'image filtrée ; (b) calcul de la LPE sur l'image gradient.....	83
Figure IV.6 - Résultat de la segmentation LPE Contrôlée par Marqueurs :(a)Marqueur externe, (b) imposition des marqueurs sur l'image gradient, (c) les deux bassins versants générés par LPE, (d) les lignes de crêtes de LPE correspond aux contours de la route.....	86
Figure IV.7 - Des exemples pour la détections de la route : (a) image de contexte péri-urbain, (b) image de contexte rural, (c) image de contexte urbain.....	87
Figure IV.8 - La squelettisation : (a) le squelette ; (b) superposition du squelette sur l'image d'origine.....	88
Figure IV.9 - Les branches principales (en noir) et les barbules (en gris).....	90
Figure IV.10 - Le principe de l'algorithme proposé par PIERRE SOILLE.....	91
Figure IV.11 - Résultat de l'ébarbulage. (a) le squelette ébarbulé ; (b) superposition du squelette ébarbulé sur l'image origine.....	91
Figure IV.12 - Organigramme d'extraction de l'axe médian de la route par la transformation LPE.....	93
Figure IV.13 - Préfiltrage de l'image en NG(a), par un filtre de Gauss (b).....	94
Figure IV.14 - Seuillage de l'image rehaussée(a) ; Résultat d'une ouverture surfacique(b)	94
Figure IV.15 - (a) l'image binaire ; (b) image marqueur (fonction distance) ; (c) le résultat de l'application de l'opérateur logique ; (d) superposition du résultat sur l'image en NG.....	96
Figure IV.16 -Représentation d'une ligne en utilisant les paramètres θ - ρ	98
Figure IV.17 - Correspondances géométriques entre l'espace image (espace géographique)(a), et l'espace paramétrique de Hough (b).....	99
Figure IV.18 - Organigramme général de la transformée de Hough.....	101
Figure IV.19 - Résultat de pré-traitement ; image filtrée par un filtre de Gauss(b) ; de l'image en NG (a).....	103
Figure IV.20 - Exemple d'application de détection de contour par filtre de Canny (b) sur une image en niveau de gris (a).....	105
Figure IV.21 - Résultat des contours obtenus par filtre de Canny (b) de l'image filtrée (a).....	105
Figure IV.22 - Résultat d'application d'une ouverture surfacique (b) sur l'image contours (a).	106
Figure IV.23 - Résultat de la méthode de détection des bords parallèles de la route par la Transformée de Hough.....	107
Figure IV.24 - Plan transformé H (Plan H).(pas en $\theta = 1$ radian et pas en $\rho = 1$ pixel du plan image).....	107
Figure IV.25 - Plan transformé H (Plan H).(pas en $\theta = 5$ radian et pas en $\rho = 10$ pixel du plan image).....	108

Figure IV.26 - (a) localisation des bords de la route correspondant au plan H de la Fig.IV.24 ; 108
Localisation des bords de la route correspondant au plan H de la Fig.IV.25.....

Tableaux

Tableau II.1 - Les satellites à très haute résolution spatiale et leurs résolutions..... 21
Tableau III.1 - Tableau de comparaison entre érosion et dilatation binaire..... 51
Tableau III.2 - Tableau de comparaison entre ouverture et fermeture binaire..... 55

INTRODUCTION GENERALE

La documentation historique montre que l'humanité a toujours eu besoin de se situer dans l'espace, de s'approprier le territoire, de le connaître, de le gérer et d'apprivoiser ses paysages, de ce fait elle s'est afférée à la création d'outils et techniques en vue de satisfaire ses besoins, l'évolution de ces outils s'est faite de pair avec l'évolution de l'humanité, les développements instrumentaux et technologiques, surtout depuis le début du xxe siècle lié aux besoins militaires reliés à la première guerre mondiale qui ont favorisé la réalisation de nombreuses photographies aériennes à des fins d'identification stratégique, ont permis l'émergence de *la télédétection*.

Lorsque les scientifiques parlent de télédétection, l'objet observé est la terre. En général, pour eux, la télédétection est un moyen pour observer la terre, sa surface, ses océans, son atmosphère et sa dynamique depuis l'espace, en vue de comprendre et de guider les changements futurs, pour réaliser cela l'image de télédétection tant aérienne que satellitaire est sans doute le modèle visuel le plus fidèle et le plus riche de l'espace géographique.

Depuis une dizaine d'années les satellites fournissent aux tématiciens de la télédétection des images de plus en plus nombreuses et de plus en plus riches, ce qui rend l'extraction des informations contenue dans ces images de plus en plus difficile et complexe, cela conduit à l'utilisation des techniques relevant de domaines méthodologiques très divers : traitement et interprétation d'images, reconnaissance des formes et intelligence artificielle.

L'interprétation des images constitue pour les cartographes un outil très important, et parfois indispensable, pour optimiser le temps passé sur le terrain tout en améliorant d'une façon très sensible la précision du document cartographique final. L'étendue des surfaces à cartographier et les délais de mise à jour font du développement d'outils algorithmiques de détection d'items cartographiques un enjeu important. Nous nous intéressons ici à l'utilisation de données satellitaires pour la détection d'objets linéiques. L'item cartographique recherché est constitué des différents réseaux présents dans l'image tels que le réseau routier ou le réseau hydrographique.

L'extraction des réseaux linéiques à partir des images satellitaires, notamment dans le cas particulier des réseaux routiers s'est fait par plusieurs méthodes. Ces méthodes sont semi automatiques permettent une extraction précise et efficace d'une route spécifiée par l'utilisateur. Mais le gain de productivité apporté par ces méthodes est faible par rapport au travail d'extraction menée par un expert.

Par contre, une extraction automatique du réseau se mesure plus en termes d'exhaustivité et de limitation des fausses alarmes alors qu'en terme de précision.

Cependant, l'extraction automatique ou semi-automatique de routes est toujours, à cause de sa complexité, un thème actif de recherche. Avant l'apparition de la très haute résolution spatiale, les méthodes d'extraction développées dans la littérature portaient sur les images satellites dont la résolution est au mieux de 10 m. A ces résolutions, les routes sont représentées par des lignes d'une épaisseur de 1 à 3 pixels, et ces méthodes amènent à une extraction d'un réseau de type linéique [01]. Les routes visibles sur ce type d'images sont les voies de communication principales du réseau routier telles que les routes nationales, les autoroutes ou les boulevards en ville. Les routes secondaires ne sont pas visibles ou ont un aspect fragmenté dans l'image. Lorsque ces travaux sont appliqués à la cartographie urbaine, on parle de

méthodes d'extraction de rues. Avec l'apparition de la très haute résolution spatiale en milieu urbain, la perception des rues passe du linéique au surfacique (plus de 3 pixels de large). Nous entendons que la rue n'est plus représentée par une ligne d'une certaine épaisseur, mais par deux contours parallèles définissant une surface souvent inhomogène en radiométrie (particulièrement dans le cadre urbain).

Notre objectif est le développement d'une méthode automatique d'extraction du réseau routier à partir d'une image satellitaire à haute résolution avec comme contrainte la fiabilité du résultat, mais il paraît illusoire d'espérer générer une reconnaissance avec une fiabilité absolue. Le réseau extrait doit donc forcément être vérifié par un opérateur humain. Pour que cet outil soit réellement utilisable, il faut donc minimiser les fausses détections et surmonter les artefacts qui peuvent parfois occulter certaines parties de la route comme les arbres surplombant la chaussée, les ombres des bâtiments, les véhicules, etc.

Nous visons ainsi à réduire le coût de la main d'œuvre de fabrication des SIG en vue de démocratiser leur utilisation. Le choix de ce thème a été motivé par son utilité et la diversité de ses applications (cartographie urbaine, navigation automatique, recalage des images, etc.).

Enfin, il convient de signaler que l'extraction de réseau routier à partir d'images satellites est un problème difficile, et que cette difficulté s'accroît lorsqu'on travaille sur des images à haute résolution spatiale, la forte urbanisation est aussi un facteur qui rend cette tâche fastidieuse.

La cartographie reste une étape coûteuse et minutieuse, nécessitant la participation d'un expert humain. L'étendue des surfaces à cartographier et les délais de mise à jour ont donc fait de l'extraction des réseaux routiers un enjeu important.

Du point de vue méthodologique, notre travail adopte le problème de l'extraction de réseaux linéiques (en particulier le réseau routier) à partir d'une image IKONOS satellitaire à haute résolution spatiale en milieu rural. Nous avons travaillé sur deux techniques d'extraction. Dans la première méthode nous avons mis au point un algorithme de segmentation issue de la Morphologie Mathématique : la Ligne des Partage des Eaux (LPE), qui permet la détection de la route ainsi que l'extraction de son axe médian (le squelette). La deuxième méthode est basée sur la localisation ou bien la détection des bords parallèles de route de la scène. Notre choix de la méthode de localisation s'est porté sur un algorithme de transformée de Hough.

Organisation du manuscrit

Après cette introduction, nous allons consacrer la suite de ce manuscrit à développer les différents points liés au sujet de notre étude en les répartissant sur quatre chapitres dont leur contenus est décrit par :

1. Le chapitre 1 : est consacré aux notions de base des systèmes d'Informations Géographiques
2. Le chapitre 2 : un panorama de l'extraction de réseaux linéiques à partir d'images satellitaires et aériennes. Le but de ce chapitre est de nous fournir des méthodes de référence pour l'implémentation de notre méthode.
3. Le chapitre 3: une introduction à la Morphologie Mathématique présente des notions importantes pour toute la suite de notre travail. Le lecteur non familier avec la Morphologie Mathématique pourra commencer sa lecture par ce chapitre pour une bonne compréhension de notre propos.
4. Chapitre 4 : Ce chapitre est au cœur de tout notre travail, Nous décrivons de manière plus précise les technique d'extraction des réseaux routiers, en décrivant en détails ces différentes étapes.

Enfin nous allons terminer ce document, par une conclusion sur le travail mené tout le long de ces chapitres, où des remarques seront dégagées, puis des perspectives seront données afin de préparer la voie à ceux qui vont s'intéresser à ce travail pour y porter des améliorations.

I. Introduction

Pour ses applications et ses activités, la ville d'aujourd'hui s'appuie sur l'exploitation d'une carte géographique routière, qui facilite l'exécution de ces applications et garantit une collaboration entre ces activités. L'évolution continue de la ville impose aux géomaticiens d'entretenir et de mettre à jour la carte ou la base de données géographique routière existante, cette mise à jour consiste à détecter les changements au sein du réseau routier de cette ville (les nouvelles routes, correction de la localisation des routes existantes), puis les intégrer dans la carte et la base géographique. Le développement des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et les webservice ont permis la manipulation des bases de données géographiques ainsi que la publication des cartes géographiques via le web.

La ville se définit comme une région géographique complexe en vue du nombre d'acteurs qu'elle contient (routes, bâtiments, arbres, ...), afin d'avoir une vue globale de cette ville, nous faisons recours aux images satellites, qui contiennent un nombre d'informations assez important, qui nécessite une étude approfondie et rigoureuse afin d'extraire le réseau routier.

Les pratiques des SIG se sont répandues dans tous les domaines liés au territoire : cadastre, aménagement, environnement, économie, conservation du patrimoine, etc. Les SIG ne sont plus à voir uniquement d'un point de vue technique : ils sont véritablement à la croisée d'une variété de technologies, de domaines scientifiques, de pratiques professionnelles et d'usages privés et publics dont la combinaison est en train de modifier notre connaissance et notre action sur le territoire.

I.1 La cartographie

Cette discipline regroupe l'ensemble des études et des opérations, scientifiques, artistiques et techniques, nécessaires à l'établissement des plans et cartes. Ou encore c'est une représentation graphique d'une région à l'aide d'objets et de symboles [01].

I.1.1. la carte

La représentation cartographique "la carte", permet la représentation conventionnelle, généralement plane, en position relative, de données géographiques telles qu'un lac, une route, une parcelle, un bâtiment, une forêt, une rangée d'arbres... Elle permet également de mettre en évidence les propriétés de ces objets. Ainsi, les routes seront représentées avec des traits d'épaisseurs ou de couleurs ou de symboles différents en fonction de leur importance (autoroutes, routes nationales, routes communales, chemins, sentiers...); les bâtiments seront hachurés avec des trames ou des couleurs différentes en fonction de leur usage (habitation, école, hôpital...) [60].

Il existe plusieurs sortes de cartes regroupées en deux grands ensembles :

- ✓ **Cartes topographiques** : cartes d'inventaire les plus exhaustives possibles, qui doivent servir de référence et qui représentent les objets observés sur le terrain en fonction de leur valeur intrinsèque (cartes, plans cadastraux...).
- ✓ **Cartes thématiques** : cartes d'analyse et d'étude des relations entre les phénomènes représentés sur la carte comme les cartes statistiques (démographiques ou autres) ou les cartes d'inventaire d'une thématique particulière (cartes forestières, cartes routières, cartes géologiques..).

Une carte est toujours présentée à une échelle constante qui est définie comme le rapport entre une distance mesurée sur la carte et une distance mesurée sur le terrain. Elle permet, par un calcul facile, de passer de la carte au terrain et vice-versa.

Une carte à petite échelle présente généralement une grande portion de territoire avec peu de détails, tandis qu'une carte à grande échelle présente une petite portion de territoire avec beaucoup de détails.

I.2 Système d'Information Géographique

I.2.1 définition

Les SIG se définissent comme des "ensembles de données repérées dans l'espace et structurées de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision" [02].

(Michel Didier, 1990).

- ✓ *"un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement (géoréférencées). L'ensemble des informations géographiques intégrées dans le SIG forment une base de données géographiques."*

(La Société française de Photogrammétrie et de télédétection).

Les SIG rassemblent, au sein d'un outil informatique unique, des données de nature diverses mais localisées dans un espace géographique. Il s'agit d'un outil qui doit permettre une meilleure gestion des données pour le technicien et qui doit apporter une aide à la décision pour les décideurs.

Aujourd'hui, plus de 80 % des informations échangées dans le monde ont une composante géographique. L'information géographique est donc omniprésente pour observer et gérer un territoire, prendre une décision, communiquer des résultats.

En schématisant, un SIG est donc un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) localisées qui comprend une ou plusieurs couches géographiques qui peuvent entretenir des relations entre elles, être croisées, interrogées (voir Fig. I.1).

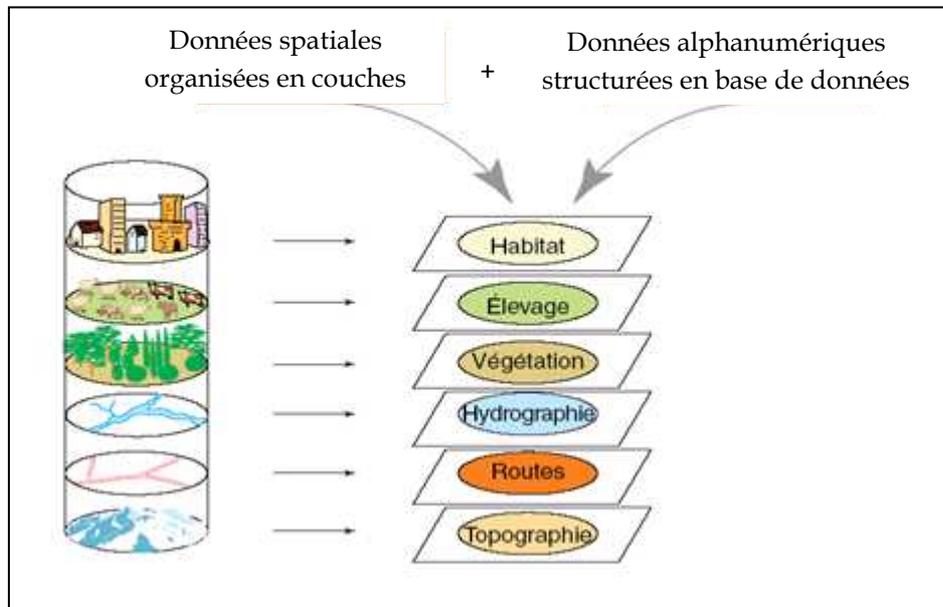


Figure I.1 - Un système d'Information Géographique en six couches [66].

I.2.2 Mais pourquoi faire ?

Les SIG constituent un ensemble organisé de matériel informatique; de logiciels; de données géographiques; et de ressources humaines. Ils permettent :

- la saisie (numérisation),
- la structuration (modélisation),
- le stockage (base de données graphiques et attributaires),
- la gestion (mise à jour),
- la visualisation,
- l'analyse (requête, traitement, simulation),
- la diffusion (production de cartes, exportation et transferts de fichiers, application cartographique dynamique (WebGIS), services de cartes Web.

I.2.3 Qu'appelle-t-on une information géographique ?

L'information géographique décrit des informations relatives à des objets ou des phénomènes réels localisables à la surface terrestre à un moment donné. Elles se présentent sous forme de coordonnées, de noms de lieux, d'adresses postales, de représentations graphiques (cartes, plans...), d'images. Elles permettent de répondre à des questions comme : quelle est la longueur et la pente de tel tronçon de route, la sorte de céréales cultivées sur tel champ, la position et l'adresse de telle école, l'emprise de telle parcelle, l'évolution de la densité de population de telle commune entre 1980 et 2005, etc. ?

D'autre part, l'information géographique est un des éléments qui va permettre de passer d'un "monde réel" à un terrain nominal offrant ensuite les possibilités de traitements et d'analyses informatiques. Les informations géographiques sont acquises, stockées, analysées, visualisées et distribuées à l'aide de systèmes d'information géographique [03]. Une information géographique contient trois composantes :

- ✓ une position sur la surface terrestre,
- ✓ des informations la décrivant,
- ✓ des relations de voisinage avec les autres informations.

La figure (Fig. I.2) présente ce qu'est une information géographique :

- 1 - Des **attributs** : une rivière est décrite par son nom, son débit, sa qualité, ...
- 2 - Sa **position** sur la surface terrestre.
- 3 - Des **relations avec le voisinage** : quelles parcelles longent la rivière ?



Figure I.2 - Information géographique.

I.2.4 La notion d'échelle

L'échelle est le « rapport existant entre une longueur réelle et sa représentation sur la carte », « rapport entre les dimensions ou distances marquées sur un plan avec les dimensions ou distances réelles » (Petit Robert, édition 1995, p 2551). La donnée numérique et les outils de zoom des logiciels permettent une grande liberté dans les échelles de visualisation de la donnée.

Avec les SIG, on parle plutôt d'échelle d'utilisation, c'est à dire le ratio entre l'échelle à laquelle la donnée a été numérisée et les limites de son exploitation. L'échelle d'utilisation dépend de l'usage de la base de données, de la précision géométrique ainsi que de l'exhaustivité des informations géographiques voulues.

Pour construire une base de données de voiries d'un pays nous travaillons avec l'image basse résolution car elle contient les types de voiries nécessaires à l'échelle d'un pays (autoroutes, routes nationales, (voir Fig. I.3.a). Par contre, pour construire une base de données de voiries d'une ville, il faut plus de détails comme les autres types de route (boulevards, avenues), ainsi que l'enrichissement de cette base de données avec l'incorporation d'autres thèmes comme le bâti (voir Fig. I.3.b). Ces détails sont présents dans les images satellite de haute résolution [60].



Figure I.3 - (a) : carte de l'Algérie à l'échelle de 1/200 000, (b) : carte de la ville d'Oran à l'échelle de 1/10 000 [60].

I.2.5 Type de données géographiques

Les informations géographiques, se divise en deux types de données, les données raster et les données vectorielles [67] (Fig. I.4).

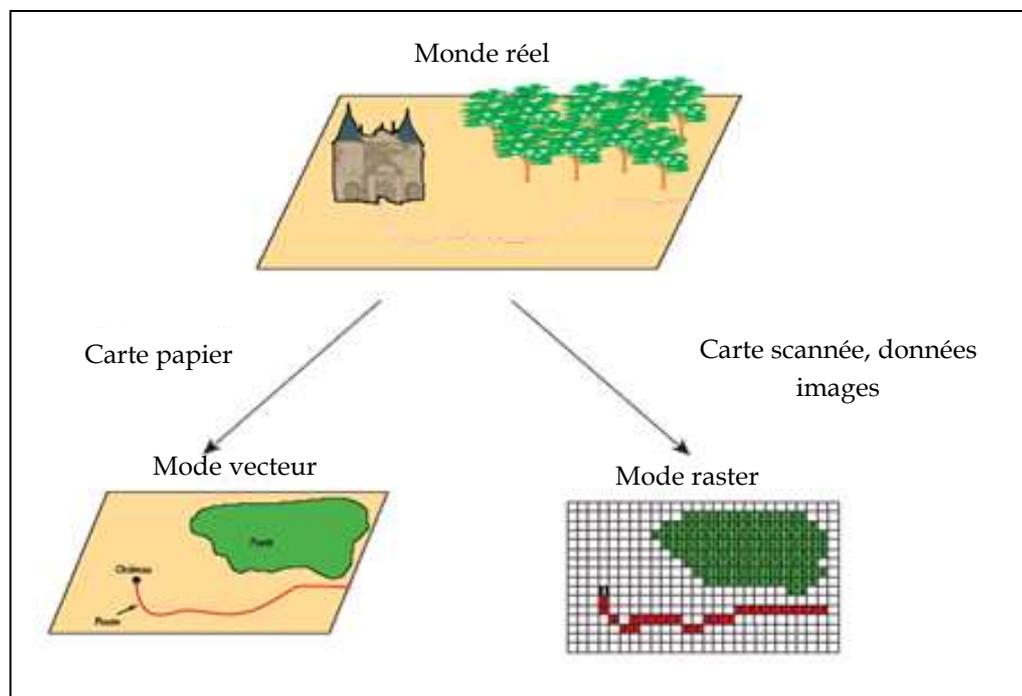


Figure I.4 - Type de données géographiques.

I.2.5.1 Données raster

Les images satellitaires, les photos aériennes, les ortho-photographies et tous les documents scannés sont ce que l'on appelle des données raster. Ces données raster (données matricielles ou données images) sont constituées en fait d'une juxtaposition de cellules élémentaires, appelées pixels, formant une grille régulière ou matrice ; a chaque pixel est affectée une valeur radiométrique en fonction de l'intensité lumineuse lié à la nature des objets dans l'image.

La position de chaque pixel dans la grille est fournie par la position de la ligne et de la colonne à laquelle il appartient ; lorsque chaque pixel est associé aux coordonnées correspondant à l'objet du terrain qu'il représente l'image devient géographique où encore l'image est dite image géoréférencée [66].



Figure I.5 - (a) : image radar, (b) : carte scannée, (c) : image satellite.

I.2.5.2 Données vectorielles

Depuis que l'homme construit des bâtiments et routes pour faciliter son existence, la surface de la terre est parsemée de nombreuses structures géométriques. Il suffit de penser aux autoroutes, aux édifices commerciaux et stationnements, aux chemins de fer ainsi qu'aux maisons pour voir qu'une représentation vectorielle est

tout à fait adéquate pour le stockage de ces types de données extraites d'une image satellitaire. Trois principaux types de données peuvent être représentés par des vecteurs : les points, les lignes et les polygones.

En imagerie satellitaire, les points peuvent représenter des centres d'intérêt spécifiques tels que la position d'une école, le centre d'une ville ou un aéroport. Ce type de représentation permet simplement de localiser l'objet, mais ne donne pas d'indication sur sa taille et sa forme réelles.

Les lignes sont fréquemment utilisées pour représenter les routes, les chemins de fer ainsi que les rivières. Il s'agit simplement d'une série de vecteurs dont le point d'arrivée de l'un est le point d'origine d'un autre. Par contre, le problème d'identification de la largeur d'une route ou d'une rivière demeure présent.

Pour ce qui est des polygones, ils peuvent décrire suffisamment bien les frontières entre des zones administratives, la forme d'un lac et même la structure des bâtiments. Un polygone est composé d'une suite de segments droits dont le dernier se termine au point de départ du premier segment. Divers modèles existent pour représenter des polygones et Gold (1988) [60] explique les principes fondamentaux (Fig. I.6).

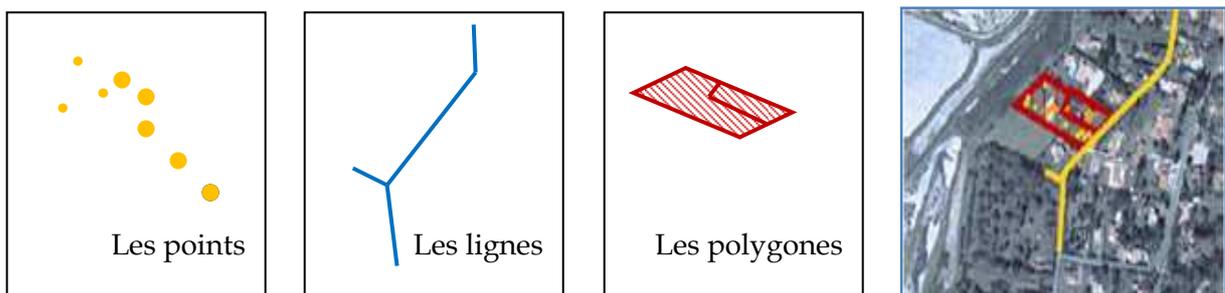


Figure I.6 -Les objets géométriques.

I.3 Domaine d'application des SIG

Les domaines d'application des SIG sont aussi nombreux que variés. Citons cependant :

- Tourisme (gestion des infrastructures, itinéraires touristiques)
- Marketing (localisation des clients, analyse du site)
- Planification urbaine (cadastre, POS, voirie, réseaux assainissement)
- Protection civile (gestion et prévention des catastrophes)
- Transport (planification des transports urbains, optimisation d'itinéraires)
- Hydrologie
- Forêt cartographie pour aménagement, gestion des coupes et sylviculture)
- Biologie (études du déplacement des populations animales)
- Télécommunications (implantation d'antennes pour les téléphones mobiles).

Ce chapitre propose un panorama de l'extraction de réseaux linéiques à partir d'images satellitaires. Sans être exhaustif, il illustre les diverses méthodes utilisées pour l'extraction des réseaux linéiques et surfaciques. Après une description des caractéristiques principales des réseaux d'intérêt et de leur variabilité, nous présenterons les deux catégories de méthodes proposées dans la littérature : les méthodes semi-automatiques par opposition aux méthodes complètement automatiques.

II.1 Les différents types de réseaux

Avant la présentation des différentes approches proposées pour l'extraction de réseaux, il convient de définir ce que nous entendons par réseau, comment apparaissent les réseaux dans les images, quelles en sont les principales caractéristiques et dans quelle mesure ces caractéristiques varient.

II.1.1 Quels sont les réseaux d'intérêt ?

Un réseau se définit comme un ensemble de lignes qui s'entrecroisent plus ou moins régulièrement; tels que le réseau routier et le réseau hydrographique. La figure (Fig. II.1) présente des exemples de réseaux observés en télédétection.

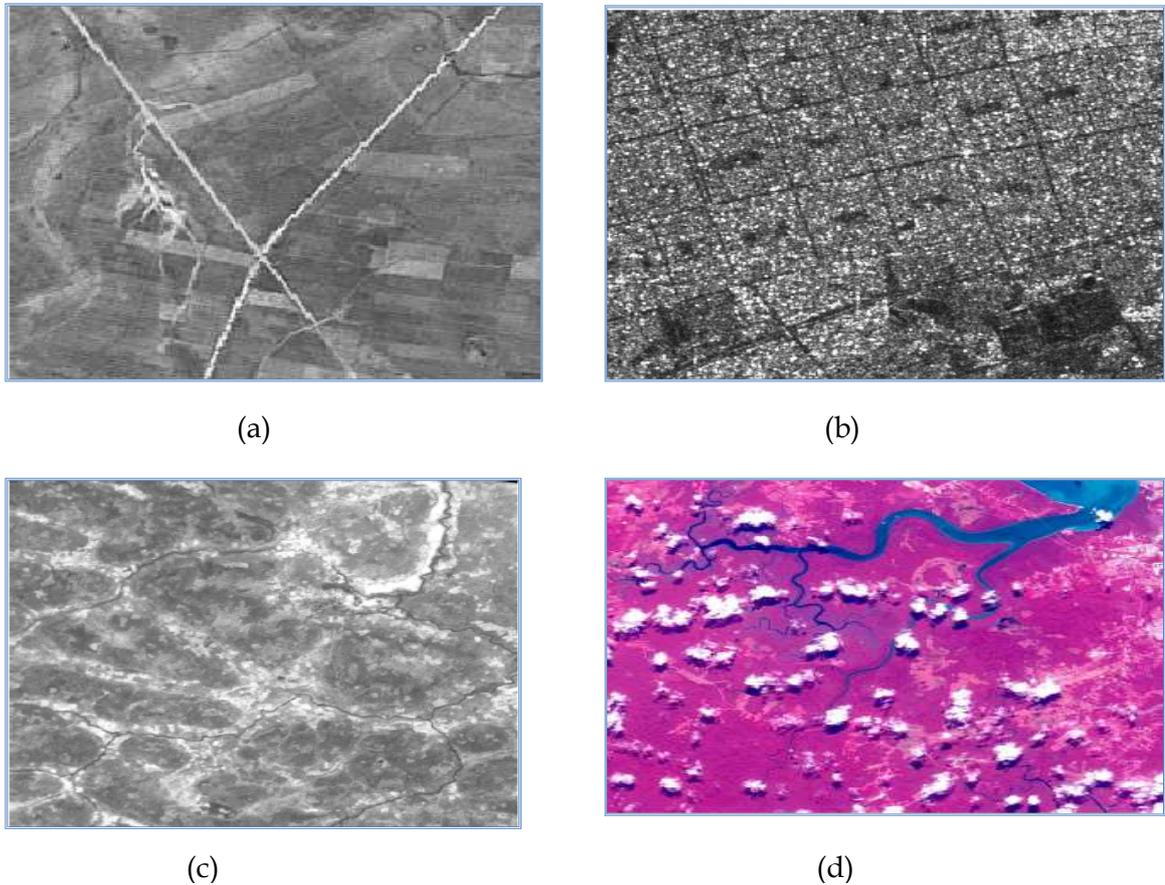


Figure II.1 - (a) réseau routier rural sur une image satellite, (b) réseau routier urbain sur une image radar, (c) réseau hydrographique, (d) réseau de fleuves et leurs affluents.

II.1.2 Caractéristiques communes

Dans tout problème de reconnaissance de forme, il est essentiel de bien définir l'objet ou les objets que l'on cherche à extraire de l'image. Bien qu'il existe une variabilité importante parmi les réseaux d'intérêt, des caractéristiques majeures peuvent être dégagées. Ainsi, les réseaux sont généralement caractérisés par les contraintes **géométriques** suivantes :

G1 : La courbure est faible et son amplitude est fonction du type de paysage et de la viabilité.

G2 : La forme est très allongée et de longueur importante.

G3 : La largeur est constante (et fonction directe de la viabilité).

G4 : La pente est limitée (et prévisible en fonction du terrain).

G5 : La surface est plane.

Des caractéristiques **topologiques** peuvent également être exploitées :

T1 : Les routes s'organisent en réseau.

T2 : Le réseau routier présente peu d'extrémités libres (i.e. non connectées).

T3 : Il est peu redondant (deux points proches sont rarement reliés par deux itinéraires différents).

T4 : Le réseau peut présenter des intersections.

Du point de vue **radiométrique**, deux hypothèses sont constantes quelque soit le type de réseau à extraire :

R1 : Le réseau contraste fortement avec son environnement.

R2 : les variations radiométriques longitudinales sont faibles (le matériau constituant la route étant généralement homogène).

II.1.3 Variabilité des réseaux

Malgré certaines constantes, les caractéristiques géométriques et radiométriques du réseau sont trop variables selon le type d'application. Ainsi, le réseau à extraire pourra être [13]:

- **Linéique** comme les axes routiers ou le centre des vaisseaux ;
- **Surfacique** comme les routes apparaissant comme des rubans de radiométrie homogène ou les vaisseaux sanguins et les fleuves dont la largeur varie progressivement ;
- **Hiérarchique** comme les réseaux hydrographiques constitués de fleuves et de leurs affluents.

Les caractéristiques géométriques et topologiques sont plus ou moins pertinentes selon le type de réseau que l'on cherche à extraire. Par exemple, la faible courbure propre aux réseaux routiers ne se retrouve pas dans le réseau hydrographique.

Quand aux caractéristiques géométriques des réseaux routiers (largeur, courbure, longueur...), on observe également une forte variabilité selon le type de routes que l'on cherche à extraire (autoroutes, routes, rues ou chemins) et leur contexte (rural, péri-urbain, urbain ou forestier). Egalement, les propriétés des réseaux routiers varient d'un pays à un autre. A titre d'exemple, les réseaux routiers présents dans les villes américaines diffèrent fortement de ceux présents dans les villes européennes et nord africaines. En effet, les réseaux américains sont caractérisés par une structure de grille, une particularité qui peut être exploitée de façon efficace lors de l'extraction.

II.2 Caractéristiques des réseaux routiers

1. la radiométrie : la route apparaît homogène le long de son axe avec différence de contraste avec son environnement (Fig. II.2.a). Les variations radiométriques le long des routes sont faibles, la texture est homogène et la route contraste fortement avec son environnement [14], [15].

2. la forme : la route a une forme allongée avec une largeur constante entre ces bords parallèle (Fig. II.2.a). La courbure et la pente sont faibles, ces dernières sont conditionnées par le type de scène.

3. courbure : la courbure des routes est faible sauf dans la présence de carrefour, la route peu contenir des angles droits pour les zones urbaines ou des angles aigus dans les routes de montagne (Fig. II.2.b).

4. la connexité : c'est la caractéristique la plus stable des routes car on ne trouve pas des tronçons de route libre dans le réseau (Fig. II.2), avec la présence d'intersections.



(a)



(b)

Figure II.2 -Exemples de réseaux, (a) : réseau routier urbain 'San Francisco', (b) : réseau routier rural 'Phoenix' [60].

II.2.1 Caractéristique du réseau routier dans le milieu urbain

II.2.1.1 Variabilité intra classe de la route

Le changement de la radiométrie de la route dû au capteur et aux conditions de prise de vue 'météo', induit l'application d'une variété d'algorithmes d'extraction afin de permettre l'extraction dans tous les cas.

On peut constater aussi la grande variabilité de l'apparence de la route en termes de taille, forme, et intensité radiométrique. Dans la (Fig. II.3), la représentation de la route dans le milieu rural est claire et nette, dans le milieu près urbain elle est plus ou moins claire, or dans le milieu urbain elle est parfois indétectable même avec l'œil humain.



Milieu rural



Milieu près urbain



Milieu urbain

Figure II.3 - Changements du milieu.

II.2.1.2 Système d'acquisition

Depuis longtemps, l'image aérienne, acquise par chambre de prise de vue à film argentique, a été utilisée pour l'observation de la terre. Ces images ont été récemment numérisées. Il existe maintenant des cameras numériques aéroportées offrant de très bons résultats, comme il existe aussi depuis peu sur le marché des images satellitaires à très haute résolution spatiale (par exemple avec les satellites SPOT5, Ikonos, Quickbird et EROS) [09]. Le tableau suivant présente les caractéristiques de ces satellites à très haute résolution spatiale.

	SPOT 5	Ikonos 2	Quickbird	EROS 1A
Pays	France	USA	USA	West India Space
Date du lancement	Mai 2002	Septembre 1999	Octobre 2001	Décembre 2000
Altitude	8302 km	681 km	450 km	480 km
Bande panchromatique	2,5 m - 5 m	0,82 m	0,61 m	1m - 1,8 m
Bande multispectrales	10 m	3,28 m	2,44 m	-
Vocation	Occupation du sol, occupation urbaine et physiographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie
Particularité	Très grande précision spatiale	Très grande précision spatiale	Très grande précision spatiale	Grande précision spatiale

Tableau II.1 - Les satellites à très haute résolution spatiale et leurs résolutions.

L'augmentation de la résolution spatiale permet d'extraire la route avec une meilleure précision géographique et une meilleure identification des différents types de voies de communication en se basant sur l'aspect géométrique de la route plutôt que sur l'aspect radiométrique. La contre partie de la haute résolution est l'augmentation du bruit dans l'image, rendant l'extraction plus difficile.

Dans la figure (Fig. II.4) la route apparaît en brillant or dans la figure (Fig. II.5) elle apparaît en sombre, donc sur quel caractéristique va se fonder pour la discrimination de l'algorithme d'extraction ?



Figure II.4 - Réseau routier rural d'une image aérienne, 50 cm de résolution.



Figure II.5 - Réseau routier urbain d'une image IKONOS, 1 m de résolution.

II.2.1.3 Variabilité inter- classes de la route

L'existence d'objets ayant la même structure et caractéristiques radiométrique que la route (toit d'immeuble, parking...) peuvent fausser le résultat de l'extraction en rendant le processus de discrimination et de séparation entre ces objets difficile (Fig. II.6) [01].

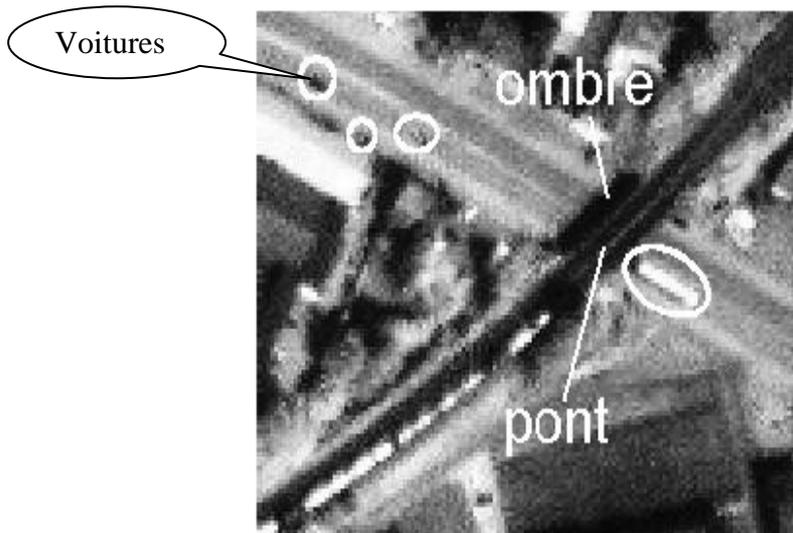


Figure II.6 - Occlusions et artefacts inhérents au contexte urbain.

II.2.1.4 Angle de prise de vue

La position du capteur du satellite sur la zone imagée influe sur l'apparition de ses objets. La figure (Fig. II.7) illustre bien l'importance de l'angle de prise de vue. Une bonne image est celle captée quand le satellite est nadir par rapport à la zone imagée c'est-à-dire quand il est perpendiculaire à la zone imagée [01].

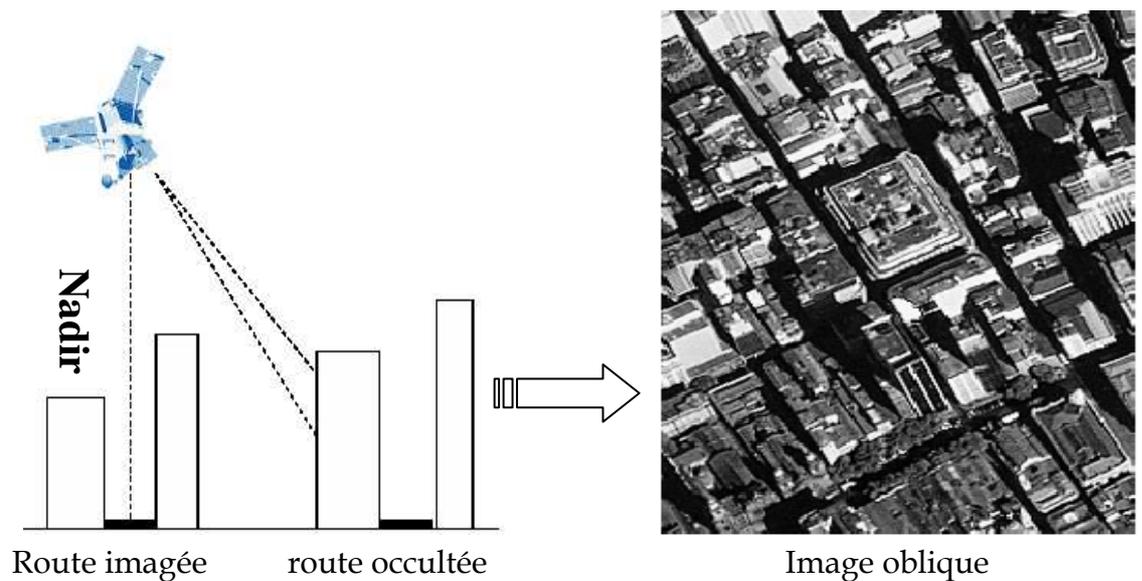


Figure II.7 - Prise de vue oblique.

II.2.1.5 La complexité de la scène urbaine

Ce problème est une caractéristique du milieu urbain, la multitude des types de routes existantes tel que les boulevards, les rues, les ruelles, avec présence des intersections, des ronds-points, des carrefours et des ponts qui rendent l'extraction plus difficile à cause du chevauchement.

La figure (Fig. II.8) illustre la variabilité et la complexité de l'apparition de la route dans le milieu urbain.



Figure II.8 - Variabilité d'apparition de la route.

II.2.1.6 Les occlusions et artefacts

Le contexte urbain a une structure complexe comme l'existence de véhicules dans la route, Les ombres portées des arbres et des immeubles qui vont influencer sur la radiométrie de la route et sa largeur qui pourra diminuer le taux de l'extraction (Fig. II.9) [10].

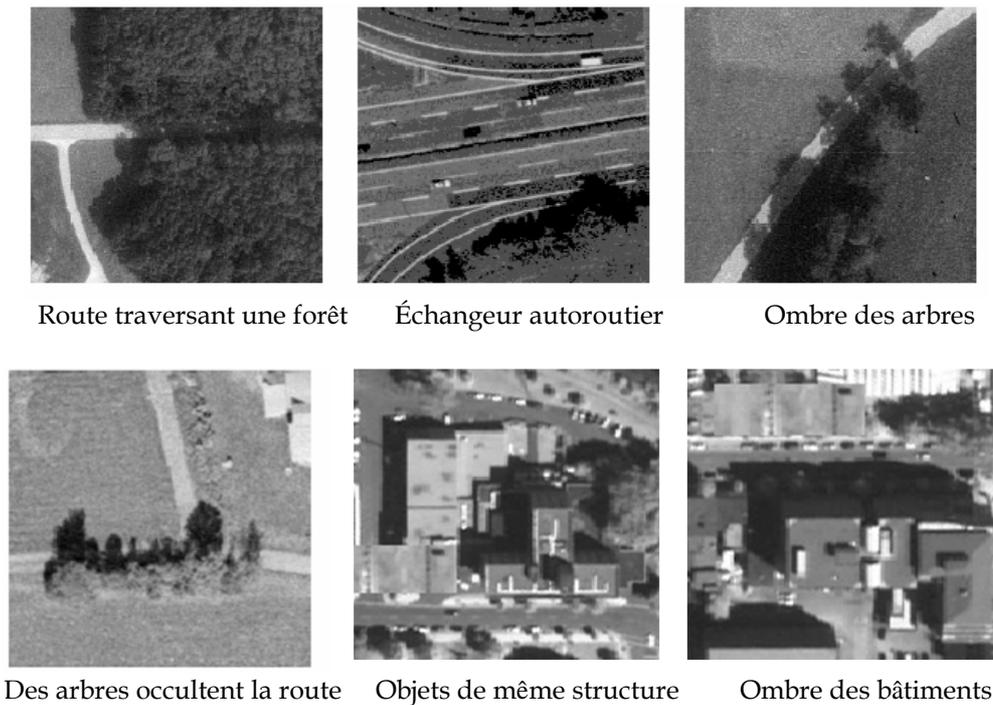


Figure II.9 - Exemples des occlusions.

II.2.1.7 Contexte de la route

Généralement comme tout objet la route est caractérisée par un certain nombre de caractéristiques tel que les caractéristiques radiométriques, géométriques et topologiques, qui sont étudié par rapport à l'environnement de la route qui est constitué de divers objets qui interagissent ensemble dans un contexte bien défini.

Ce contexte décrit d'une part les relations entre la route et les objets de son environnement ; parmi ces objets on peut citer les bâtiments, les arbres et les véhicules (par exemple : il existe généralement une route à tous Bâtiment), et d'autres part influence de cette interaction sur le rendement du processus d'extraction de la route (par exemple : un bâtiment occulte une partie d'une route; les toits pourrait ressembler aux routes). Cette interaction entre l'objet route et les autres objets de l'environnement sont modélisés localement et globalement.

➤ **Contexte local**

Dans ce contexte, les interactions entre la route et les objets de son environnement sont modélisées de telle façon à montrer les interactions qui rendent l'extraction de la route difficile, par exemple les chemins de champs agricoles ou les voitures individuelles dans les zones rurales, les allées d'immeubles, les trottoirs et les pistes cyclables sont parallèles aux routes dans les zones péri-urbaines et urbaines. Ce qui peut entraver le processus d'extraction de route [11].

La figure (Fig. II.10), illustre quelques contextes locaux, prenant par exemple le contexte (a) qui modélise la situation où un bâtiment occulte une partie de la route provoquant la détection de deux segments déconnectés de la même route. Ces contextes basiques peuvent être agrégés pour former un contexte local plus complexe dans lequel, par exemple l'interaction du contexte (a) et (b).

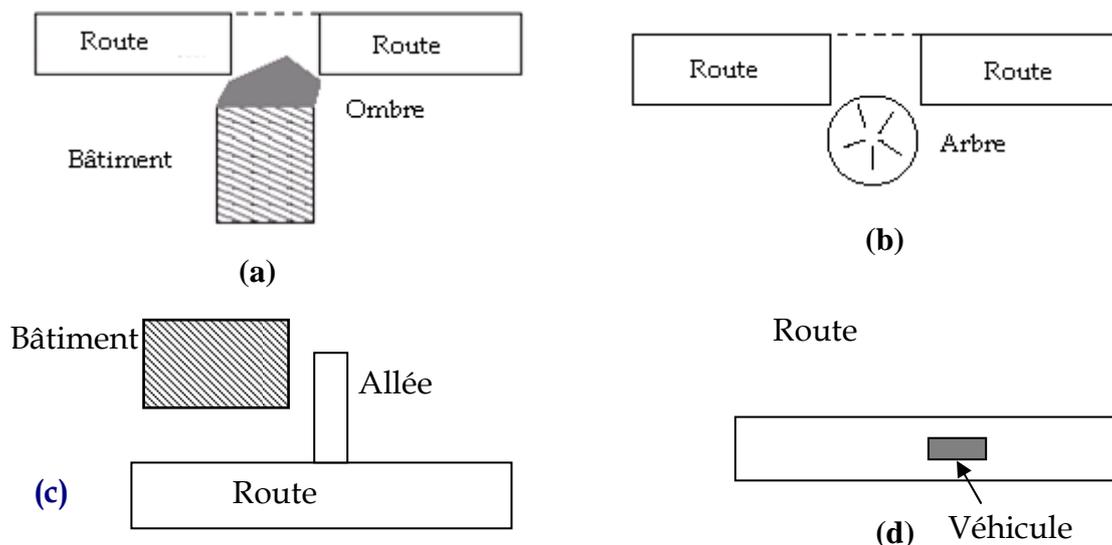


Figure II.10 - Les contextes locaux, (a) et (b) occlusion et ombre ; (c) Building drive way road segment; (d) véhicule dans la route.

➤ **Contexte Global**

Il n'est pas nécessaire de toujours prendre en compte chaque contexte local car les relations entre les objets du même environnement et de leur pertinence pour l'extraction de la route dépendent aussi de la région où elles se produisent. Par exemple, les routes dans les zones urbaines ou périurbaines ont une apparence tout à fait différente des routes dans les zones forestières ou dans les zones ouvertes (milieu rural). Cette apparence différente est fortement liée aux différentes relations entre la route et les bâtiments par exemple dans les centres-villes, les bâtiments sont généralement plus étroits et parallèle à la route [12].

On peut distinguer trois contextes globaux le contexte des zones urbaines, des zones rurales et celui des zones des forestières, où chaque contexte est défini par ces contextes locaux.

Le contexte global n'est pas pertinent seulement pour l'importance de ces contextes locaux, mais aussi pour l'extraction des objets ; car l'expérience montre que les approches qui conviennent pour l'extraction de route dans les zones rurales en général ne peuvent pas être appliqués dans d'autres contextes globaux sans modification ; En zones urbaines par exemple d'autres paramètres peuvent être nécessaire ou, plus vraisemblablement, et même une approche complètement différente est nécessaire.

Dans la figure (Fig. II.11), nous avons affectés les contextes locaux qui se produisent fréquemment dans leurs contextes globaux.

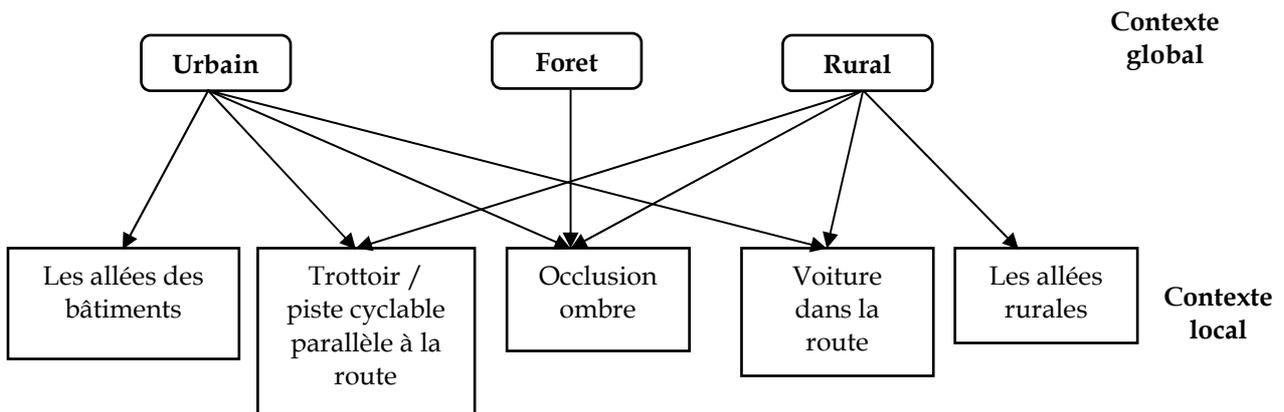


Figure II.11 - Les contextes globaux et locaux.

II.3 État de l'art sur l'extraction de réseau routier

Pour tout problème d'extraction d'informations et d'objets à partir d'une image, il convient pour bien répondre aux objectifs visés, de se poser au préalable plusieurs questions :

- Quels est l'objet à extraire et quelle est sa variabilité typologique ?
- Comment apparaît l'objet dans l'image ?
- Quelles informations propres à l'objet cherche-t-on à extraire ?
- Pour quelle application ? et avec quelle fiabilité ?

II.3.1 Méthodes semi-automatiques

Une grande partie des travaux sur l'extraction des réseaux se situent dans une problématique d'aide à la saisie des interprètes d'image. Les méthodes proposées dans ce cadre sont semi-automatiques : un opérateur doit fournir des points de contrôle pour initialiser un algorithme de suivi, une recherche de chemin optimal par programmation dynamique, un contour actif, ou encore un algorithme fondé sur une analyse de profils transversaux. Ces méthodes permettent en général d'effectuer une

extraction rapide et d'une grande précision. Il faut néanmoins se poser la question de savoir si le gain de productivité apporté par les techniques semi-automatiques est significatif par rapport au travail d'extraction mené par un expert. Ces techniques peuvent également être utilisées dans un contexte complètement automatique en utilisant une pré-détection automatique des points d'amorce.

II.3.1.1 Algorithmes de suivi

➤ Filtrage

Le problème de suivi de route peut être vu comme un problème de filtrage. Etant donné une trajectoire dans l'espace d'état et les observations passées, le filtrage correspond à un processus d'estimation de l'état courant sachant son passé et les observations courantes. Ainsi, le suivi de route peut être vu comme la poursuite d'un véhicule supposé circuler au milieu de la chaussée à vitesse constante.

Parmi les travaux utilisant des techniques de filtrage, Chiang [02] présente une méthode d'extraction de routes qui se repose sur la détection des contours et l'utilisation du filtre de Kalman pour génération du contour actif. Vosselman et Knecht [03] proposent aussi d'utiliser un filtrage récursif de Kalman pour estimer la position de la route à chaque instant. L'algorithme est initialisé par un segment fourni par un opérateur à partir duquel un profil caractéristique de la route est défini.

La prédiction d'un nouveau segment se fait à partir des estimations de la direction et la courbure de la route. Une mise en correspondance entre le profil caractéristique de la route et le profil courant permet d'évaluer la distance entre les deux profils. La position du nouveau segment est mise à jour selon cette distance. En incorporant les positions obtenues antérieurement, les autres paramètres tels que la direction et la courbure de la route peuvent être également mis à jour.

➤ **Théorie de l'information**

Geman et Jedynak [04] proposent une approche originale fondée sur la théorie de l'information pour le suivi rapide de routes à partir d'un point d'amorce et d'une direction. Des tests à effectuer sont choisis afin de réduire autant que possible l'incertitude sur l'hypothèse de « position correcte de la route » selon les résultats des premiers tests. Ce choix est effectué de façon dynamique selon la distribution jointe des tests et des hypothèses. Le problème d'optimisation correspond à un problème de minimisation d'entropie. Cette méthode est performante pour ce qui est du suivi des autoroutes sur de grandes distances.

➤ **Suivi par homogénéité directionnelle**

Considérant les routes comme des surfaces sans discontinuité apparente plutôt que des lignes, Airault et Jamet [05], Ruskoné [06], proposent d'effectuer un suivi reposant sur un critère d'homogénéité directionnelle. Ce critère est fondé sur une hypothèse de variance minimale dans la direction longitudinale de la route. A partir d'un point et d'une orientation d'origine, l'algorithme recherche le chemin optimal parmi un arbre de chemin possible. Chaque chemin est composé de segments de droite choisis localement suivant le critère d'homogénéité.

L'inconvénient d'un tel choix est que le suivi peut être fortement dérouté par la présence d'arbres à proximité des routes, le mauvais état de la chaussée, la présence de flaques d'eau.

II.3.1.2 Programmation dynamique

De nombreux travaux d'extraction de réseaux linéiques reposent sur une optimisation par programmation dynamique, technique efficace permettant de minimiser une fonction de coût dans un graphe. Une première étape consiste à définir une fonction de coût. La route correspond alors au chemin de moindre coût partant d'un point initial A et arrivant à un point final B, fixés par un utilisateur ou par une recherche automatique des points extrémaux.

Fischler et al [07] utilisent cette technique d'optimisation pour la détection précise des routes et des structures linéaires dans des scènes rurales. Les auteurs proposent de combiner l'information locale de plusieurs opérateurs de détection de ligne et de contour afin d'établir un masque permettant de restreindre la recherche et de fournir plusieurs cartes de coût définies sur ce masque.

Une constante est ajoutée à chaque coût positif afin de minimiser la courbure de la route. L'algorithme de programmation dynamique proposé, appelé F^* , est appliqué à chaque carte fournissant plusieurs chemins optimaux. Le chemin de coût normalisé minimal est alors sélectionné. Cet algorithme, référence dans le domaine de l'extraction de réseaux linéiques, donne de très bons résultats sur des images aériennes de faible résolution.

Mena et Malpica [08] présentent une amélioration de cet algorithme avec une modélisation sous-jacente par champs de Markov. L'algorithme permet d'obtenir, par construction, des lignes minces et continues. Cette méthode est étendue à des cliques d'ordre supérieur pour tenir compte du contraste route/environnement, et à des voisinages d'ordre supérieur pour introduire la notion de courbure. De plus, un modèle dynamique permet d'utiliser cette information de courbure de manière plus

globale et naturelle. La méthode est semi-automatique, où les points de départ de l'algorithme sont définis par l'utilisateur.

Gruen et Li [16] proposent un schéma d'extraction de routes semi-automatique qui combine une transformée en ondelettes et un algorithme de programmation dynamique. La transformée en ondelettes adaptée aux caractéristiques radiométriques de la route est construite de façon à rehausser le contraste des routes par rapport à leur environnement. La route est modélisée par modèle générique fondé sur des propriétés géométriques et photométriques et résolu itérativement par programmation dynamique. Contrairement aux méthodes décrites précédemment, le chemin n'est plus décrit par une chaîne de pixels mais par un polygone décrit par n points de contrôle. Le polygone est initialisé grossièrement par un nombre réduit de points de contrôle fournis par un utilisateur. La position des n points de contrôle est optimisée par programmation dynamique, chaque point pouvant bouger dans une fenêtre de taille 5×5 dans la direction normale à la courbure. Des nouveaux points sont proposés au centre de chaque nouveau segment de longueur supérieure à un certain seuil. L'optimisation est ensuite réitérée sur le nouveau polygone. Les points non pertinents sont supprimés. Et ainsi de suite jusqu'à convergence. Cette méthode a été appliquée avec succès pour l'extraction de route à partir d'images satellitaires SPOT et aériennes.

Dans [17] une méthode semi-automatique pour l'extraction des routes en utilisant la programmation dynamique est présentée. En effet, un modèle générique de route est formulé, et résolu séquentiellement par un algorithme de programmation dynamique. Dans ce travail, quelques points extrémaux décrivant la route doivent être fournis par l'opérateur. De même, ce travail propose une solution pour le problème d'optimisation, qui consiste à chercher le plus court chemin entre deux points d'un objet.

II.3.1.3 Contours Actifs

Les contours actifs sont largement utilisés pour tout ce qui concerne l'extraction d'objet dans les images. Les contours actifs doivent néanmoins être initialisés près de l'objet à détecter. Le contour évolue ensuite selon un algorithme de minimisation d'énergie qui favorise en général une faible courbure et un fort gradient au niveau du contour.

Fua et Leclerc [18] utilisent les contours actifs pour l'extraction des routes et des bâtiments. Les contours sont modélisés par des rubans définis par des points centraux successifs et une troisième composante correspondant à la largeur du ruban. Les auteurs montrent que les courbes optimisées sont de bonnes approximations des contours.

Neuenschwander et al [19] présentent une stratégie d'optimisation originale permettant à l'utilisateur de ne fournir que les extrémités du contour à détecter. Le contour est divisé en deux parties : une active et une passive. Au cours de l'optimisation, seule la partie active prend en compte le potentiel d'attache aux données. La partie active est initialisée au niveau des extrémités du contour et se propage progressivement vers le centre du contour selon le fonctionnement d'une fermeture éclair (ziplock, en anglais).

Rochery et al [20] introduisent une nouvelle classe de contours actifs d'ordre supérieur pour la détection du linéique (routes, rivières, ...). Ces contours actifs reposent sur la définition d'énergies quadratiques, contrairement aux énergies classiquement utilisées qui sont linéaires. Ces énergies permettent de définir des interactions non triviales entre les différents points du contour. Elles donnent naissance à des forces non locales, permettant ainsi d'introduire une information géométrique forte dans le modèle. D'un point de vue algorithmique, ils utilisent une

méthodologie par courbes de niveau afin de trouver le minimum de l'énergie, la présence de forces non locales nécessitant une extension des méthodes standard. Cette méthode est nettement moins sensible à l'initialisation que les méthodes usuelles : les contours initiaux peuvent être très distants de la ligne à détecter et ne recouvrir que très partiellement cette ligne ; dans le cas où l'image considérée ne contient qu'un réseau non fermé (par exemple, deux routes qui se croisent), aucune initialisation n'est nécessaire : le contour initial correspondant aux bords de l'image. Cependant, cette méthode est nettement moins efficace en termes de temps de calcul que les méthodes usuelles reposant sur les contours actifs.

II.3.1.4 Analyse multi-résolution de profils transversaux

La plupart des méthodes décrites précédemment sont applicables au milieu rural, voire péri-urbain, mais montrent leurs limites en environnement urbain où le bruit géométrique" prend toute son ampleur.

Dans ce contexte, Couloigner et Ranchin [21], Péteri et al [22] présentent une méthode pour l'extraction surfacique des réseaux en grille à partir d'images de moyenne et haute résolution. L'intérêt de cette méthode réside dans l'utilisation de plusieurs résolutions pour réduire les effets du bruit. L'utilisateur doit fournir les points extrémaux de la rue à extraire. L'extraction des bords se fait par une recherche des points d'intersections des profils transversaux de la rue provenant de l'image et des deux premières approximations de l'image. Une transformée en ondelettes est utilisée pour extraire (s'ils existent) la terre plein central et les terre-pleins secondaires. Notons que cette méthode n'est applicable que sur les réseaux de rues rectilignes.

II.3.2 Méthodes automatiques

L'objectif final des méthodes d'extraction complètement automatique est de remplacer le travail d'extraction mené par un interprète d'image.

II.3.2.1 Méthodes de segmentation et de classification

Ces méthodes utilisent la segmentation et la classification supervisée ou non supervisée d'une image afin d'extraire le réseau routier. Souvent, le processus de segmentation est basé sur l'analyse de texture qui peut offrir une image binaire assez propre pour servir comme entrée d'un processus de vectorisation postérieure.

En liaison avec le sujet d'extraction des routes, [Benjamin et Gaydos, 1990] présente un système de segmentation d'une image infrarouge utilisant la technique de classification par maximum de vraisemblance.

Dans [23] des méthodes de classification par croissance de région appliquées sur les bandes spectrales infrarouge et visible sont présentées. Plus récemment, [24] propose l'analyse de texture pour la segmentation des zones urbaines de l'imagerie multi-spectrale à haute résolution.

Dans [25] une technique d'analyse spatiospectral utilisant la classification pour l'extraction des routes est présentée. La classification non supervisée est aussi appliquée dans [26].

Roggero [27] aborde le problème de la segmentation d'objet et de reconnaissance de forme à partir des données bruitées. Ici, deux différents algorithmes combinant la technique de croissance de région et l'analyse en composantes principales sont appliqués à des zones urbaines. Une nouvelle méthode

où l'analyse de texture est le facteur principal dans le processus de segmentation pour l'extraction des routes, peut être trouvée dans [28].

Bhattacharya et Parui [29] conçoivent l'extraction de routes sur les images de télédétection comme un problème de classification, où les pixels doivent être classés en "route" et "non route", ils proposent d'utiliser un réseau de neurones multicouches. Les entrées du réseau sont des fenêtres de taille $n \times n$ centrées sur chaque pixel p de l'image. Le réseau calcule par lui-même des valeurs discriminantes dans les nœuds de l'unique couche cachée à partir des n^2 entrées, puis classifie le pixel p à partir des nœuds cachés dans le nœud de sortie. Ce réseau est entraîné par un algorithme de type rétro-propagation à partir de quelques échantillons de type "route" et "non route" sélectionnés manuellement par l'utilisateur, à partir d'une image provenant d'un certain type de capteur. Le réseau entraîné est ensuite utilisé pour l'extraction de routes dans d'autres images provenant du même capteur.

II.3.2.2 Morphologie mathématique

Un des traitements les plus importants réalisé sur une image binaire consiste à filtrer et/ou partitionner les objets dans un but de représentation ou de modélisation. La morphologie mathématique est une manière d'aborder ce problème.

La Morphologie mathématique est une approche de la théorie des ensembles développée par Matheron [30] et Serra [31]. Basée sur un cadre mathématique formel, elle fournit une approche pour le traitement des images numériques, qui se base sur la forme géométrique. Elle utilise un ensemble d'opérations telles que l'union, l'intersection et la complémentation, ainsi que la dilatation, l'érosion, l'amincissement et d'autres opérations dérivées.

Destival [32] propose une méthode entièrement fondée sur la morphologie mathématique. Dans un premier temps, l'image est "binarisée", puis les structures recherchées sont reconstruites. La binarisation consiste à extraire une image binaire sur laquelle figurent les pixels susceptibles d'appartenir à l'entité étudiée. Les routes sont d'abord extraites par la transformation du chapeau haut de forme sur l'image ouverte (l'image est érodée puis dilatée et retranchée à l'image de départ), permettant de former l'image binarisée. Le réseau est finalement reconstruit en effectuant une dilatation, puis une squelettisation.

Dans [34] une approche sur l'extraction automatique du réseau routier à partir des images à haute résolution est proposée. Dans un premier temps, l'image originale est segmentée et les routes sont séparées grossièrement de leur environnement. Une analyse granulométrique est réalisée pour déterminer la distribution de la taille et de la forme des objets dans l'image. Cette étape permet de sélectionner un seuil qui sera utilisé pour l'opération suivante.

Une ouverture triviale est ensuite effectuée. Elle permet de déterminer les composantes convexes de l'ensemble des routes pré détectées. Puis on cherche les ellipses de tailles minimales englobant ces composantes connexes et leur axe principal. Ceci permet de garder uniquement les composantes connexes de l'image dont l'axe principal de l'ellipse minimale incluant est supérieur au seuil déterminé précédemment. Le réseau principal est alors extrait, et plusieurs opérations de morphologie mathématique sont à nouveau réalisées pour améliorer le résultat.

II.3.2.3 Détecteurs de lignes

Les détecteurs de ligne recherchent localement dans l'image les pixels présentant les caractéristiques d'une route, d'une rivière ou d'une structure linéaire en général. En raison du caractère essentiellement local de la détection, ces méthodes sont très sensibles au bruit et n'assurent pas une détection complète, ni l'absence de

fausses détections. Elles sont donc plutôt utilisées en pré-traitement pour obtenir les pixels ayant une probabilité plus ou moins forte d'appartenir au réseau.

Un des opérateurs les plus connus pour la détection de ligne est l'opérateur DUDA, proposé par Duda et Hart (1973). Il utilise quatre masques à convoluer avec l'image correspondant à des structures linéaires de trois pixels de long et les pixels voisins associés.

Des scores sont calculés pour chaque masque mesurant conjointement l'homogénéité du niveau de gris le long de la structure et le contraste avec le voisinage. Le score maximal est assigné au pixel central du masque.

Cet opérateur est sensible à l'orientation de la route, à la discrétisation, aux changements brutaux d'orientation ainsi qu'au faible contraste par rapport à l'environnement. De plus, cet opérateur détecte les profils de type contour simple et engendre donc un nombre significatif de fausses détections.

De plus, cet opérateur détecte les profils de type contour simple et engendre donc un nombre significatif de fausses détections. Afin d'éviter la détection des contours conjointement aux lignes, Roux [35] propose une version modifiée de l'opérateur DUDA en ne tenant compte que du groupe de voisins le moins contrasté avec l'axe central dans le calcul du score.

Dans [36] les auteurs présentent un algorithme qui réalise une détection locale de lignes à partir de deux détecteurs de lignes. Les résultats de ces deux détecteurs sont ensuite fusionnés pour donner un ensemble de segments candidats. Puis, les segments sont connectés en utilisant une méthode fondée sur l'utilisation d'un modèle de champ de Markov défini sur les segments.

Haverkamp [37] propose un détecteur de route dans le milieu urbain fondé sur la texture; plus précisément, ce détecteur est fondé sur l'analyse de signatures angulaires de texture contenues dans une image panchromatique IKONOS. La méthode a été testée sur une image de San Diego et donne de bons résultats en termes d'identification (environ 80% de routes identifiées) et de localisation (écart-type d'un pixel).

Néanmoins, cette méthode n'est applicable que dans le cas de réseaux en forme de grille tels que ceux rencontrés dans les villes américaines et est sensible au bruit géométrique dû par exemple à la présence de voitures sur les routes.

II.3.2.4 Champs de Markov sur graphe

Les champs de Markov sur graphe sont un outil puissant pour la détection automatique de réseau. Le réseau est modélisé dans sa totalité par un graphe où chacun des arcs correspond à une section du réseau. On entre dans le cadre d'une approche objet par opposition aux approches par champ de Markov usuelles, dans lesquelles le champ est défini sur une grille de pixels. Tout en bénéficiant des bonnes propriétés des approches par champ de Markov, comme la robustesse au bruit, cette modélisation permet d'introduire des contraintes géométriques fortes sur le réseau. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite une phase d'initialisation exhaustive : un arc non détecté dans la phase d'initialisation ne pourra pas l'être par la suite.

Dans [36] la détection des structures linéaires initialise un champ de Markov sur graphe pour la détection des routes en imagerie radar. On remarque que les liens reliant les structures linéaires détectées sont incorporés dans le graphe ce qui permet de combler certaines omissions. De plus, la méthode permet d'éliminer de nombreuses fausses détections.

Géraud [38] propose quant à lui une phase d'initialisation fondée sur des prétraitements morphologiques. Plus exactement, un traitement de bas-niveau fournissant pour chaque pixel un potentiel d'appartenance à une route est tout d'abord appliqué. Puis, il propose de réaliser une sur-segmentation de l'image par la méthode de « ligne de partage des eaux » (watershed) appliquée sur l'image de potentiel (filtrée pour réduire la présence de minima locaux). Un champ de Markov est ensuite défini sur un graphe d'adjacence de courbes, calculé sur les lignes de partage des eaux et supposé contenir le réseau routier. L'intérêt de cette initialisation est qu'elle est fondée sur des primitives de haut niveau (approche région).

II.3.2.5 Banc de filtres

Les méthodes par banc de filtres permettent une analyse multi échelle et ont donc l'avantage de fournir une extraction des lignes d'épaisseur variable, ce qui s'avère très utile dès lors que le réseau présente une variabilité non négligeable d'épaisseur (vaisseau sanguin, fleuves, etc.).

Koller et al [39], utilisent une combinaison non linéaire de filtres linéaires pour la segmentation et la description locale de structures linéaires en deux et trois dimensions. Le banc de filtre permet de détecter les structures allongées et symétriques tout en supprimant la réponse des contours simples. Un maximum aigu est obtenu le long du profil des structures linéaires et à travers le changement d'échelle.

Ce filtrage fournit une description locale du contraste, la position de la ligne centrale, la largeur et l'orientation de la ligne. La nature générique de cet algorithme est montrée au travers de plusieurs applications dont la détection du réseau routier sur une image aérienne. Cependant, l'utilisation de filtres de détection de contour directionnels rend la méthode coûteuse en temps de calcul.

II.3.2.6 Les réseaux de neurones

Le problème d'extraction de structures linéaires peut être vu comme un problème de classification où deux labels peuvent être assignés aux pixels de l'image : le label "fond" et le label "item cartographique".

Dans ce cadre, les réseaux de neurones peuvent s'avérer un outil puissant de classification puisqu'ils ne supposent aucune connaissance sur la distribution sous-jacente et permettent d'éviter les phases de rehaussement et de seuillage. De plus, une fois entraînés ils peuvent réaliser l'extraction en temps réel.

Bhattacharya et Parui [29] proposent d'utiliser un réseau de neurones multicouches pour la détection de routes. Les entrées du réseau sont des fenêtres de taille $n \times n$ centrées sur chaque pixel p de l'image.

Les résultats de la classification sur des images SPOT et IRS sont relativement bons malgré quelques interruptions et quelques fausses alarmes. Remarquons néanmoins que le réseau n'a été appliqué qu'à des images de taille 128×128 issues de l'image dans laquelle les échantillons d'apprentissage ont été sélectionnés. Qu'en est-il avec une autre image ?

II.3.2.7 Approche multi-résolution

Avec l'augmentation de la résolution des images, des éléments de plus en plus petits apparaissent et il est possible d'extraire des structures très fines. Cependant cette précision est un facteur d'apparition de bruits géométriques très forts (présence d'arbres et de bâtiments au bord de la route, véhicules sur la route, ombres portées, marquages au sol,...). Certains auteurs proposent alors d'utiliser des techniques multi-échelles afin de réduire cette sensibilité au bruit. Une première extraction est

souvent à basse résolution pour obtenir l'axe central du réseau, puis une localisation précise est effectuée à haute résolution.

Dans [40] les caractéristiques des différents objets tels que les routes sont détectées dans différentes échelles. Les auteurs proposent de réaliser une première détection à basse résolution fondée sur une hypothèse de fort contraste entre les routes et le fond. Puis un modèle haute résolution fondé sur les hypothèses de contours parallèles et d'homogénéité interne est appliqué.

Dans les travaux de [41, 42], les auteurs définissent des modèles de routes afin de contraindre l'extraction sur les régions qui ont le plus de chance de contenir des routes de manière fiable. Ces modèles prennent en compte le contexte (rural, péri-urbain ou urbain) et les interactions avec les autres objets (bâtiments, arbres, véhicules). À partir de l'image de résolution dégradée, les lignes les plus fiables représentant les routes sont extraites et sont utilisées pour extraire les segments candidats de l'image à haute résolution. À partir de critères géométriques, radiométriques et du contexte, les segments parallèles extraits sont ensuite appariés, les segments proches sont alors groupés et les discontinuités sont comblées de manière à rendre le réseau connexe. Enfin, les intersections sont reconstruites, en utilisant la technique de Ziplock Snakes [19].

Laptev et al [43] reprennent l'approche multi-échelle des travaux précédents et se concentrent sur le traitement des occlusions (en utilisant les contours actifs) et des intersections (en utilisant les Ziplock Snakes). Le procédé se révèle efficace pour combler les «trous» laissés par l'étape de détection des segments parallèles, ainsi que pour extraire les intersections avec précision.

II.3.2.8 Systèmes d'interprétation

Les systèmes d'interprétation ne cherchent pas directement à extraire les objets d'une image, mais plutôt à interpréter la scène qu'elle contient. Ils se basent sur le principe de pensée d'un interprète d'images face à une recherche d'objets particuliers dans une image. Ainsi, l'extraction du réseau est réalisée via une interprétation de la scène observée.

Ainsi, Ruskoné [44] propose un système d'extraction du réseau routier reposant sur deux phases : une phase ascendante guidée par les données reposant sur des critères de bas niveau et une phase descendante de validation reposant sur des modules successifs de haut niveau guidée par l'objectif. Cette étape de validation passe par une interprétation locale du contexte qui par la reconnaissance d'un objet donné permet de déduire la position de la route.

Hinz et Baurngartner [45] proposent d'incorporer une connaissance détaillée des routes et de leur contexte dans un système d'extraction automatique des routes sur des images aériennes haute résolution. Les modèles utilisés prennent en compte des informations sémantiques de type marquage au sol ou présence de véhicule. Plusieurs vues de la même scène permettent l'exploitation des redondances, la prédiction et le traitement des occlusions, et la description de la scène par objet dans l'espace 3D.

Zhang [46] utilise plusieurs sources de connaissances pour extraire les routes, en particulier les informations d'une base de données géographiques et des images aériennes couleurs. Dans un premier temps, des bords 3D sont extraits à partir d'images aériennes. Une classification des images est ensuite réalisée pour séparer les régions « routes » des autres objets. Des modèles de surface sont utilisés pour

déterminer les objets au sol (route,..) et hors-sol (bâtiments, arbres,..) et les bords 3D situés dans les régions hors-sol sont éliminés.

Les marquages au sol des zones urbaines comme les lignes centrales en pointillé ou les passages piétons sont détectés selon des critères colorimétriques et géométriques pour confirmer la présence d'une route. Enfin, le réseau est reconstruit en recherchant des bords parallèles près des axes fournis par la base de données, et en les reliant en maximisant une fonction de coût par programmation dynamique. Une évaluation de la performance globale (sur tout le réseau) et locale (sur chaque segment) est proposée.

II.3.2.9 Apport de données cartographiques

L'intégration des données complémentaires a pour but de parvenir à une extraction fiable des objets d'intérêt. Les informations peuvent être symboliques: une base de données cartographique ou une carte topographique de la scène par exemple.

Dhérété et Desachy fusionnent plusieurs sources de données pour extraire les linéiques sur des images SPOT. Plusieurs détecteurs de lignes sont appliqués à différentes images (SPOT-XS3 et SPOT-Panchromatic) et leurs résultats sont combinés en une seule image. Cette image est ensuite fusionnée avec des données cartographiques. Des régions d'intérêt sont définies autour des vecteurs de la base de données cartographiques et un chemin optimal est trouvé par programmation dynamique dans ces régions. Le chemin est ensuite lissé en utilisant un modèle de contour actif. Une mesure de qualité est également donnée à la route extraite.

II.4 Conclusion

L'extraction des réseaux routiers d'une image satellite dépend de plusieurs facteurs, tels que le matériel utilisé dans la prise de vues, la capture des images, la résolution de l'image et la nature de la zone observée (urbaine, péri-urbaine ou rurale) et le facteur le plus important qui limite les méthodes d'extraction concerne l'aspect de la route dans l'image qui n'a pas une représentation unique et standard.

Pour toutes ces raisons nous trouvons une variété de méthodes d'extraction des réseaux routiers utilisant un large champ des techniques de reconnaissances de formes et de traitement d'images. Au cours de ce chapitre, un état des travaux récents menés sur l'extraction des routes a été présenté. Nous avons décrit principalement deux catégories de méthodes. La première regroupe les méthodes dites semi-automatiques, pour lesquelles un opérateur humain ou bien, plus rarement, un algorithme de détection a préalablement marqué des points de départ et d'arrivée pour les routes. La seconde regroupe les méthodes automatiques, qui n'utilisent aucune connaissance a priori sur la localisation des routes.

Nous présentons dans le prochain chapitre une description des outils issus de la Morphologie Mathématique, nécessaires pour développer un algorithme qui permet une détection ou extraction de réseaux routier.

III.1 Introduction

Ce chapitre n'est qu'une introduction à la Morphologie Mathématique. Nous présentons les opérateurs de base et leurs principales propriétés. L'analyse d'images désigne une discipline des mathématiques appliquées qui étudie les images numériques et leurs transformations, dans le but d'améliorer leurs qualités ou d'en extraire de l'information.

La Morphologie Mathématique a été créée en 1964 par **Georges Matheron** et **Jean Serra** dont la plus grande partie de cette théorie a été développée dans les laboratoires de l'Ecole des Mines de Paris. Son développement a été motivé par des applications industrielles : c'est le problème de quantification des structures géologiques qui a conduit Matheron et son étudiante Serra à construire les opérateurs mathématiques essentiels à cette étude.

La Morphologie Mathématique est une théorie essentiellement non linéaire en traitement d'images, capables de réaliser des tâches très sophistiquées sur des images binaires, en Niveau de Gris (NG) et couleurs, aussi bien 2D que 3D, en biologie, en imagerie médicale, en imagerie aérienne et satellitaire, en robotique et vision par ordinateur, en contrôle industriel non destructif, dans les études sur les documents et les œuvres d'art. Bien que ne soit pas limitée au traitement des images, la Morphologie Mathématique y trouve un immense champ d'applications dans le domaine de la sécurité ou encore en théorie des jeux.

La Morphologie Mathématique offre un grand nombre d'outils très puissants de traitement et d'analyse d'images que l'on retrouve sous différentes rubriques dans certains logiciels d'analyse d'images et même de retouches d'images, dont le but est l'étude des objets en fonction de leur forme, de leur taille, des relations avec leur voisinage (en particulier topologique), de leur texture et de leur niveaux de gris ou de

leur couleur. Par les transformations qu'elle propose, elle se situe à différents niveaux du traitement d'images (filtrage, segmentation, mesure, analyse de texture).

III.2 Quelques propriétés des opérateurs morphologiques

Les transformations morphologiques sont dotées de propriétés importantes dont nous rappelons dès à présent les définitions. Ces propriétés de base des opérateurs morphologiques sont celles relatives aux opérations sur les ensembles [53].

1. **Extensivité et anti-extensivité:** Une transformation ψ est extensive, si son application à une image produit une image plus grande que l'originale.

$$\psi \text{ est extensive} \Leftrightarrow \forall f \text{ une image, } \psi(f) \geq f$$

On définit la notion d'anti-extensivité par dualité :

$$\psi \text{ est anti-extensive} \Leftrightarrow \forall f \text{ une image, } \psi(f) \leq f$$

2. **Croissance:** Une transformation ψ est croissante si elle préserve l'ordre, c'est-à-dire si la relation d'ordre entre deux images est toujours vérifiée après l'application de l'opérateur :

$$\psi \text{ est croissante} \Leftrightarrow \forall f, g, \text{ deux images, } f \leq g \Rightarrow \psi(f) \leq \psi(g)$$

3. **Idempotence:** Une transformation ψ est dite idempotente, si le résultat ne change pas, en appliquant la transformation plus d'une fois.

$$\psi \text{ est idempotente} \Leftrightarrow \forall f \text{ une image, } \psi(f) = \psi[\psi(f)]$$

4. **Dualité** : Deux transformations ψ_1, ψ_2 sont duales, si le complément du résultat que l'on obtient en appliquant ψ_1 est égal au résultat que l'on obtient en appliquant ψ_2 au complément de l'image originale :

$$\psi_1, \psi_2 \text{ sont duales} \Leftrightarrow \forall f \text{ une image, } \psi_1(f^c) = (\psi_2(f))^c$$

5. **Homothopie** : Une dernière propriété dont il est utile de parler est la conservation (ou non conservation) de l'homothopie. D'une manière simple, on peut dire que deux ensembles (ou fonction) sont homothopes si on peut passer de l'un à l'autre par une transformation continue. Le concept d'homothopie joue un rôle important pour les squelettes.

III.3 Transformation morphologiques élémentaires

III.3.1 L'élément structurant

En Morphologie Mathématique, la démarche habituelle est d'extraire les structures essentielles d'une images en faisant des comparaisons ensemblistes avec les translation d'un petit ensemble donné ayant un centre défini. Ce petit ensemble est appelé élément structurant (ES), dont la forme et la taille de cet ES sont choisis en fonction des éléments d'intérêts dans l'image.

Soit B un sous ensemble de E, nommé élément structurant. Si x est un élément de E, alors on définit l'ensemble B_x , le déplacement de B en chaque point x de l'espace E :

$$B_x = \{b + x | b \in B\}$$

On introduit aussi le symétrie de B, noté $B_s : B_s = \{-b, b \in B\}$

Si l'élément structurant est symétrique, on a : $B_s = B$

Les éléments structurants les plus classiquement utilisés sont la croix (Fig. III.1.a), constituée de l'origine et les quatre voisins, le carré (Fig. III.1.b), constitué de l'origine et les huit voisins, La forme et la taille de l'élément structurant constituent les deux principaux paramètres à choisir pour une transformation morphologique, selon les besoins de l'analyse.

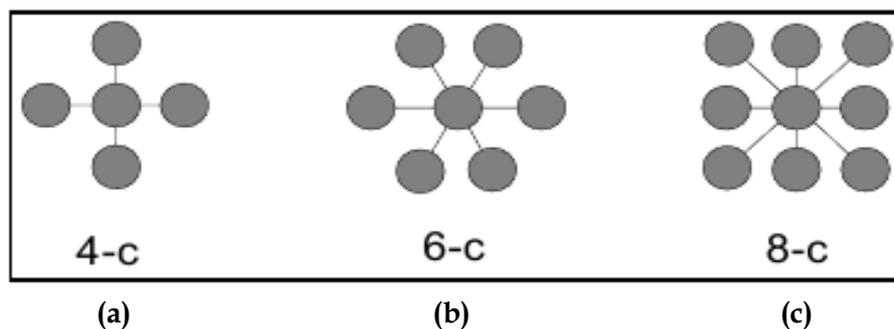


Figure III.1 - Des éléments structurants de base
Croix 4-connexe(a), hexagonale 6-connexe(b), carré 8-connexe(c).

III.3.2 Erosion et dilatation morphologique

L'érosion et la dilatation sont les opérateurs de base de la Morphologie Mathématique. Elles sont à l'origine d'un très grand nombre de transformation plus complexe (les filtres morphologiques, gradient morphologiques, ...).

1. L'érosion morphologique

L'érosion morphologique (notée $\varepsilon_B(X)$ ou $X \ominus B$) d'un ensemble X par un élément structurant B , est l'ensemble des points x tels que B soit totalement inclus dans X , si B est centré en x .

$$\varepsilon_B(X) = X \ominus B = \{x : B_x \subset X\}$$

Algorithme**Début***Pour tous les pixels de l'image Faire :*

- Choisir une fenêtre de taille 3x3
- Si Pixel = noir et s'il est \neq de l'un de ses 8 voisins
alors Pixel = blanc

Fin**2. La dilatation morphologique**

La dilatation morphologique est l'opération duale de l'érosion. Elle correspond à l'ensemble des pixels x tels lorsque B est centré en x , l'intersection entre l'élément structurant (B) et l'ensemble X est non nulle.

La dilatation d'un ensemble X , par un ES (B), se dénote ($\delta B(X)$ ou $X \oplus B$),

$$\delta B(X) = X \oplus B = \{x, B_x \cap X \neq \emptyset\}$$

Algorithme**Début***Pour tous les pixels de l'image Faire :*

- Choisir une fenêtre de taille 3x3
- Si Pixel = blanc et s'il est \neq de l'un de ses 8 voisins
alors Pixel = noir

Fin

La figure (Fig. III.2) donne un exemple d'application de ces deux opérateurs, érosion (Fig. III.2.b) et dilatation morphologique (Fig. III.2.c) sur une image binaire (Fig. III.2.a).

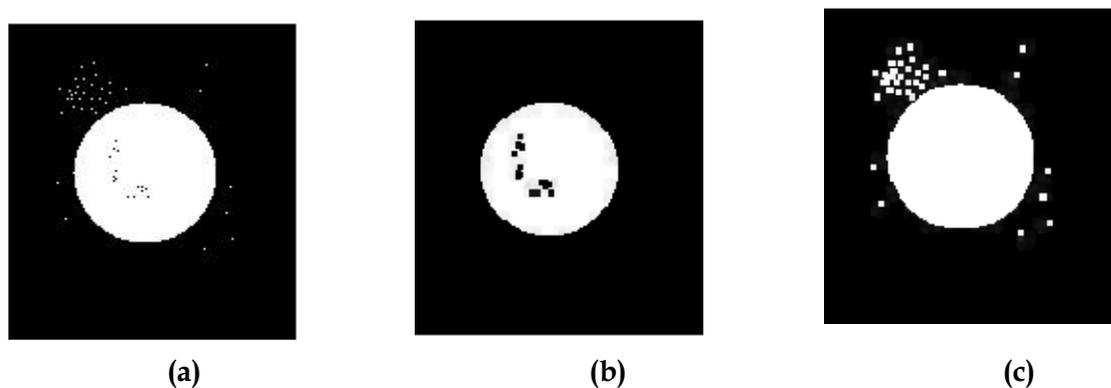


Figure III.2 - Effet de la dilatation et de l'érosion morphologique binaire
Image binaire(a) ; image érodée (b) ; image dilatée (c)

D'après l'exemple ci-dessus, on remarque que l'érosion et la dilatation produisent plusieurs effets caractéristiques [47] :

Erosion	Dilatation
<ul style="list-style-type: none"> • Les structures de taille inférieure à B sont éliminées. • La surface des structures de taille supérieure à B est réduite. • Les structures ayant des étranglements de largeurs inférieures à B sont séparées. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les trous de taille inférieure à B sont bouchés. • La surface des structures est augmentée. • Les structures voisines séparées d'une distance inférieure à B sont fusionnées.

Tableau III.1 – Tableau de comparaison entre érosion et dilatation binaire.

III.3.3 Le gradient morphologique

A partir de la dilatation et de l'érosion morphologique, on définit les gradients morphologiques comme des résidus de ces transformations. Le gradient morphologique ou gradient de Beucher a été défini comme la différence arithmétique

entre la dilatation et l'érosion d'une image par un élément structurant B. Ce gradient se résume par la formule suivante :

$$\text{Grad}_B(f) = \delta_B(f) - \varepsilon_B(f)$$

On définit aussi les gradients morphologiques internes et externes qui produisent des contours moins épais que le gradient de Beucher :

$$\text{Grad}^+(f) = \delta_B(f) - f$$

$$\text{Grad}^-(f) = f - \varepsilon_B(f)$$

Les gradients morphologiques permettent d'extraire les zones de variation d'intensité perçus, en choisissant la taille de l'élément structurant, et la distinction entre deux objets ou entre un objet et le fond [47].

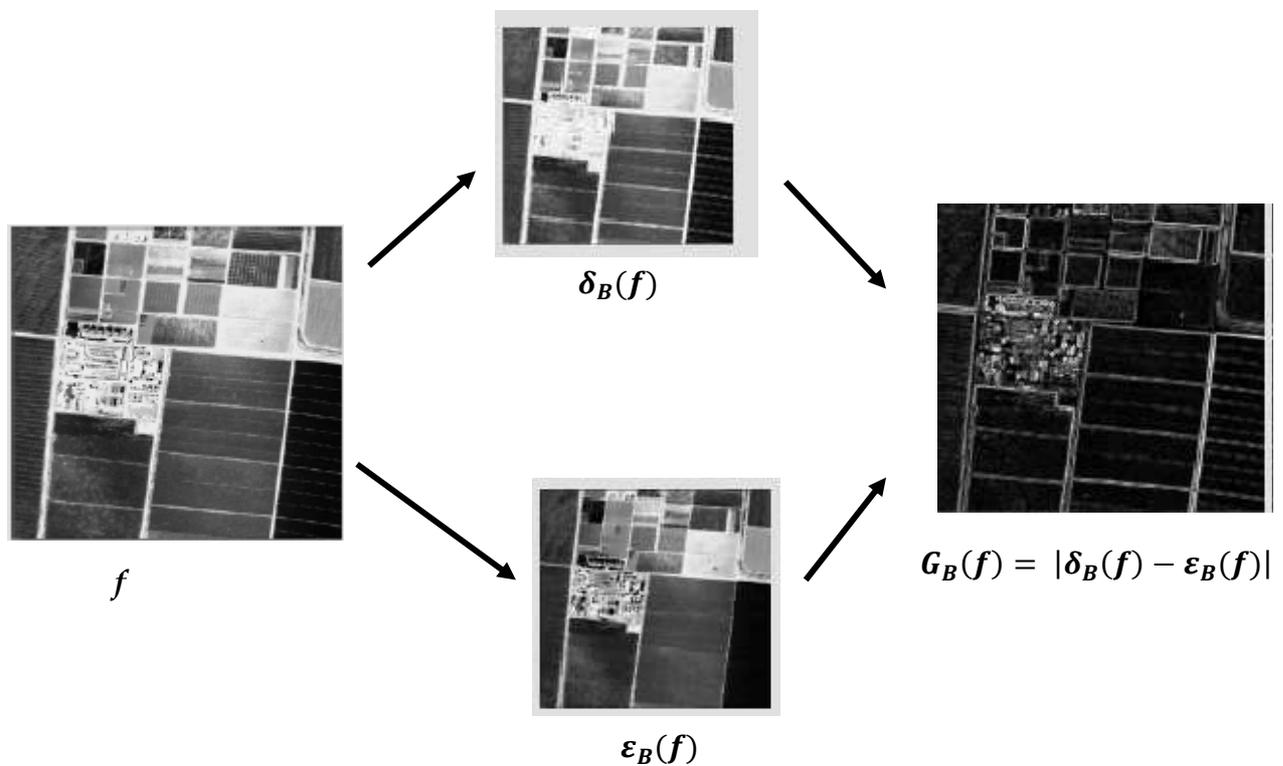


Figure III.3 - Application du gradient morphologique

III.4 Les filtres morphologiques

Une tâche très importante dans le traitement d'images est le filtrage. Filtrer une image est une opération irréversible : il s'agit d'enlever des éléments de l'image qui ne représentent pas d'intérêt dans un contexte particulier, tout en gardant idéalement l'information essentielle [48].

Deux caractéristiques principales qui définissent un filtre morphologique sont : L'idempotence et la croissance :

$$f \text{ est un filtre morphologique } \Rightarrow f \text{ est idempotent et croissant.}$$

III.4.1 Les ouvertures et les fermetures morphologiques

Les filtres morphologiques les plus répandus sont les ouvertures et les fermetures morphologiques.

1. Ouverture morphologique

L'ouverture morphologique d'un ensemble X , par un élément structurant B , notée $X \circ B$, et s'obtient par l'érosion de X par B suivie de la dilatation par B_s .

$$X \circ B = \delta_{B_s}(\varepsilon_B(X))$$

Comme nous utilisons des éléments structurants symétriques, cela revient à effectuer les deux opérations avec le même noyau. On retiendra donc l'ouverture comme étant :

$$X \circ B = \delta_B(\varepsilon_B(X)) = \{ (X \ominus B) \oplus B \}$$

Algorithme**Début**

- Charger de l'image d'entrée binaire.
- Effectuer une érosion de l'image d'entrée.
- Effectuer une dilatation de l'image érodée.
- Affichage et /ou stockage de l'image de sortie.

Fin**2. Fermeture morphologique**

En inversant l'ordre des opérations utilisées pour définir l'ouverture morphologique, nous obtenons une nouvelle opération appelée fermeture morphologique notée $(X \bullet B)$.

La fermeture Morphologique est réalisée par enchaînement d'une dilatation suivie d'une érosion par le même élément structurant B.

$$X \bullet B = \varepsilon_B(\delta_B(X)) = \{(X \oplus B) \ominus B\}$$

Algorithme**Début**

- Charger de l'image d'entrée binaire.
- Effectuer une dilatation de l'image d'entrée.
- Effectuer une érosion de l'image dilatée.
- Affichage et /ou stockage de l'image de sortie.

Fin

La figure (Fig. III.4) illustre l'effet des ouvertures et fermetures morphologique sur une image binaire.

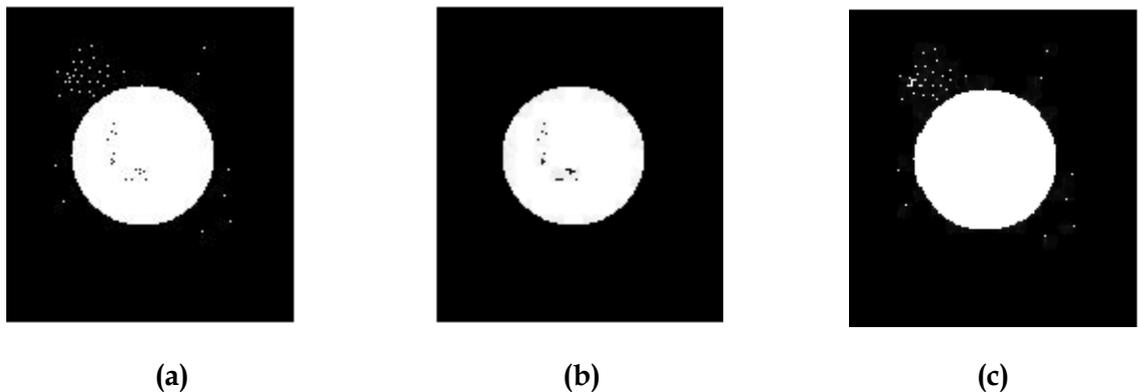


Figure III.4 - Effet d'ouverture et de fermeture morphologique binaire
Image binaire(a) ; image ouverte (b) ; image fermée(c)

L'ouverture et la fermeture sont des filtres morphologiques bien adaptés pour éliminer les structures dont la forme et le contraste sont connus.

Autres effet caractéristiques sont résumés dans le tableau ci-dessous :

<i>Ouverture</i>	<i>Fermeture</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Supprimer les structures claires. • Filtrer (lissage) de contour des formes. • Supprimer les structures ne contenant pas l'élément structurant. • Détacher les objets accolés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Supprimer les structures sombres. • Boucher les trous plus petits que B. • Filtrer (lissage) de contours de formes. • Réunir les connexités faiblement espacées dont la distance minimale est inférieure à la taille de l'élément structurant.

Tableau III.2 – Tableau de comparaison entre ouverture et fermeture binaire.

III.4.2 Les chapeaux hauts de forme

Le chapeau haut de forme (ou top hat en anglais) est une transformation qui permet d'extraire tous les détails d'une image qui ne dépassent pas une certaine taille et qui ont été éliminées par l'ouverture ou la fermeture morphologique [49][47].

Deux chapeaux hauts de forme sont définis :

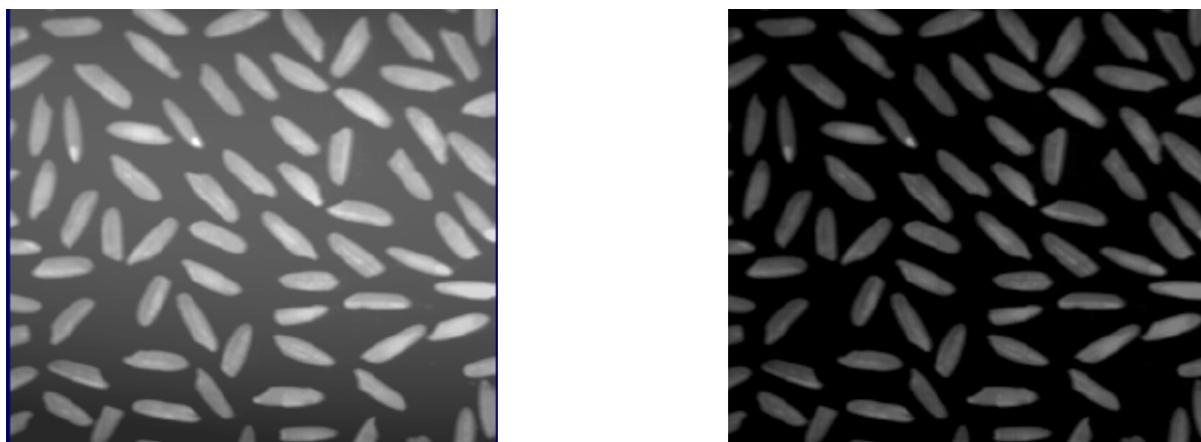
- **Le chapeau haut de forme blanc ou (WTH)** (White Top Hat, en anglais), permet de détecter ce que l'ouverture a fait disparaître, c'est-à-dire les pics ou structures claires de l'image originale, il est calculé par une différence algébrique entre l'image et son ouverture.

$$WTH_B(f) = f - O^B(f)$$

- **Le chapeau haut de forme noir ou (BTH)** (Black Top Hat, en anglais), permet d'extraire les vallées ou les structures sombres de l'image, il est calculé par la différence entre la fermeture et l'image [50].

$$BTH_B(f) = F^B(f) - f$$

Un exemple d'application du chapeau haut de forme est montré dans la figure (Fig. II.5) :



(a)

(b)

Figure III.5 - Application de transformation de chapeau haut de forme (b) sur l'image d'origine (a).

III.4.3 Filtres Alternés Séquentiels (FAS)

A partir des filtres morphologiques élémentaires, tels que les ouvertures et les fermetures, on définit des filtres morphologiques plus évolués. Parmi ceux-ci, les Filtres Alternés Séquentiels (FAS) sont sans doute les plus populaires. Ils permettent de réduire la complexité d'une image sans dégrader les contrastes les plus importants.

On définit Filtre Alterné Séquentiel Noir de taille n , noté $FAS_N(n)$, comme une itération de succession d'ouverture et de fermeture de taille croissantes.

$$FAS_N(n) = F_n O_n \dots F_2 O_2 F_1 O_1$$

Où O_i et F_i sont une famille d'ouvertures et une famille de fermetures par un élément structurant de même forme et de taille croissante.

On peut changer également l'ordre des ouvertures et des fermetures, pour obtenir un Filtre Alterné Séquentiel Blanc (FAS_B) :

$$FAS_B(n) = O_n F_n \dots O_2 F_2 O_1 F_1$$

Ces filtres FAS qui sont gourmands en temps de calcul [51] conduisent à une bonne réduction du bruit grâce à une élimination progressive des pics et des creux de faible surface. En pratique, le dernier élément structurant utilisé, n'est pas choisis librement, il est déterminé en fonction de la taille minimale des objets de l'image que l'on veut conserver après filtrage [52].

III.5 Morphologie Mathématique en niveau de gris

Les transformations de la Morphologie Mathématique agissent sur des ensembles en morphologie binaires et sur des fonctions en morphologie numériques. Les images couleurs ou en niveau de gris (NG) au point x . Les opérateurs vus

précédemment (érosion, dilatation, ouverture, fermeture) sont étendues en NG, en remplaçant dans les définitions tous les concepts ensemblistes par leurs équivalents fonctionnels :

- Les inclusions sur les ensembles $\supseteq \subseteq$ seront remplacées respectivement par les inégalités larges $\geq \leq$.
- L'union et l'intersection sur les ensembles $\cup \cap$ seront remplacées respectivement par le supremum (sup/ \vee) et l'infimum (inf/ \wedge).

Dans cette section, on traite le cas simple où l'élément structurant B est un ensemble binaire [52].

III.5.1 L'érosion et la dilatation en NG

On définit respectivement l'érosion et la dilatation d'une fonction f par des éléments structurants « plats » et symétriques en un point x par :

$$E_B(f)(x) = \inf\{f(y), y \in B_x\}$$

$$D_B(f)(x) = \sup\{f(y), y \in B_x\}$$

Où B_x est le translaté de B en x.

AlgorithmeErosion en NG**Début**

pour tous les pixels de l'image d'entrée $ImaIn[i,j]$ faire :

- choisir une fenêtre de taille 3×3
- $Pixel = ImaIn[i,j]$
- pour les 8 voisins du pixel faire :
 - si $pixel >$ à la valeur du pixel voisin
alors $pixel = pixel\ voisin$
- $Inf = pixel$
- L'image de sortie $ImaOut[i,j] = Inf$

FinDilatation en NG**Début**

pour tous les pixels de l'image d'entrée $ImaIn[i,j]$ faire :

- choisir une fenêtre de taille 3×3
- $Pixel = ImaIn[i,j]$
- pour les 8 voisins du pixel faire :
 - si $pixel <$ à la valeur du pixel voisin
alors $pixel = pixel\ voisin$
- $Sup = pixel$
- L'image de sortie $ImaOut[i,j] = Sup$

Fin

III.5.2 L'ouverture et la fermeture en NG

De même, définit respectivement l'ouverture et la fermeture par composition des dilations et érosions.

$$f \circ B = E(D(f, B), B_s)$$

$$f \bullet B = D(E(f, B), B_s)$$

L'ouverture sur une image en NG a pour effet d'écarter ou d'éroder les pics (Fig. III.6.d) qui sont plus étroits que l'élément structurant. La fermeture a l'effet dual de l'ouverture (Fig. III.6.e) : elle combe les vallées ou remplit les creux qui sont plus étroits que l'élément structurant.

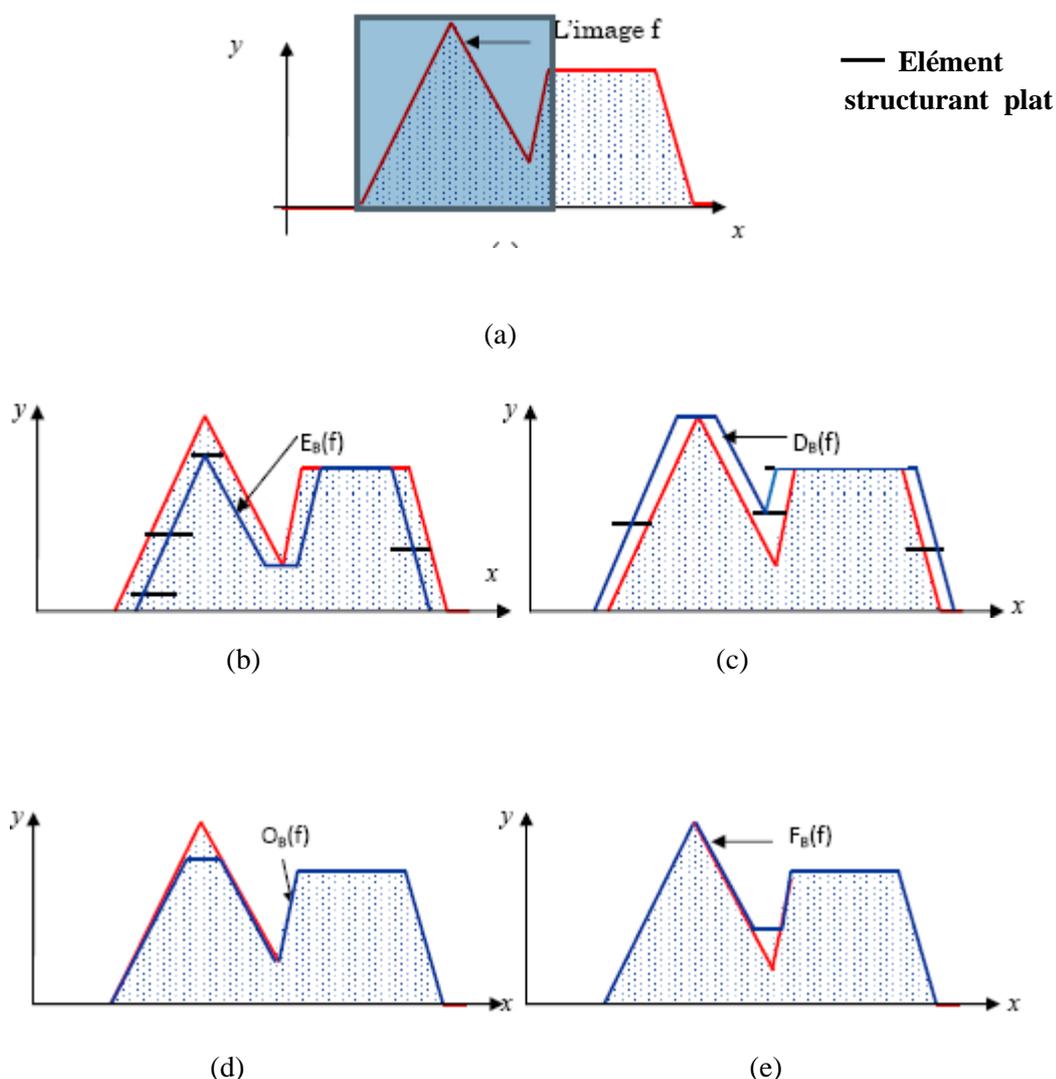


Figure III.6 - Opérations morphologiques de base sur les images en NG.

III.6 Le point de vue de l'analyse granulométrique

Une ouverture fait disparaître les objets d'une image binaire lorsqu'ils ne contiennent pas l'élément structurant. A partir du concept d'ouverture, il est donc possible de « tamiser » un ensemble de particules en considérant simplement une famille d'ouverture associées à des éléments structurants de même forme et de taille croissante (Fig. III.7).

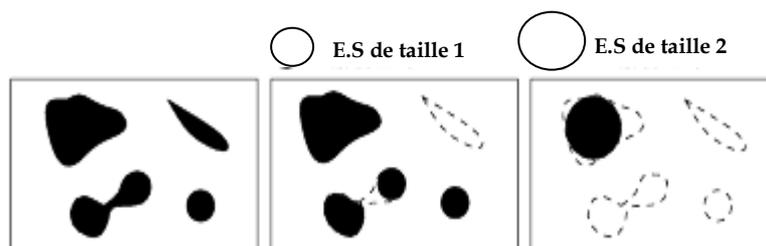


Figure III.7 – Effet d'ouverture de taille croissante sur un ensemble

III.6.1 Granulométrie

La notion de granulométrie et de transformation granulométrique ont été introduites par G.Matheron en 1967 [54][53].

Pour obtenir des mesures liées à la distribution des objets dans une image, on a recours en morphologie mathématique à la notion de granulométrie. L'analyse granulométrique est l'étude de la taille des objets fondée sur le principe du tamisage

Une granulométrie se calcule à l'aide d'une pyramide de filtre dont chaque élément (ouverture) agit selon une taille donnée λ .

λ est le facteur d'homothétie portant sur le ou les éléments structurants mis en jeu.

A la sortie de chaque filtre λ on mesure l'aire, soit M_λ , la quantité $F_\lambda = 1 - M_\lambda / M_0$ est une fonction de distribution (Fig. III.8). On utilise souvent aussi le spectre granulométrique qui est la dérivée de la fonction de distribution granulométrique.

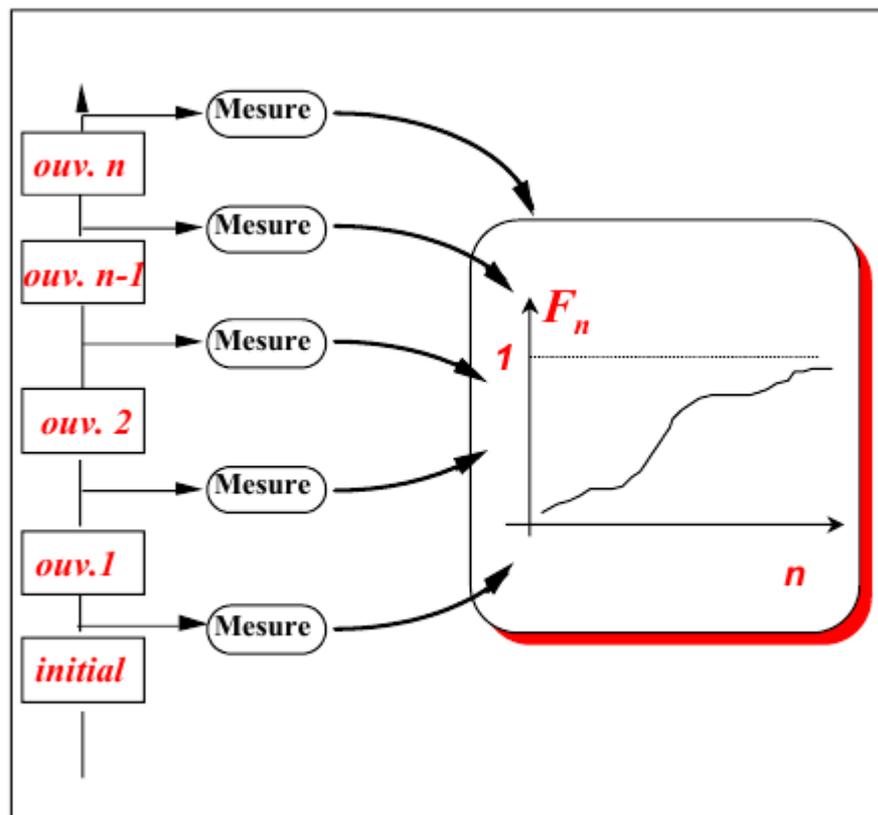


Figure III.8 - Principe de granulométrie

III.7 Notions de topologies, de distance et de géodésie

III.7.1 Extrema régionaux

On définit une zone plate d'une image comme l'ensemble de points ayant une intensité similaire et de taille maximale ; un maximum régional d'une image est une zone plate d'intensité supérieure et un minimum régional est une zone plate qui n'est adjacente à aucune zone plate d'intensité inférieure.

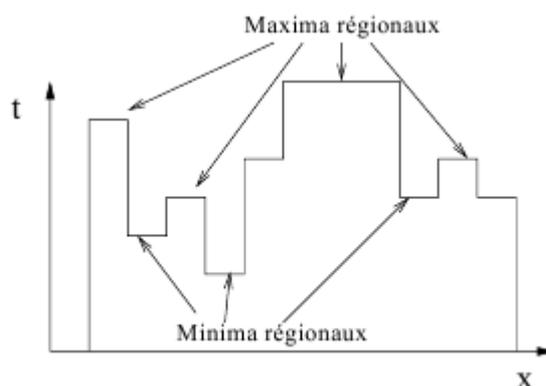


Figure III.9 - Les extrema régionaux

III.7.2 Transformée de distance

La transformée de distance d'un ensemble X est la fonction qui associe à chaque point $p \in X$ la plus courte distance 1 entre ce point et le complémentaire de l'ensemble X^c . Formellement :

$$D(X)(p) = \min\{d(p, q) | q \in X^c\}$$

La transformée de distance est un moyen de transformer un ensemble en une fonction (un exemple est donné sur la figure 14). Les maxima régionaux de la transformée de distance marquent les points les plus éloignés du bord d'un objet. Ces zones peuvent donc servir de marqueurs d'objets dans des algorithmes de segmentation.

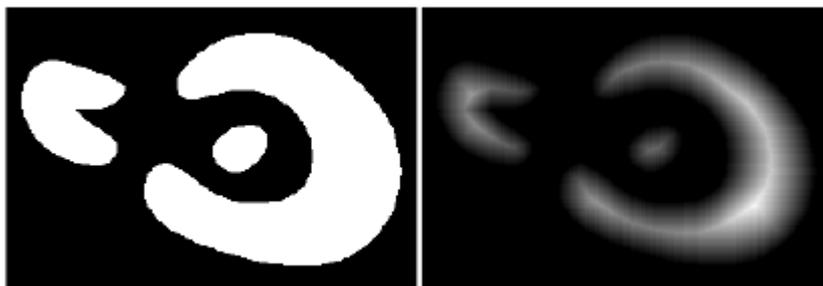


Figure III.10 - Transformée de distance d'un ensemble

III.7.3 Les transformations géodésiques et reconstruction

L'idée de reconstruction a fait son apparition en morphologie mathématique en 1976 comme l'opération qui consiste à reconstituer les composantes connexes d'un ensemble lorsque leur intersection avec les composantes connexes d'un second ensemble est non vide.

Les transformations géodésiques travaillent sur deux images : une image **marqueur** et une image **masque**. L'image marqueur est tout simplement un

ensemble de pixels marquent l'objet d'intérêt. Dans la plupart du temps, le marqueur ne présente qu'une fraction de l'objet d'où l'intérêt de reconstruction géodésique.

III.7.3.1 La dilatation géodésique

Comme toutes les transformations géodésiques, la dilatation géodésique nécessite deux images en entrées : une image masque et une image marqueur. L'image marqueur est dilatée premièrement à l'aide d'un élément structurant. L'image résultante est contrainte de rester inférieure ou égale à l'image masque. L'image masque a pour rôle de limiter la propagation de la dilatation des marqueurs.

Soit f l'image des marqueurs et g l'image du masque, on définit la dilatation géodésique de taille 1 comme suit :

$$\delta_g^1(f) = \delta^1(f) \wedge g$$

La dilatation géodésique de taille n est obtenue par itération de δ_g^1 :

$$\delta_g^n(f) = \delta_g^1[\delta_g^{n-1}(f)]$$

III.7.3.2 L'érosion géodésique

L'érosion géodésique est la transformation duale de la dilatation géodésique.

Soit f l'image marqueur et g l'image masque, on définit l'érosion géodésique de taille 1 comme :

$$\varepsilon_g^1(f) = \varepsilon^1(f) \vee g$$

Cette fois on contraint le résultat de l'érosion à rester supérieur ou égal au masque. De même que pour la dilatation géodésique, l'érosion géodésique de taille n est obtenue par érosion géodésique successives de f par rapport à g :

$$\varepsilon_g^n(f) = \varepsilon_g^1[\varepsilon_g^{n-1}(f)]$$

Choisir une taille d'érosion ou de dilatation géodésique n'est pas très pratique. Cela demande de connaître a priori les objets que l'on veut conserver et ceux que l'on désire éliminer. En pratique ces transformations sont peu utilisées ; on leur préfère les transformations de reconstruction morphologique.

III.7.3.3 La reconstruction morphologique

La notion de reconstruction est un outil morphologique tellement puissant que l'on retrouve dans la plupart des transformations utilisées en segmentation.

On définit la reconstruction morphologique par érosion ou par dilatation d'une image marqueur f par une image masque g comme l'érosion ou la dilatation géodésique de f par g de taille i tel que :

$$R_g(f) = \delta_g^i(f) \text{ avec } \delta_g^i = \delta_g^{i+1}$$

$$R_g^*(f) = \varepsilon_g^i(f) \text{ avec } \varepsilon_g^i = \varepsilon_g^{i+1}$$

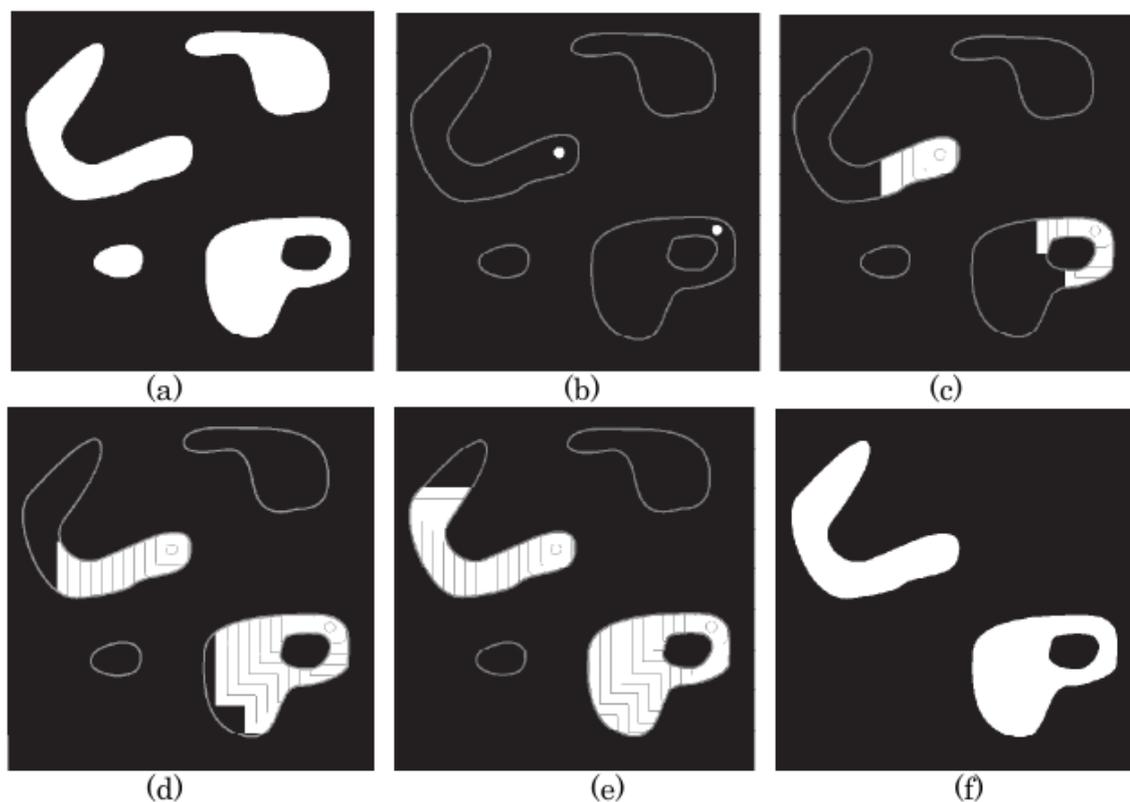


Figure III.11- Application de la reconstruction morphologique. (a) Image originale (masque) (b) Image marqueur. (c, d, e) Reconstruction après quelques itérations. (f) Extraction des objets marqués.

III.8 Le squelette morphologique

La squelettisation est une méthode très connue en analyse d'image, elle a été développée à l'origine dans les années soixante par divers auteurs, dont CALABRI et HARTNETT, BLUM, en vue de créer un nouveau descripteur de formes [50].

Cette méthode a gagné l'intérêt de nombreux chercheurs. En effet, il s'agit de représenter l'axe médian des objets, en réduisant l'épaisseur des composantes connexes jusqu'à une valeur infiniment petite, de telle sorte que l'on ne change ni leur nombre, ni leur genre. La réduction d'épaisseur se fait de la manière la plus isotrope possible (représentation de l'objet par un ensemble de lignes d'épaisseur unitaire).

Il existe plusieurs techniques d'obtention du squelette, elles sont souvent équivalentes. L'une d'elles fait intervenir la notion de boule maximale d'un ensemble X .

Une boule incluse dans X est dite maximale si et seulement s'il n'existe aucune autre boule de X le contenant :

$$\forall B' \text{ boule}, B' \text{ incluse dans } X; B \subset B' \Rightarrow B' = B$$

On peut alors montrer que tout ensemble X ouvert peut s'exprimer comme la réunion de ses boules maximales ouvertes.

En fait, on peut encore simplifier la représentation : seuls suffisent les centres des boules maximales et les rayons associés. On appellera squelette de X le lieu des centres des boules maximales [50].

$$S(X) = \cup \{x \in X, \exists r \geq 0 \text{ tel que } B(x, r) \text{ maximale dans } X\}$$

Quelques exemples du squelette obtenu par boules maximales sont montrés dans la figure ci-dessous :

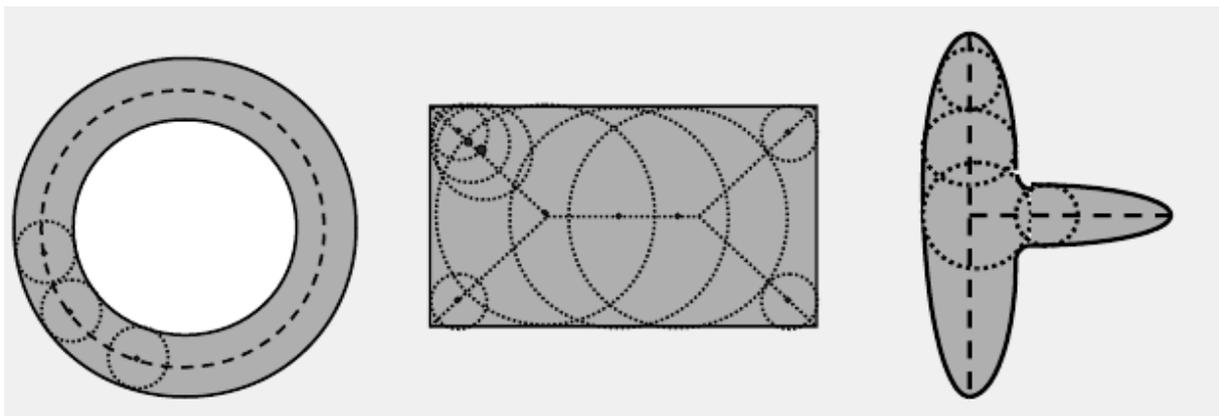


Figure III.12 - Exemples de squelettes.

III.9 Segmentation morphologique

La segmentation en Morphologie Mathématique est un point central de l'analyse d'image. Etape importante pour l'extraction des informations géométriques contenues dans une image et phase clef pour tout système d'analyse intelligent. La Morphologie Mathématique a fait de la Ligne de Partage des eaux (LPE) un outil simple et efficace en matière de segmentation. Avant d'aller plus loin dans les développements théoriques et algorithmiques, nous nous contenterons dans cette section de rappeler brièvement le principe de la LPE [52].

III.9.1 La Ligne des Partage des Eaux

La ligne de partage des eaux (LPE) constitue un des outils de base pour la segmentation d'images par morphologie mathématique. Nous nous contenterons ici de rappeler brièvement le principe de la LPE sans entrer dans les détails. Pour une présentation plus complète, on pourra se référer aux ouvrages de référence en ce domaine : la thèse de S. Beucher [56], celle de L. Vincent [57] et la publication de F. Meyer [49] pour la partie plus algorithmique.

III.9.2 Définition de la Ligne de Partage des Eaux

La LPE utilise la description des images en termes géographiques, une image est représentée par une fonction numérique f , donc elle est perçue comme un relief si l'on associe le niveau de gris de chaque point à une altitude. La notion de LPE est étroitement liée à celle de minima régional.

- **Un minimum régional** : est un ensemble connexe de pixels d'altitude constante tel qu'il n'est pas possible, partant de cet ensemble de rejoindre un point de la surface d'altitude inférieure sans avoir à grimper.

- **Bassin versant d'un minimum régional** : c'est la zone d'influence d'un minimum local (une goutte d'eau s'écoulant dans le bassin versant arrive au minimum local).

Soit M un minimum régional d'une image numérique f . Le bassin versant associé à M , noté $BV(M)$, est l'ensemble des pixels x tels qu'une goutte d'eau tombant en x rejoint finalement M .

- **Ligne de Partage des Eaux** : l'ensemble des points de séparations de deux bassins versants adjacents forme la Ligne de Partage des Eaux.

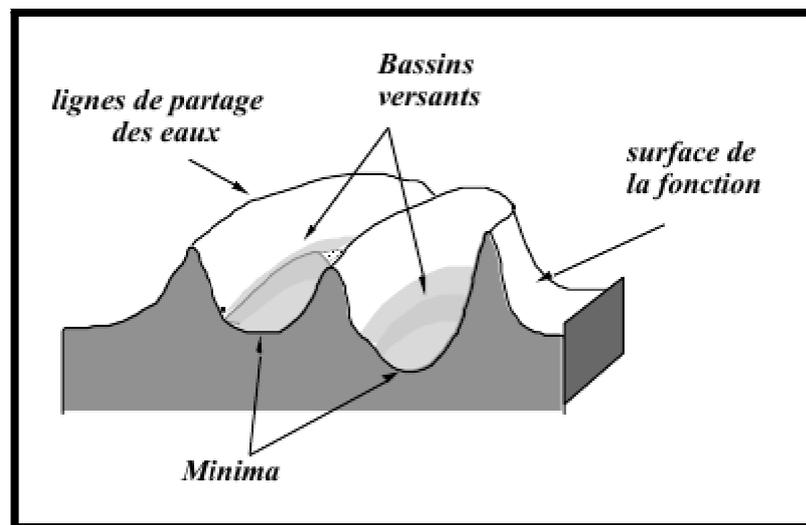


Figure III.13 - La Ligne de Partage des Eaux.

III.9.3 Le calcul de la Ligne de Partage des Eaux

Nous présentons dans cette partie un algorithme efficace permettant la reconstruction de la LPE.

On utilise généralement pour décrire cet algorithme le processus de LPE par inondation, parfois appelée par immersion, c'est la plus utilisée aujourd'hui, une

description de l'image vue comme un relief topographique ou les structures claires sont les pics du relief et les structures sombres correspondent aux vallées du relief. On imagine que cette surface topographique soit trouée aux emplacements des minima.

Plongeons alors lentement cette surface dans un lac (étendu d'eau supposé infinie pour la commodité de l'expérience). L'eau va passer par les trous (les minima locaux), de manière à ce que le niveau d'eau monte à vitesse constante et soit uniforme dans tous les bassins versants. À préciser que l'eau ne peut pénétrer dans les vallées que par ses minima.

Quand les eaux issues de deux minima différents se rencontrent, on monte une digue pour qu'elles ne se mélangent pas. Lorsque la totalité de la surface topographique aura été engloutie, seules les digues émergeront, délimitant les bassins versants au nombre des minima locaux de la fonction f .

À la fin de l'immersion, l'ensemble des digues constituent un ensemble de contours fermés, appelés : Lignes de Partage des Eaux. La figure ci-dessous reprend cette explication :

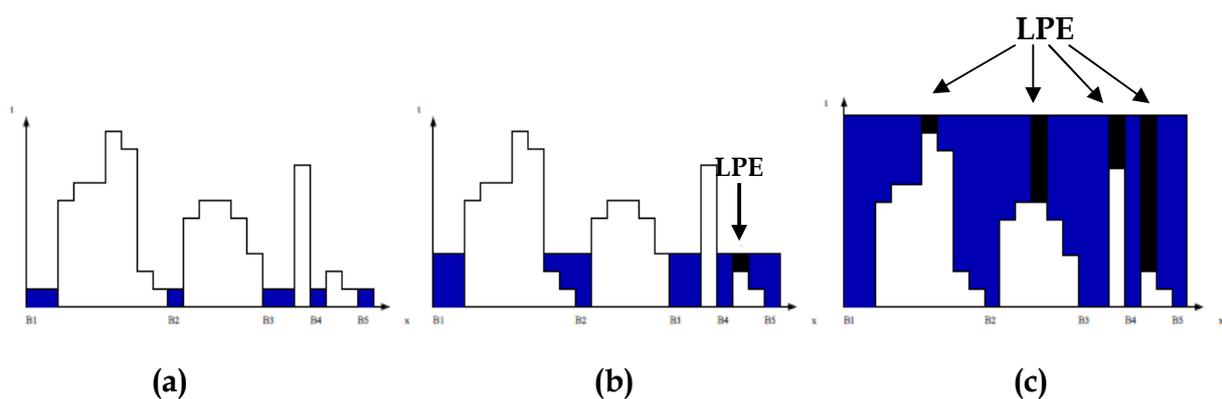


Figure III.14 - Processus de construction de LPE

(a) Inondation du relief à partir de ses minima. (b) Quand deux bassins versants se rencontrent, on construit une digue. (c) Ligne de Partage des Eaux finale.

III.9.4 Problème de la sur-segmentation

Malheureusement, les images réelles étant généralement assez bruitées. Généralement, l'algorithme de ligne de partage des eaux est appliqué sur l'image gradient de l'image à segmenter. Ainsi, les zones homogènes de l'image deviennent des minima régionaux dans l'image gradient. La ligne de partage des eaux va coïncider avec les crêtes de l'image gradient, c'est à dire les contours de l'image originale. Ce qui fait apparaître une forte sur-segmentation.

Pour remédier ce problème, et on souhaite obtenir un résultat pertinent, il faut qu'un seul minima du gradient apparaisse sur chaque région à segmenter. Ceci revient donc à inonder la surface topographique constituée par le gradient de l'image, non plus à partir de ses minima, mais à partir des marqueurs M [47].

Cette LPE est généralement appelée LPE contrôlée par marqueurs.

Le principe de la modification d'homotopie du gradient est d'imposer les marqueurs des régions à segmenter comme minima du gradient (Fig. III.15 b) en supprimant tous les autres minima indésirable.

On inonde ensuite ce gradient à partir de tous les marqueurs. Une et une seule ligne de partage des eaux est alors présente entre chaque marqueur, et elle tendance à se situer sur les contours des objets à segmenter, qui ont déjà été pré-déTECTÉS par le gradient.

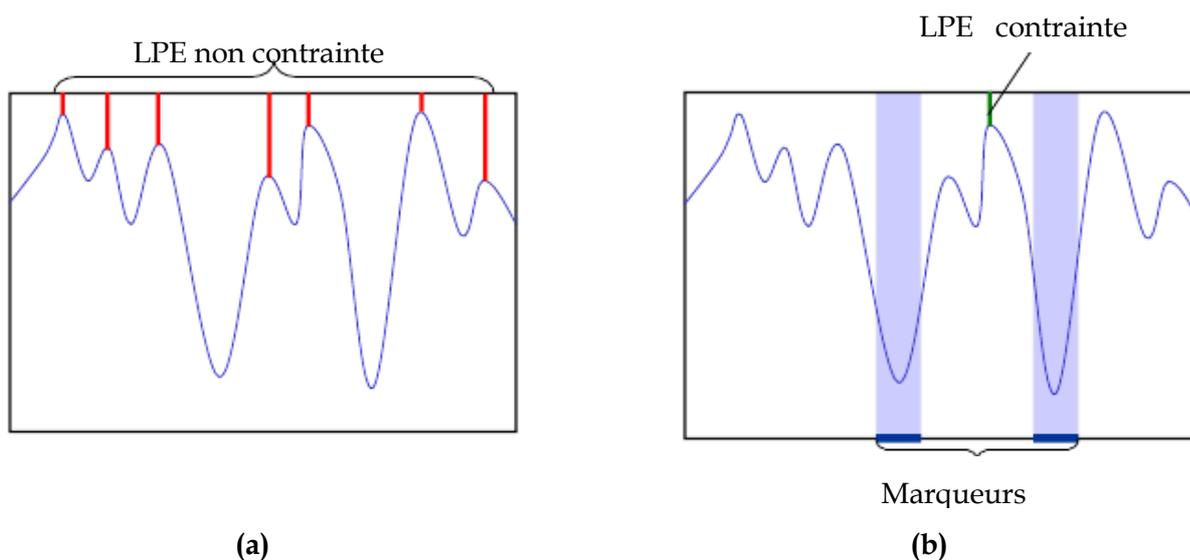


Figure III.15 - Processus de LPE par inondation non contrainte (a), contrainte(b).

La qualité de la segmentation obtenue dépend alors de la pertinence des marqueurs d'une part, et du choix de la fonction que l'on va traiter d'autre part ; cette fonction constitue en quelque sorte le critère de segmentation.

Segmenter une image consiste à mettre en évidence un ensemble de marqueurs M désignant les objets à extraire dans l'image et une fonction f quantifiant les transitions entre ces différents objets. Il suffit alors d'effectuer la LPE de f contrôlée par les marqueurs pour segmenter l'image.

La recherche des marqueurs constitue la phase "intelligente" du paradigme de segmentation morphologique, la phase "automatique" consistant à appliquer l'algorithme de ligne de partage des eaux sur la fonction de segmentation (généralement l'image gradient de l'image originale filtrée).

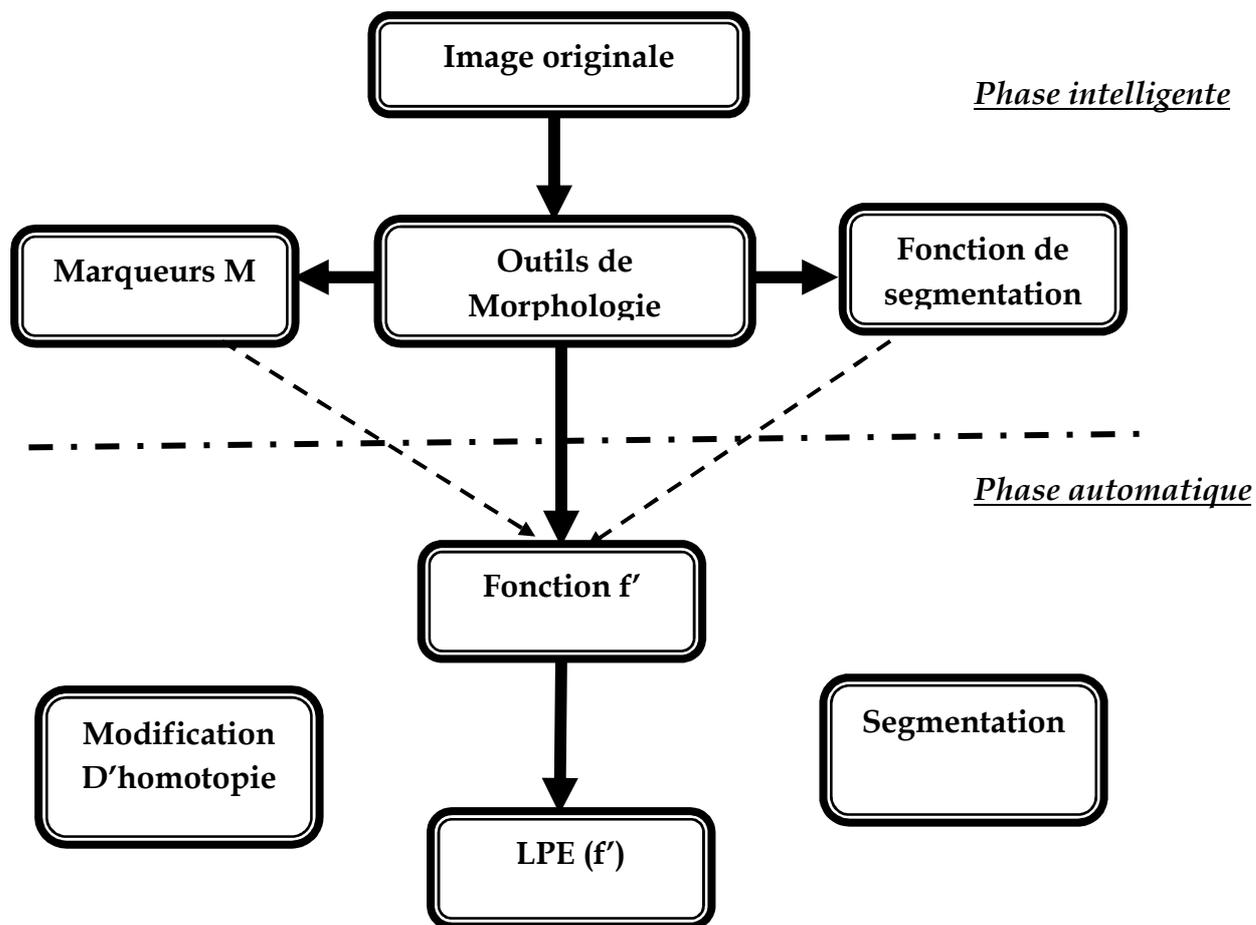


Figure III.16 - Principe de la segmentation par LPE assistée par marqueurs.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre introductif à la Morphologie Mathématique, nous avons présenté les principes de base de la Morphologie Mathématique qui offre un grand nombre d'outils très puissants de traitement et d'analyse d'images qui l'on retrouve sous différentes rubriques dans certains logiciels d'analyse d'images, dont le but est l'étude des objets en fonction de leurs formes , de leurs tailles, des relations avec leurs voisinages, de leurs textures et de leurs niveaux de gris ou de leurs couleurs.

Dans une première section, nous avons présenté des définitions sur les transformations morphologiques élémentaires, ainsi que des outils plus avancés et plus complexes : les filtres morphologiques, la notion de géodésie et la reconstruction morphologique.

Dans une deuxième section, nous avons décrit la notion du squelette qui permet de réduire l'épaisseur des composantes connexes jusqu'à une valeur infiniment petite. Et dans la dernière section, nous avons présenté une technique de segmentation d'images puissante issue de la Morphologie Mathématique basée sur le concept de Ligne de Partage des Eaux (LPE). On a montré en particulier comment le concept de marquage permet d'obtenir une segmentation de bonne qualité.

Dans le chapitre qui suit, nous présentons deux techniques d'extraction de la route. La première présente un algorithme de segmentation issue de la Morphologie Mathématique : la Ligne des Partage des Eaux (LPE) et la deuxième méthode s'est portée sur la Transformée de Hough (TH).

IV.1 Introduction

Les routes, les voies ferrées, et les petites rivières, sont les éléments linéiques prépondérants dans un SIG. Leur extraction est complexe et de très nombreux travaux ont été consacrés à l'extraction des routes en particulier.

L'extraction d'un réseau routier à partir d'une image satellitaire à haute résolution spatiale est l'objectif de notre travail. Après une étude générale sur les méthodes appliquées dans ce domaine présentées dans le chapitre 2 et enfin de remédier aux problèmes rencontrés dans ces méthodes, nous présentons dans ce chapitre une approche permettant de donner une solution au problème d'extraction du réseau routier, en tenant compte des améliorations apportées par les autres chercheurs.

Enfin, le problème de détection de routes est un problème complexe et toutes les méthodes rappelées ici sont loin d'être parfaites. Chaque approche possède ses avantages et inconvénients face à des situations très particulières.

Notre approche consiste à mettre au point un modèle systématique d'extraction de réseaux routiers de manière surfacique, qui tient compte à la fois de l'aspect radiométrique et de l'aspect géométrique des routes. Le fait de s'appuyer sur un critère radiométrique permet d'assurer la continuité de la détection même le long de routes partiellement masquées par des obstacles. Le critère géométrique permet de compléter le processus de détection en apportant au réseau détecté une précision suffisante.

Le résultat souhaité est l'extraction du réseau routier principal correspondant aux routes visibles ou partiellement masquées par des obstacles. Ceci impose certaines contraintes à la méthode. Elle doit être robuste aux variations locales du contexte (objets sur les routes).

D'un point de vue opérationnel, nous voulons un algorithme le plus automatique possible et travaillons sans apport de données extrinsèques pour aider l'extraction. Ainsi l'intervention d'un opérateur extérieur pour contrôler, corriger ou initialiser l'extraction, est réduite, et la plupart des données nécessaires au processus d'extraction sont extraites directement des données (l'image de départ). Nous exigeons du résultat de l'extraction, une propriété importante : la fiabilité de l'extraction. Le taux de fausse alarme est ainsi réduit au maximum, au détriment parfois du taux de détection.

IV.2 Les entrées de la méthode

a. Les images

Comme nous l'avons mentionné, notre méthode fait une extraction d'une manière surfacique du réseau routier, ceci nous amène à travailler sur des images à haute résolution spatiale inférieure à 5 mètres par pixel.

Le contexte est de plus en plus complexe lorsque les scènes s'urbanisent. C'est pour cette raison qu'on a choisi d'appliquer notre approche sur une image IKONOS à haute résolution spatiale d'une région rurale d'île *Kish Island* (Persian Gulf) (Fig. IV.2.a).

b. Les connaissances a priori sur les routes

Les principales causes d'échecs des méthodes d'extraction dans un environnement bruité sont pour l'essentiel dues à l'écart par rapport au modèle théorique. Ainsi, les principales connaissances a priori introduites et qui composent le modèle de routes sont :

- La route est représentée sur l'image an tant qu'élément de surface (la distance entre les deux bords est supérieure à trois pixels).
- Le parallélisme local des bords des routes sera utilisé pour la localisation précise de la route.
- Les routes sont relativement rectilignes.

Il s'agit de la partie centrale de la méthode. Mais avant de se lancer dans la phase proprement dite d'extraction, l'image doit être traitée.

IV.3 Le processus d'extraction du réseau routier

L'extraction du réseau routier se fait suivant un enchaînement de plusieurs étapes, la première consiste en un prétraitement de l'image satellite pour la préparer à la phase d'extraction. Une étape de détection des bords de la route se fait grâce à une segmentation LPE (Ligne de Partage des Eaux) développée dans le chapitre3. Nous aurons l'occasion dans la suite de ce chapitre de donner les détails de l'implémentation de ces différentes tâches, mais à présent, voici l'organigramme de ce processus (Fig. IV.1) :

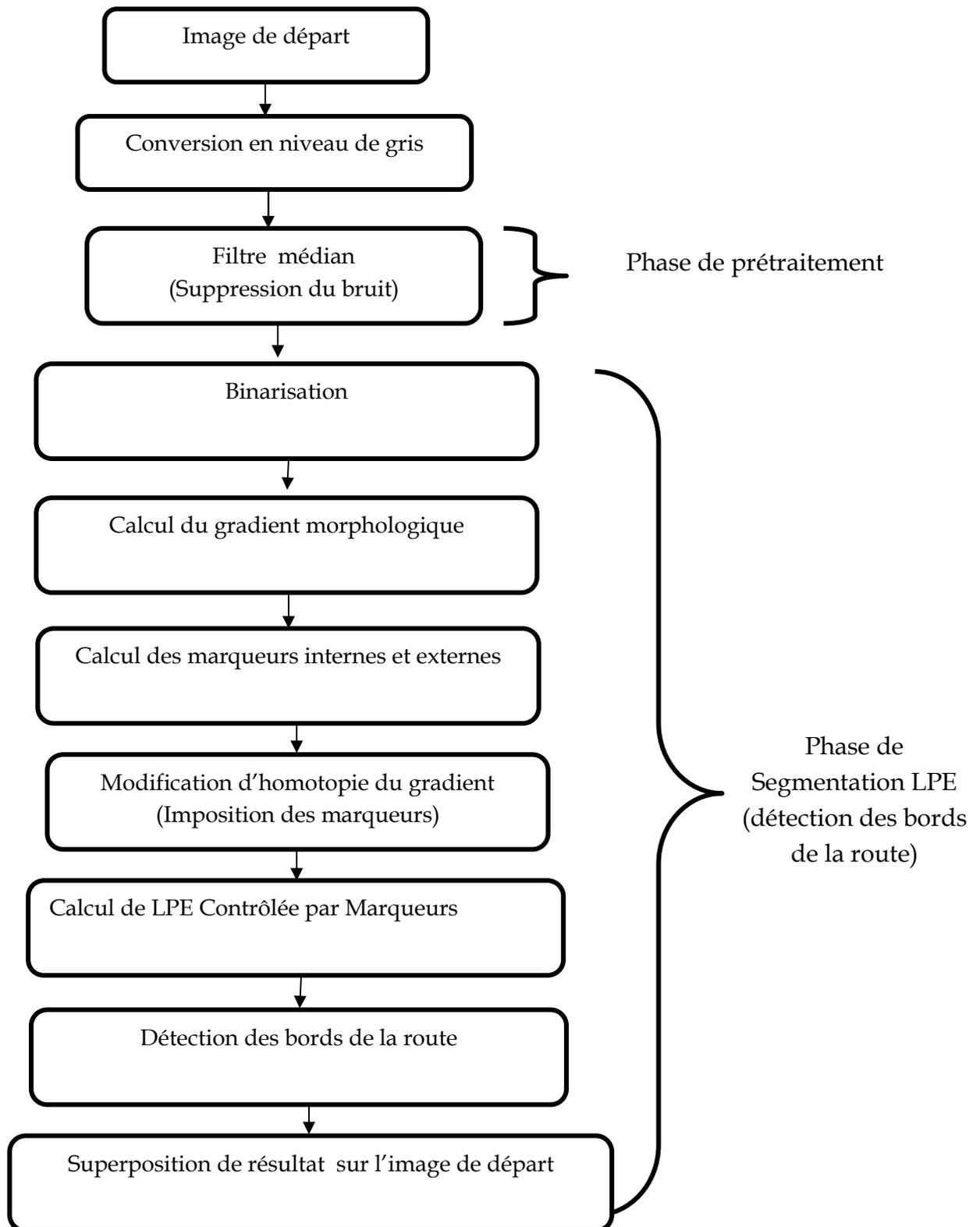


Figure IV.1 -Les principales étapes de l'algorithme d'extraction de la route.

IV.3.1 Passage en une image en Niveaux de Gris (NG)

Pour la détection de la route, c'est la représentation en niveaux de gris de la couleur qui est utilisée, et ce pour rester dans le contexte des besoins des filtres de lissage et de détection. En effet, ces filtres considèrent l'image comme étant un tableau à deux dimensions de pixels, ayant chacun, une valeur bien définie sous forme d'une seule composante, ceci a bien évidemment pour effet d'accroître la vitesse de calcul.

Nous avons travaillé sur des images à 256 niveaux de gris résultant de la numérisation de prises de vue satellitaires. Plusieurs méthodes permettent la transformation d'une image couleur en une image à niveau de gris telles que le calcul de la moyenne des composantes RVB (Rouge, Vert, Bleu), ou bien, comme c'était le cas dans notre travail, de procéder en faisant appel à la formule suivante :

$$\text{niveauGris} = (0,299 * \text{Rouge} + 0,587 * \text{Vert} + 0,114 * \text{Bleu})$$

Cette formule reflète le fait que l'œil est plus sensible à certaines longueurs d'ondes de la lumière que d'autres, qui affecte la perception de la clarté de la couleur.



(a)



(b)

Figure IV.2 - Conversion en image en Niveau de Gris (NG) (b) de l'image en couleur (a).

IV.3.2 Prétraitement des images

Avant de rentrer dans la phase d'extraction des bords de la route par une segmentation Ligne de Partage des Eaux (LPE), l'image doit subir une succession de traitement rendant ses contours plus visibles, augmentant ainsi le taux de réussite de l'algorithme d'extraction.

- **Lissage de l'image (suppression du bruit)**

Souvent lors de la prise de vues, on a des images altérées par rapport aux scènes qu'elles représentent où des bruits d'origines diverses viennent s'ajouter à ces images. Ainsi, une même scène apparaîtra différemment selon le type de capteur utilisé, la résolution spatiale ou encore la bande spectrale considérée.

Ces bruits sont généralement à l'origine des erreurs de détection des objets sur les images, notamment la reconnaissance des routes et leur extraction, à ce propos ; un filtrage non linéaire est appliqué afin de limiter, voire annuler l'effet de ces bruits.

Cependant, le filtrage (lissage de l'image originale) doit être choisi avec soins : il faut privilégier la conservation des contours par rapport à la réduction du bruit.

- **Le filtrage linéaire** : les filtres linéaires utilisent une fenêtre (masque), qui va contenir des coefficients. Le filtrage se fait par convolution de l'image avec ce masque. Le résultat est un lissage de l'image plus ou moins fort selon la taille du masque et les coefficients employés. Le filtrage linéaire peut être intéressant pour réduire le bruit présent dans l'image, l'inconvénient est qu'il effectue ce lissage sur l'image entière ; les contours seront donc lissés, qui deviennent flous, bien que l'intérieur des objets, ce qui n'est pas souhaitable.

- **Le filtrage non linéaire** : pour la suppression du bruit, le filtre médian est généralement très efficace, dans notre cas, car il permet d'éliminer les valeurs aberrantes de l'image dues au bruit sans déformer les contours.

Le but principal du filtrage dans notre cas est de rendre l'homogénéité sur la route au même niveau (voir Fig. IV.3.b). Celle-ci va nous permettre d'introduire rapidement la notion de filtre non linéaire dans le cas le plus simple, le filtre médian, à savoir celui d'une image fixe en niveaux de gris.

Pour la suppression du bruit, un filtre médian, est appliqué sur un voisinage de 3x3.

Algorithme d'exécution des filtres médians

Pour tout point P_{xy} de l'image faire

 listeVoisinage = P_{xy} augmenté par l'ensemble de ses voisins

 Ordonner listeVoisinage selon un ordre croissant ou décroissant

 nouveau TableauDePixels[x,y] = la valeur médiane de la listeVoisinage

finPour

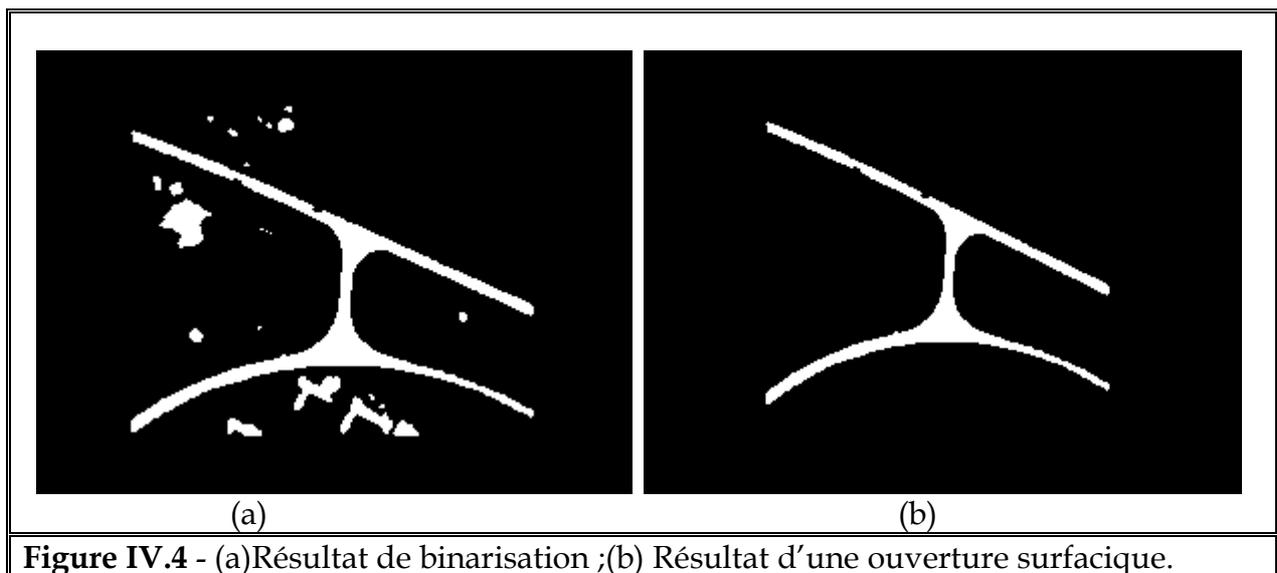
Affecter nouveauTableauDePixels à la nouvelle image



Figure IV.3 -Lissage de l'image : l'image originale en NG (a) ; lissage de l'image (filtre médian) (b).

IV.3.3 Binarisation

Puisque nous exploitons des opérateurs de la Morphologie Mathématique binaire, l'image fournie en entrée doit être binarisée, c'est-à-dire le passage de l'image en niveau de gris à une image binaire où les pixels à 1 correspondent aux objets et les pixels à 0 au fond de l'image. Un seuillage globale appliqué à l'image filtrée devrait permettre de localiser partiellement la route. L'identification du seuil est déterminée manuellement. Au terme de cette opération, nous remarquons qu'on a extrait la route en plus de quelques régions très brillantes sur la scène (Fig. IV.4.a). Afin de surmonter ce problème, et éliminer ces régions, il est préférable de se servir d'une ouverture surfacique pour supprimer les objets indésirables qui ne dépassent pas une surface λ (le seuil λ dépend des objets que l'on désire enlever) (Fig. IV.4.b).



IV.3.4 La détection des contours de la route par LPE

La Morphologie Mathématique fonde son paradigme de segmentation sur la notion de Ligne de Partage des Eaux (LPE). Dans tout ce qui suit l'image est vue comme un relief topographique : les NG représentent les altitudes, les minima régionaux définissent les vallées et les contours recherchés coïncident avec des lignes de crêtes de relief.

Pour appliquer correctement la LPE, nous devons faire face à deux sous problèmes :

1. L'image sur laquelle la LPE sera calculée.
2. L'extraction des marqueurs, chargé de localiser les sources d'inondations des régions d'intérêts.

IV.3.4.1 Calcul du gradient morphologique

Nous avons vu dans le chapitre 3, que le gradient morphologique permet la distinction des changements de valeur de gris perçus entre l'objet (la route) et le fond. Dans un premier temps nous avons calculé la LPE sur le gradient de l'image filtrée (voir Fig. IV.5.a).

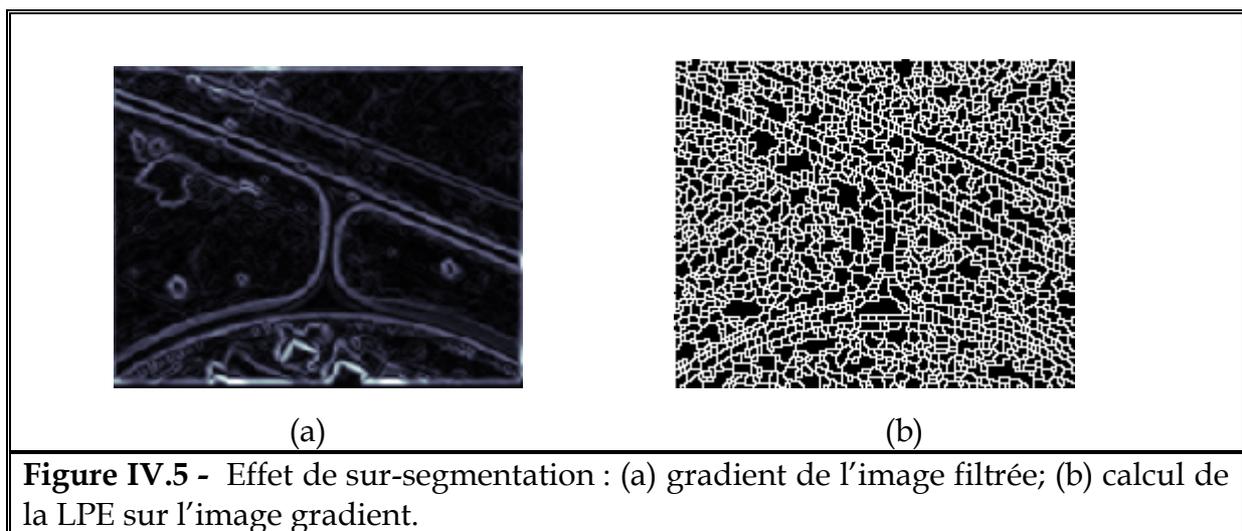


Figure IV.5 - Effet de sur-segmentation : (a) gradient de l'image filtrée; (b) calcul de la LPE sur l'image gradient.

La figure (Fig. IV.5.b) montre que la LPE appliquée directement sur l'image gradient, n'a pas pu segmenter correctement la route ; ses contours sont mal définis, ce qui produit un phénomène de fuite, les eaux laissent leurs bassins par de petites ouvertures, les lacs se rencontrent en dehors des lignes de crêtes du relief et donc une mauvaise segmentation.

En plus une sur-segmentation due au grand nombre de minimax présents dans l'image gradient. Le moyen de résoudre ce problème de sur-segmentation consiste à contrôler le nombre des minima de l'image gradient, on ne garde que les minima les plus significatifs et éliminer les autres. A noter qu'une sur-segmentation est totalement éliminée lorsqu'on arrive à obtenir autant de régions que d'objet dans l'image.

Pour éviter toute sur-segmentation et pour orienter convenablement l'issue de la LPE : on doit modifier le relief avant de l'inonder, c'est-à-dire, réduire le nombre de minima à partir desquels l'image est inondée, afin de limiter les sources d'inondation, en utilisant des marqueurs préalablement et judicieusement choisis. On parle dans ce cas de calcul de la Ligne de Partage des Eaux Contrôlée par Marqueurs.

L'application de la ligne de partage des eaux sur l'image du gradient sur laquelle les marqueurs obtenus sont imposés comme minima (par changement d'homotopie) devrait permettre en théorie d'obtenir les contours des structures recherchées (contours de la route).

IV.3.4.2 Recherche des marqueurs internes et externes

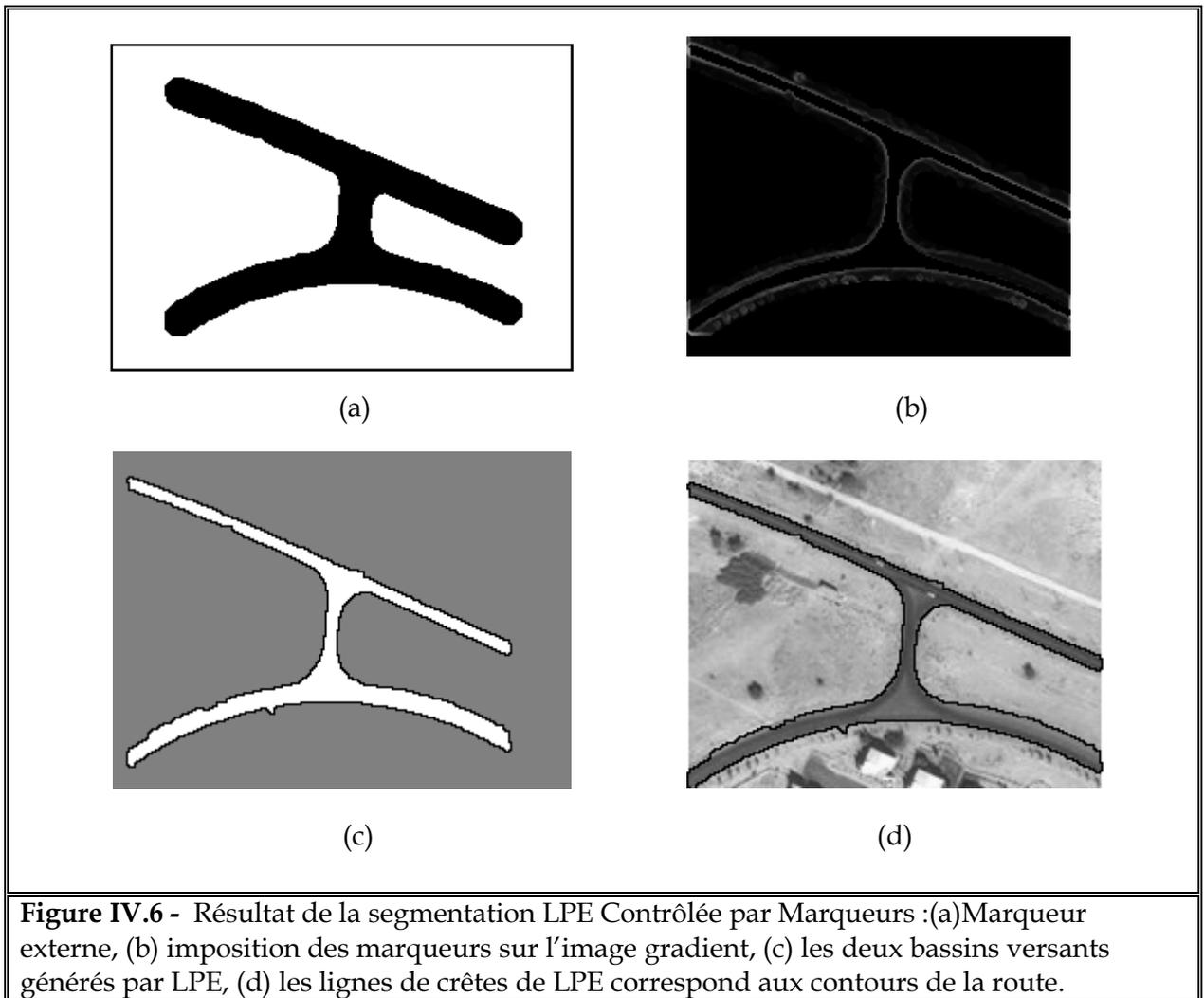
La détermination des marqueurs internes et externes est cruciale dans l'algorithme de LPE Contrôlée par Marqueurs. Nous avons imposé deux sources d'inondation : l'une est placée à l'intérieur de la route, et l'autre à l'extérieur.

1. **Marqueur interne** : A l'intérieur de la route, il doit y avoir une seule source d'inondation. Dans notre cas le marqueur interne correspond tout simplement à l'image binaire calculée dans l'étape de binarisation (Fig. IV.4.b).

2. Marqueur externe : Pour calculer le marqueur externe, nous utilisons la composante connexe correspondant à la structure recherchée détectée à l'étape de binarisation. Nous dilatons l'image binaire de manière à ce que les contours de la structure dilatée soient situés entièrement en dehors de la structure recherchée : pour cela nous utilisons un élément structurant relativement grand. Nous prenons ensuite le complémentaire de l'image, pour obtenir le fond, qui nous sert de marqueurs externe (Fig. IV.6.a).

IV.3.5 Modification d'homotopie du gradient (imposition des marqueurs)

A l'issue de cette étape, nous avons donc un marqueur interne et un marqueur externe à la structure recherchée : nous appliquons donc la ligne de partage des eaux sur l'image gradient de la région d'intérêt. Pour cela nous modifions l'homotopie du gradient en utilisant la méthode d'inondation. Le principe de la modification d'homotopie du gradient est de ne conserver entre les marqueurs que les lignes de crêtes les plus élevées du gradient (Fig. IV.6.b). Les figures (Fig. IV.6.c et Fig. IV.6.d) montrent bien que l'application de la LPE sur le gradient modifié permet d'obtenir deux bassins versants : un bassin versant correspondant à la structure recherchée, et un bassin versant correspondant au fond (Fig. IV.6.c). Effectivement les bassins versants non marqués sont inondés par l'eau provenant d'un bassin versant marqué sans construire les digues entre les deux.



Pour évaluer les performances de notre algorithme, nous l'avons testé sur d'autres images de différents types de haute résolution. Nous allons mettre en évidence lors de ces tests trois contextes : le péri-urbain, le rural, et le milieu urbain. L'algorithme de la LPE contrôlée par marqueurs a prouvé son efficacité dans la détection des contours de la région recherchée (Fig. IV.7.a, Fig. IV.7.b), par contre, l'image de contexte urbain ne donne pas de bon résultats, le problème majeur est la structure complexe de la scène, qui contient de nombreux objets différents comme les arbres, toits des maisons, des petits chemins, etc (voir Fig. IV.7.c).



(a)



(b)



(c)

Figure IV.7 - Des exemples pour la détections de la route : (a) image de contexte péri-urbain, (b) image de contexte rural, (c) image de contexte urbain.

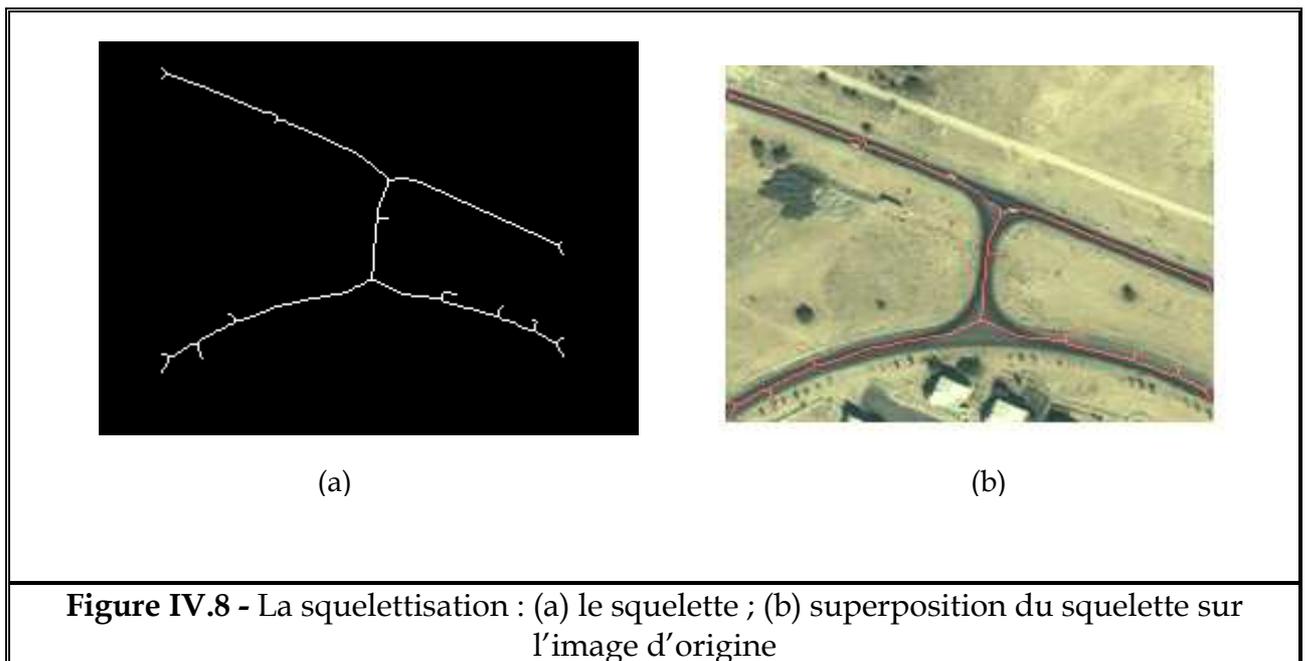
IV.4 La squelettisation

IV.4.1 Le squelette

Une approche importante pour représenter la forme structurale d'une région du plan est de la réduire à un graphe. Cette réduction peut être accompli en obtenant le squelette de la région par le biais d'un algorithme d'amincissement (aussi appelé l'axe médian). Le squelette est surtout approprié pour représenter les régions allongées comme les routes.

La squelettisation ou l'amincissement morphologique est très utilisé dans le domaine de la reconnaissance et d'analyse de forme. C'est un processus où la largeur du réseau de route extrait est réduite à un pixel. L'algorithme d'amincissement enlève des pixels sur les limites de l'objet jusqu'à ce que la largeur de l'objet devienne un pixel et il assure que l'objet ne se brise pas pendant le processus d'amincissement.

Le résultat de la squelettisation est montré dans la figure (Fig. IV.8.a):



Nous remarquons (Fig. IV.8.a), que le squelette obtenu contient des branches qui sont dues à des petites irrégularités du contour de l'ensemble initial et non pas à des propriétés de l'objet qui puisse être utiles pour une analyse de forme. Il est donc intéressant de modifier le squelette pour ne garder que la branche essentielle, pour cela, nous appliquons une technique efficace pour le filtrage du squelette : il s'agit d'un *ébarbulage sélectif*, dans lequel toutes les barbules ayant une longueur trop petite sont enlevées.

Pour pouvoir expliquer le concept de cette technique, nous définissons tout d'abord les points caractéristiques du squelette :

- Les points de bifurcations : ce sont tous les points x qui appartiennent au squelette (S), qui ont plus de deux voisins.
- Les points finaux : sont tous les points x appartiennent au squelette (S), qui ont un seul voisin.
- Les branches : sont les composantes connexes de l'ensemble (S) par rapport aux points de bifurcation.

Un algorithme qui n'ébarbule que les branches ayant une longueur inférieure à n_{\max} pixels tout en gardant les autres doit d'abord être capable de distinguer les unes des autres. Intuitivement parlant : pour distinguer entre la branche principale et les barbules à enlever, pour cela, nous nous plaçons sur un point de bifurcation et nous considérons les branches de longueur $n \leq n_{\max}$ qui se dirigent vers les points finaux du squelette. Parmi ces branches, nous ne gardons que les plus longues (voir Fig. IV.9) [48].

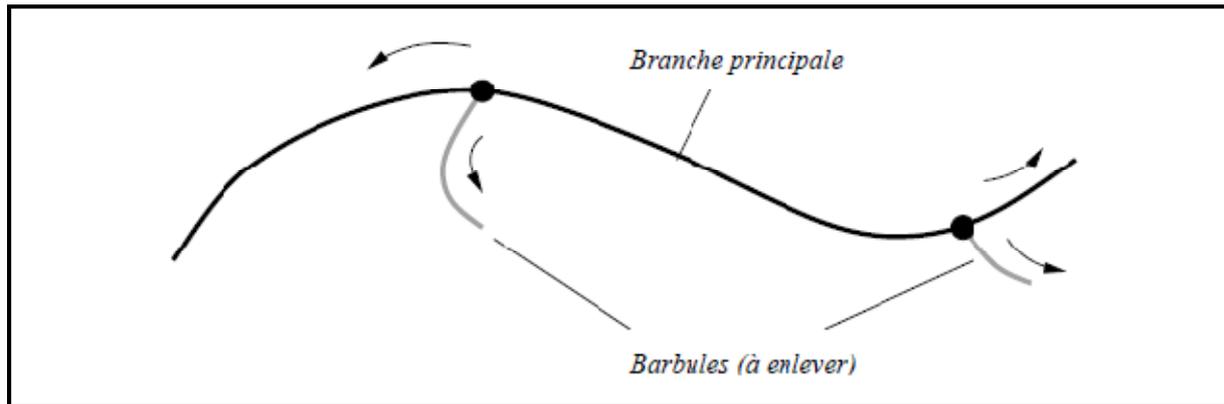
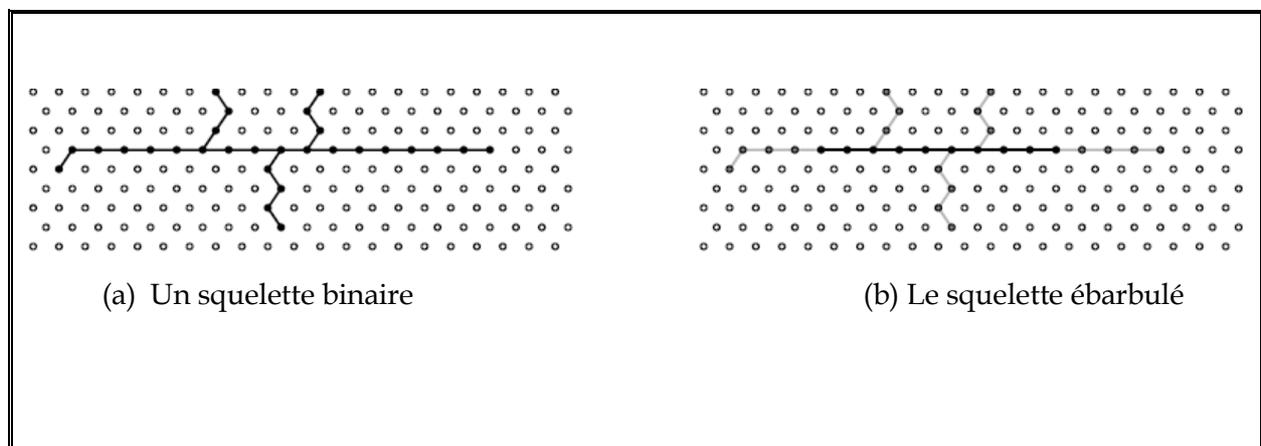


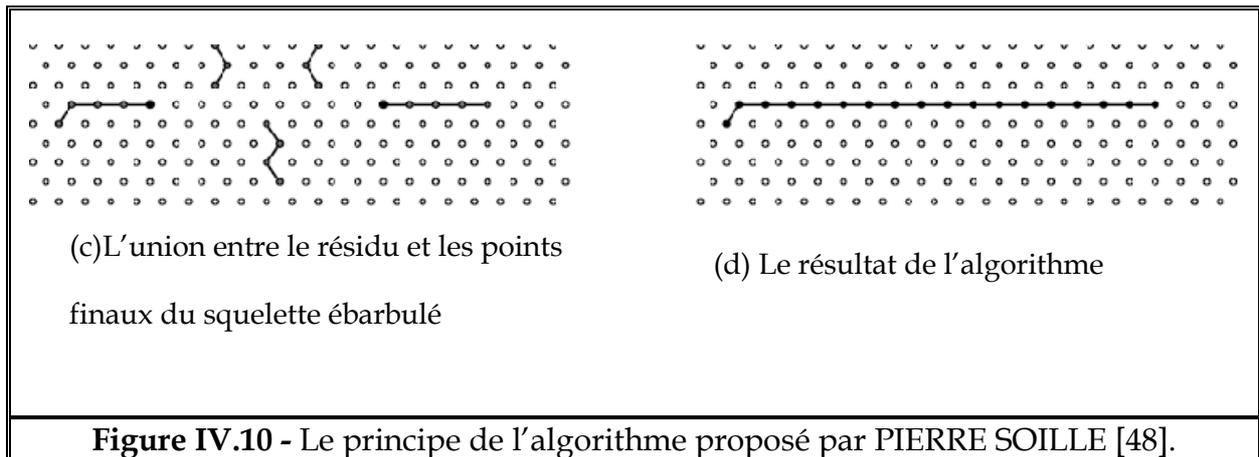
Figure IV.9 - Les branches principales (en noir) et les barbules (en gris).

➤ L'algorithme de Pierre Soille

Dans [64], l'auteur propose une méthode pour enlever toutes les barbules d'un squelette S qui ne font pas plus de n_{\max} pixels de longueur tout en gardant les autres branches du squelette. La technique est la suivante :

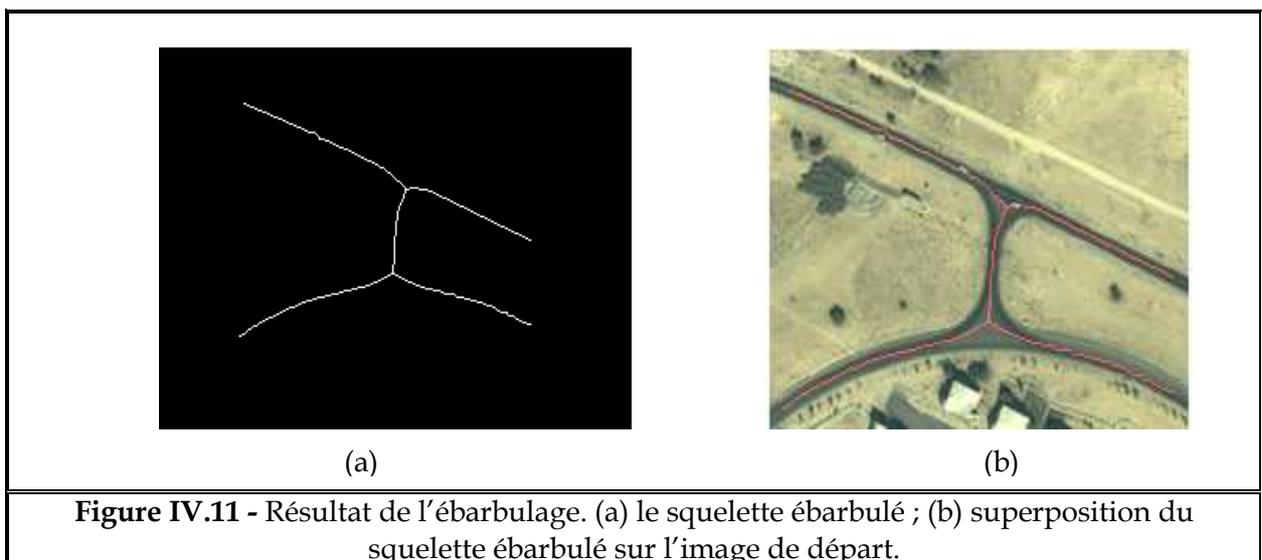
Le squelette binaire (Fig. IV.10.a) est ébarbulé de n_{\max} pixels (voir Fig. IV.10.b), puis les points finaux du squelette ébarbulé sont déterminés (Fig. IV.10.c), ensuite, toutes les parties du squelette qui ont été enlevées par l'ébarbulage et qui sont connexes à un point final du squelette ébarbulé sont reconstruites et ajoutées au squelette ébarbulé (voir Fig. IV.10.d) [48] .





Dans la figure (Fig. IV.10), un exemple est donné pour $n_{\max} = 4$: les barbules ayant une longueur de $n \leq 4$ pixels sont enlevées, alors que les autres sont reconstruites et gardées entièrement. Par contre, l'algorithme ne donne pas toujours le résultat souhaité. Si en ébarbulant l'image, une bifurcation du squelette original est enlevée, toutes les branches qui y débouchent sont reconstruites.

Le résultat obtenu par ébarbulage appliqué sur notre image binaire est montré dans la figure (Fig. IV.11.a) :



Le résultat obtenu par l'algorithme d'ébarbulage est très satisfaisant, la plupart des petites barbules ont été supprimées, laissant uniquement l'axe principal de la route.

Dans le paragraphe suivant, nous décrivons une autre approche qui permet la détection de l'axe médian de la route. Cette technique s'est montrée robuste. Le noyau de l'algorithme est l'application d'une méthode morphologique d'extraction du l'axe central de la route : la Ligne de Partage des Eaux(LPE).

IV.4.2 L'extraction de l'axe médian de la route à l'aide de la transformation de Ligne de Partage des Eaux

Nous décrivons, un deuxième algorithme qui détecte d'une manière efficace directement l'axe médian de la route correspond aux lignes de crêtes obtenues par la ligne de partage des eaux. L'idée principale est d'appliquer la ligne de partage des eaux sur le négatif de la fonction distance (image marqueur) de l'image binaire, pour cela, nous présentons ci-dessous l'organigramme (Fig. IV.12) qui permet d'extraire le squelette (l'axe médian) de la route par la LPE.

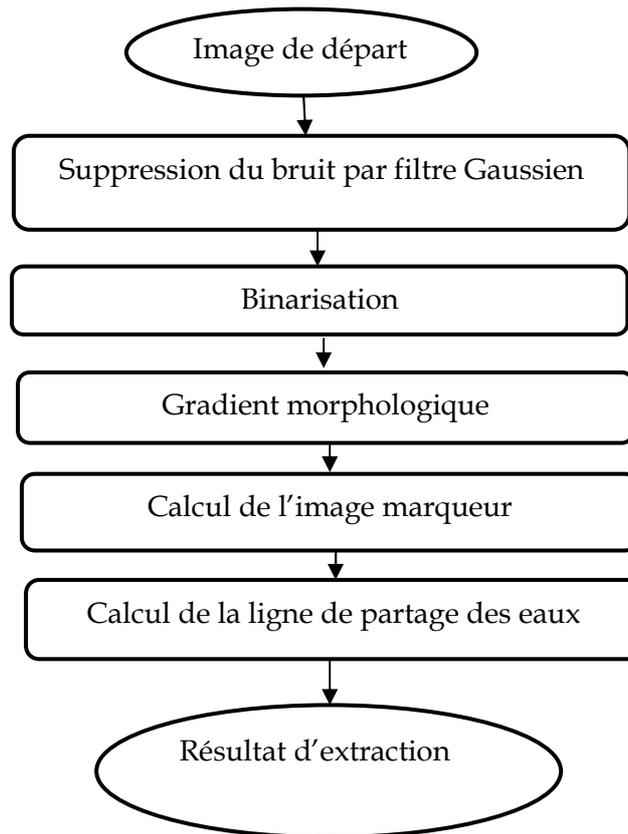


Figure IV.12 - Organigramme d'extraction de l'axe médian de la route par la transformation LPE.

Dans ce qui suit, nous allons détailler chacune de ces étapes :

IV.4.2.1 Le préfiltrage

Un problème plus délicat est la présence de bruit dans l'image. Tout d'abord, le bruit est diminué par un filtrage avec une gaussienne de petite taille (1 pixels). Ce filtrage enlève du bruit sans enlever les structures importantes (Fig. IV.13.b). Le résultat de ce préfiltrage est montré dans la figure (Fig. IV.13) ; ce préfiltrage ne change pas beaucoup l'image, mais les petits exsudats présents dans l'image de départ sont enlevés, et le bruit est réduit.

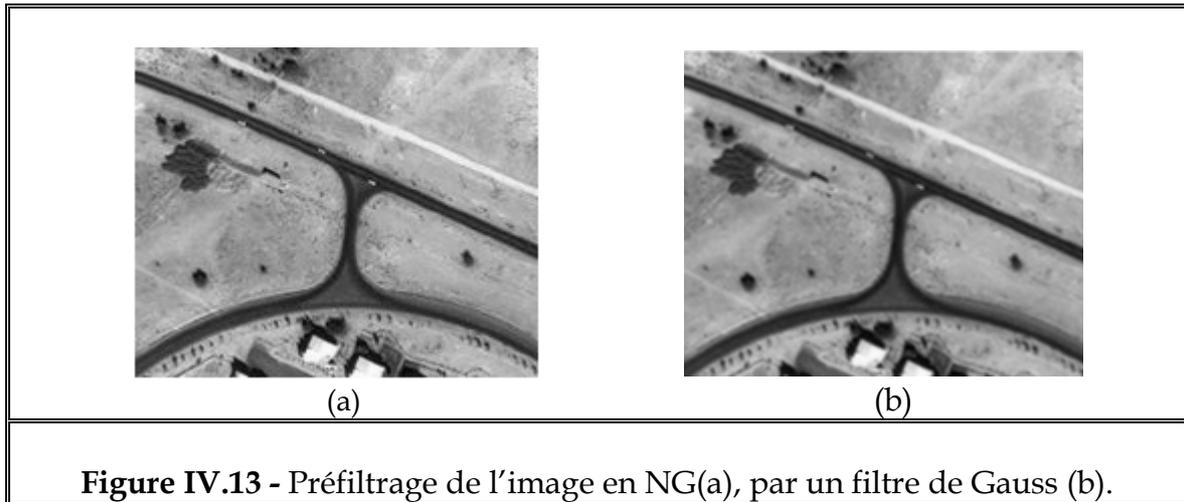


Figure IV.13 - Préfiltrage de l'image en NG(a), par un filtre de Gauss (b).

IV.4.2.2 Binarisation

Après le prétraitement de l'image en NG afin de ressortir tous les détails, les régions candidates susceptibles d'être des routes sont isolées de l'arrière plan par une simple opération de seuillage manuel (voir Fig. IV.14.a), suivie d'une ouverture surfacique qui enlève les objets indésirables (voir Fig. IV.14.b).

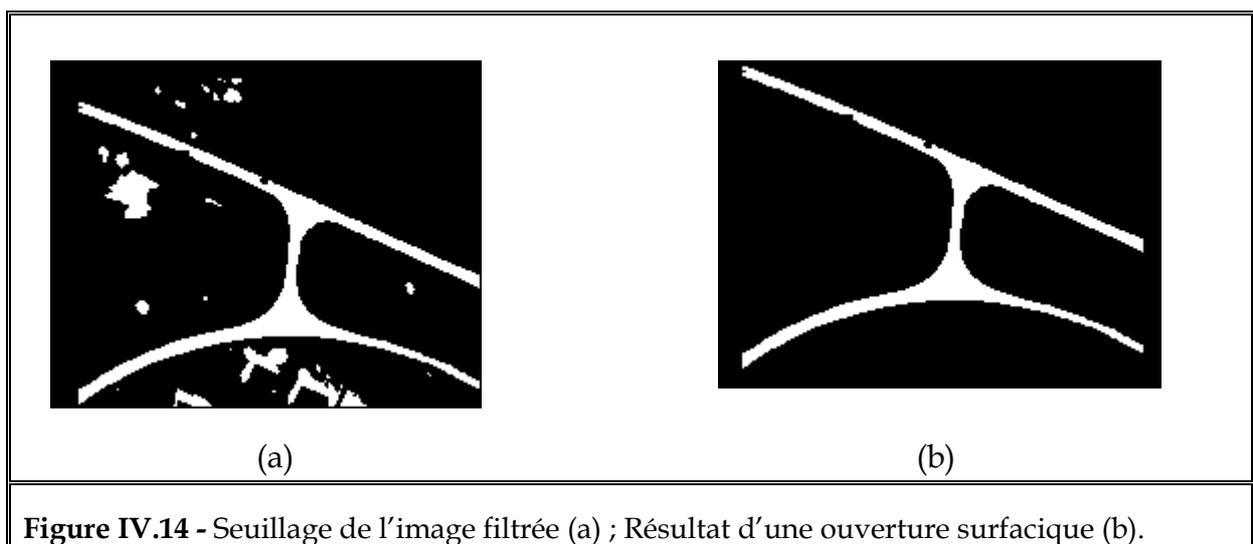


Figure IV.14 - Seuillage de l'image filtrée (a) ; Résultat d'une ouverture surfacique (b).

Comme on a vu précédemment, que le calcul direct de la LPE sur le gradient morphologique de l'image génère une sur-segmentation. La résolution de ce problème revient tout simplement à sélectionner certains minima, c'est-à-dire, réduire le nombre de minima à partir des quels l'image est inondée, afin de limiter les sources d'inondation, en utilisant des marqueurs préalablement choisis. On parle du calcul de la Ligne de Partage des Eaux Contrôlée par Marqueurs.

IV.4.2.3 L'image marqueur

L'usage de la Ligne de Partage des Eaux Contrôlée par Marqueurs est expliqué :

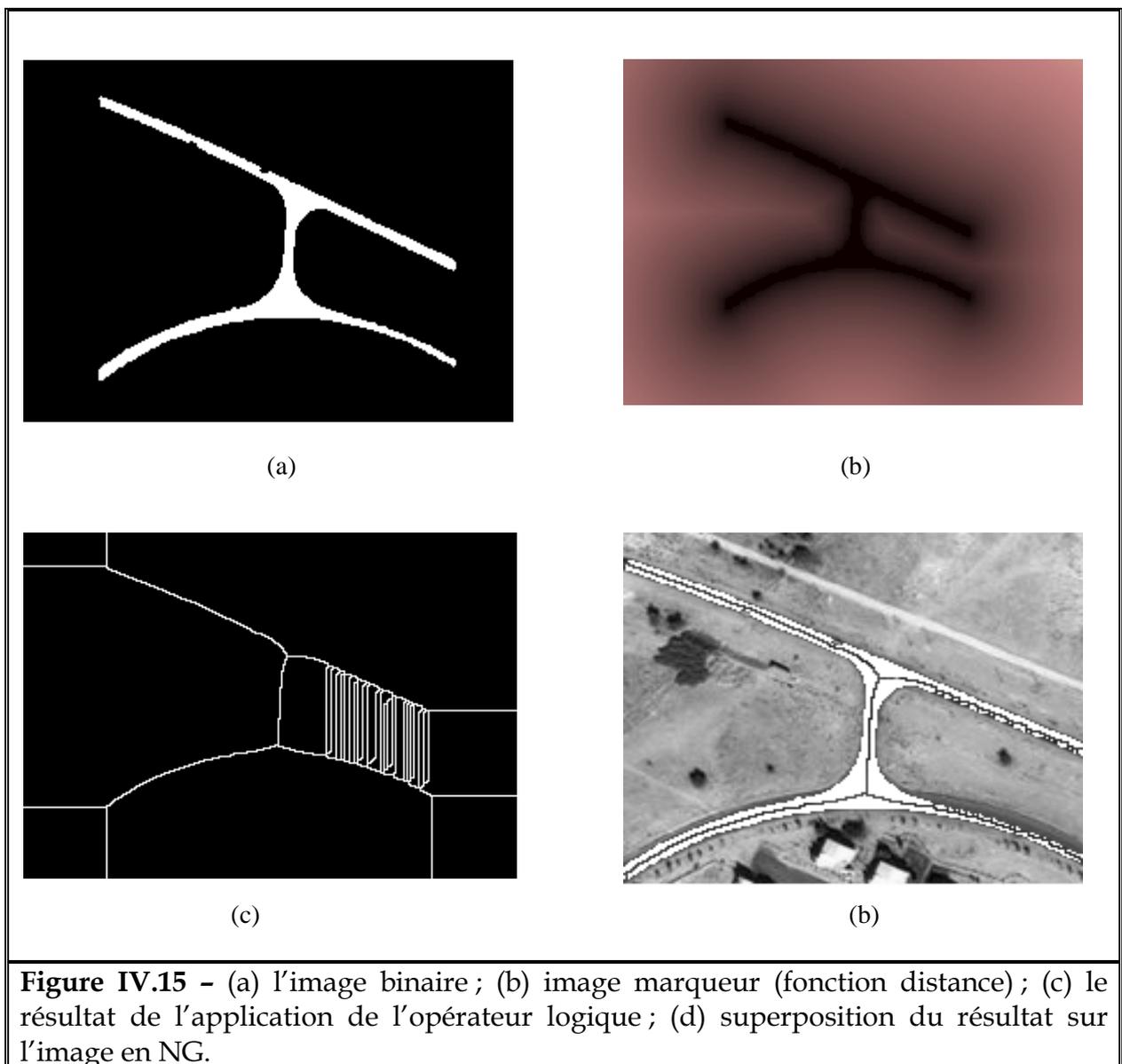
A partir des minima importants, l'image est inondée et des barrages sont construits entre les lacs qui se rencontrent ; ces barrages constituent la ligne de partage des eaux. Dans notre cas, le but n'est pas de trouver des bassins versants (comme c'est souvent le cas), mais c'est la ligne de partage des eaux elle-même qui nous intéresse.

La question de l'obtention des marqueurs, c'est-à-dire, l'ensemble de points d'où l'inondation commence, est un problème central dans les algorithmes de segmentations par LPE. Le marqueur généralement utilisé dans ce cas, est la fonction distance de l'image binaire.

La fonction distance, désigne la distance entre le pixel candidat qui vaut 0 et le pixel qui lui est le plus proche non zéro. Ce sont les maxima locaux. Dans la fonction distance, ces maxima locaux sont représentés avec des niveaux de gris plus élevés (Fig. IV.14.b).

IV.4.2.4 Détection des lignes de crêtes à l'aide de la LPE

Ayant déterminé le marqueur, la ligne de partage des eaux est calculée sur le négatif de la fonction distance de l'image binaire. Notre objectif est de ne détecter que les lignes de crêtes elles-mêmes, pour cela, il suffit d'introduire un opérateur logique (AND) entre l'image binaire et la ligne de partage des eaux pour éliminer les bassins versants. On peut dire finalement, que l'algorithme de détection de l'axe médian de la route, basé sur la ligne de partage des eaux contrôlée par marqueurs, est un algorithme robuste et donne des résultats fiables pour des images bien contrastées (voir Fig. IV.15.d).



IV.4 Extraction des routes par la transformée de Hough

Après l'étude et l'analyse de la 1^{ère} méthode proposée dans ce travail, nous présentons une autre méthode permettant l'extraction des segments de lignes pour la mise en évidence du réseau routier. Nous avons appliqué la Transformée de Hough dédiée à l'extraction des lignes ; vue sa puissance à extraire les structure linéaires.

Dans la détection d'éléments spécifiques, il y a des algorithmes qui entreprennent de suivre les contours et les lier par des critères plus ou moins complexes afin de remonter jusqu'aux formes recherchées. Une autre approche de ce problème serait de tenter d'accumuler des évidences sur l'existence d'une forme particulière telle qu'une droite, un cercle ou une ellipse. C'est cette démarche qui a été adoptée dans la transformée de Hough.

La Transformée de Hough (TH) a été développée par Paul Hough en 1962, et a été brevetée par IBM. Dans les dernières décennies, la transformée de Hough est devenue un outil standard dans le domaine de la vision artificielle. Elle permet la détection de droites, de cercles ou d'ellipses de façon traditionnelle. Elle peut aussi être étendue à des cas de description d'objets plus complexes. Elle permet d'avoir une bonne robustesse contre les discontinuités et les éléments manquants d'une structure [66].

L'utilisation de la transformée de Hough, pour la détection de structures, et de courbes paramétriques, ou non paramétriques dans des images, est aujourd'hui courante dans les problèmes de reconnaissances d'objets de formes prédéfinies. Plusieurs travaux s'y réfèrent. Malgré tout, son application reste encore limitée à l'analyse globale des images à l'aide de rétines d'assez grandes dimensions, de manière à pouvoir utiliser une hypothèse de continuité dans l'image.

IV.4.1 Généralité sur la transformée de Hough

IV.4.1.1 Principe

Le fonctionnement de la transformée de Hough se base sur l'utilisation d'un espace paramétrique, appelé espace de Hough, permettant de simplifier le problème complexe de détection globale de formes dans l'espace image. En effet, dans cet espace paramétrique, la détection est locale et donc plus simple. Toute courbe qui peut être décrite par des paramètres est susceptible d'être détectée par la transformée de Hough. Puisque les linéaments que l'on souhaite mettre en évidence ont une allure rectiligne, nous nous limiterons ici à la reconnaissance de droites.

Nous présentons ici la transformée de Hough appliquée exclusivement à la détection des droites [66].

Soit P l'ensemble des pixels appartenant à l'image segmentée $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$. Ces points sont appelés points caractéristiques de l'image. Un point de P a pour coordonnées image (x_k, y_k) .

Une droite peut être définie par son équation :

$$\begin{cases} \text{En coordonnées cartésiennes : } y = a.x + b \\ \text{En coordonnées polaires : } x.\cos(\theta) + y.\sin(\theta) = \rho, \theta \in [0, 2\pi] \end{cases}$$

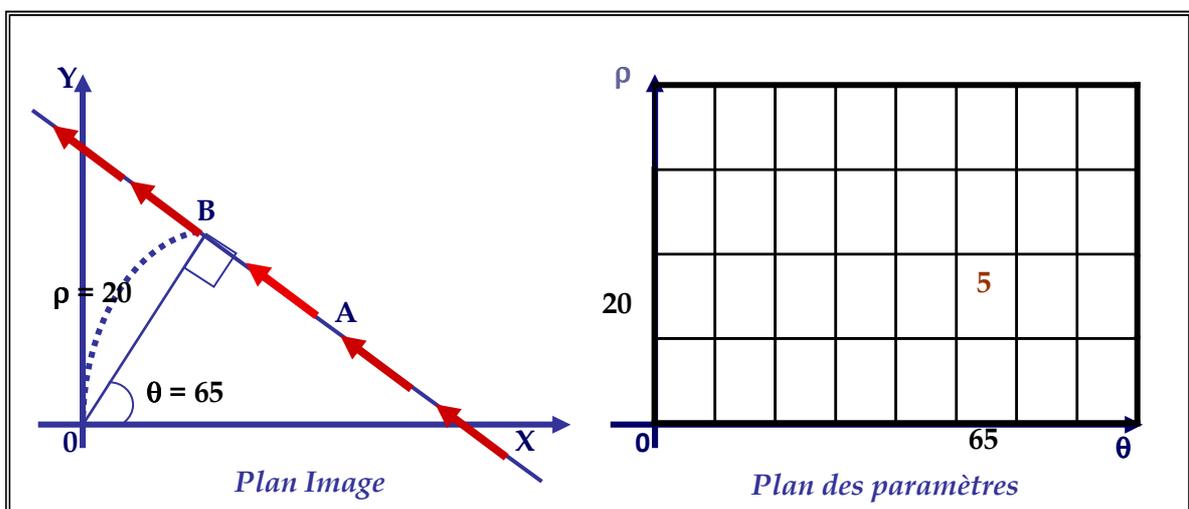


Figure IV.16 -Représentation d'une ligne en utilisant les paramètres θ - ρ .

Où ρ est la longueur et θ l'orientation du vecteur normal de la droite depuis l'origine d'un référentiel cartésien choisi pour se repérer dans l'image (Fig. IV.16).

Pour chaque point (x_i, y_i) d'une image, la TH associe une sinusoïde dans le nouveau plan (ρ, θ) , (Fig. IV.17), dont les points ont une amplitude égale à l'intensité du pixel (x_i, y_i) . Si ces points forment une ligne droite, les sinusoïdes se rencontrent à un point dont les coordonnées polaire (ρ, θ) donnent les paramètres correspondant à la ligne. Ainsi, la détection des lignes droites dans une image est équivalente à détecter les maxima dans l'espace image obtenue par TH [61, 62, 63].

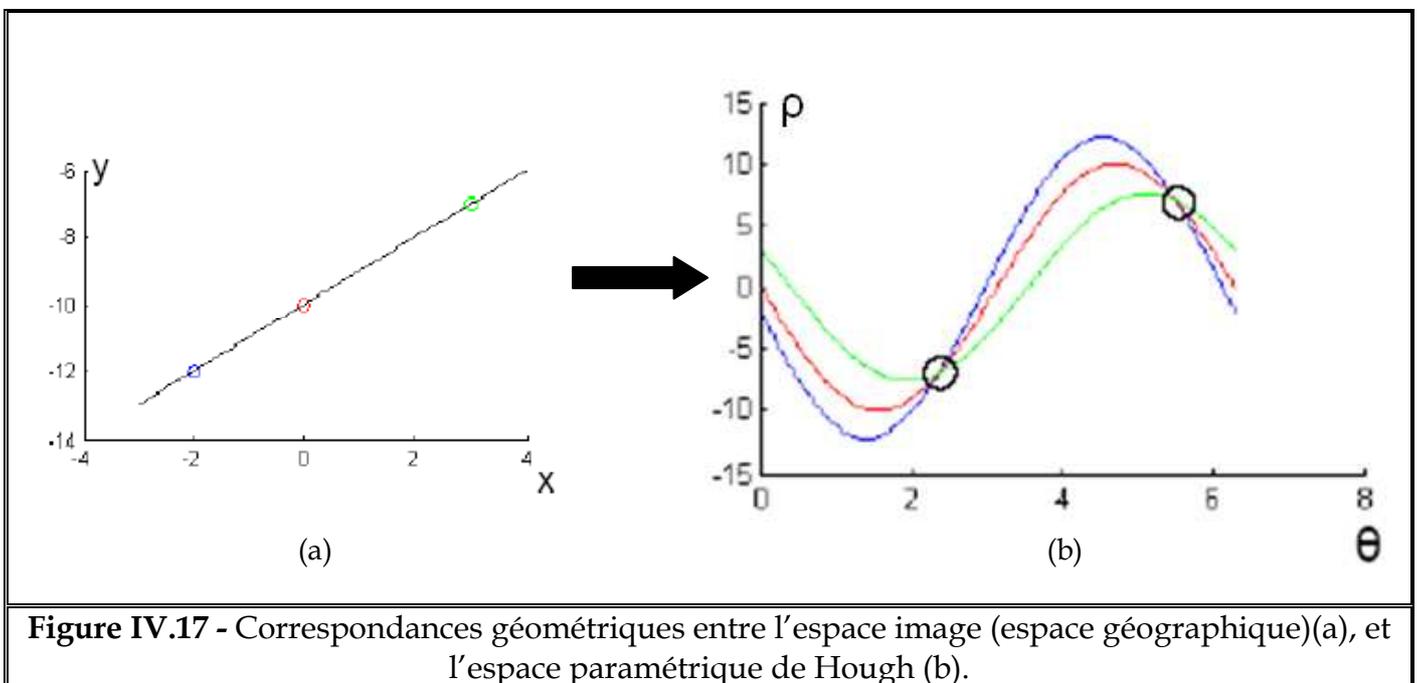


Figure IV.17 - Correspondances géométriques entre l'espace image (espace géographique)(a), et l'espace paramétrique de Hough (b).

IV.4.2 Algorithme de la transformée de HOUGH pour la détection de la route

Les objets construits par l'homme sont en général constitués de composants qui ont des formes géométriques simples, contrairement aux objets naturels qui ont des formes plus irrégulières. Les formes géométriques les plus générales sont les segments de droites, les rectangles et les cercles.

Nous considérons dans cette section, l'étape de détection des portions rectilignes à bords parallèles du réseau routier. Le rôle d'une étape de détection est

de localiser grossièrement dans l'image la présence de structures particulières. Dans le contexte du réseau routier, nous proposons de réaliser cette opération en détectant les tronçons rectilignes de ce dernier. Ceci revient à rechercher, dans l'image satellite des alignements de points ayant des propriétés radiométriques et structurelles similaires.

Les algorithmes couramment utilisés en traitement de l'image pour répondre à ce problème sont les algorithmes à base de transformée de Hough. La transformée de Hough est un outil mathématique qui permet de rechercher dans une image binaire des formes paramétriques définies.

Dans le contexte d'extraction de routes, cette approche est généralement utilisée après un prétraitement de la scène et une détection de contour par un filtre de canny. Cette approche fournit généralement de bons résultats malgré quelques inconvénients. En particulier, seules les portions linéaires des routes sont extraites, et en cas de courbures prononcées de ces dernières la méthode échoue à extraire ces portions de routes.

Après avoir décrit le principe de la méthode, le détail de sa mise en place et des résultats seront donnés (Fig. IV.18).

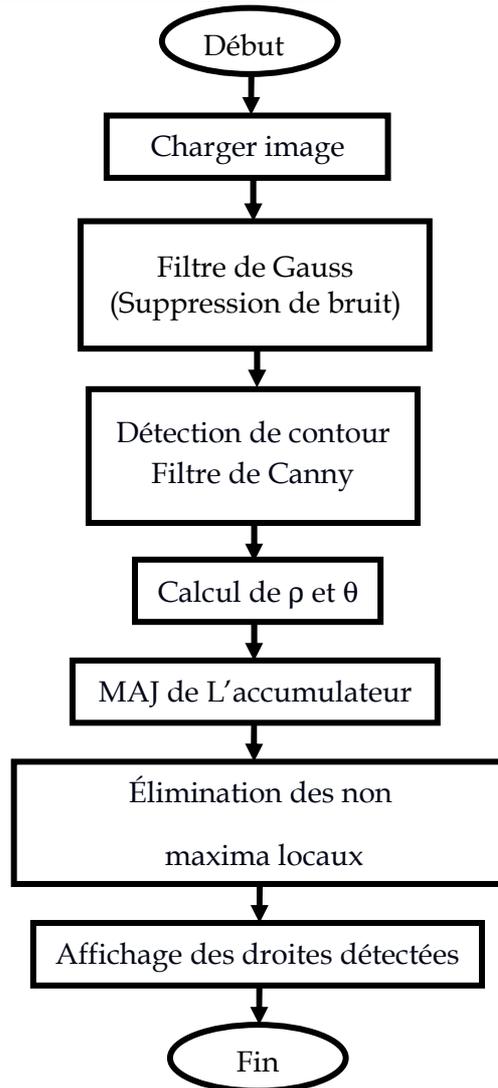
L'organigramme de la transformée de HOUGH

Figure IV.18 - Organigramme général de la transformée de Hough.

Il est important de bien définir les données d'entrée de l'algorithme. L'information utile dans un problème de reconnaissance de forme géométrique est généralement portée par le contour de l'objet. Les pixels intérieurs n'apportent visuellement aucune information pour aider à l'identification d'une forme et dégradent les performances du processus de détection par TH. Ainsi la transformée de Hough n'est généralement pas appliquée à la totalité de l'image binaire mais uniquement à son image de contour. Dans certaines applications le squelette des objets peut également être utilisé. L'utilisation de ces attributs d'objets binaires

(contour et squelette) permet de réduire la quantité d'information projetée et de garantir un meilleur résultat de détection.

IV.4.2.1 Problème de la transformée de Hough

Les inconvénients majeurs de cet outil sont à noter. Le premier concerne la sensibilité de la transformée de Hough au bruit et aux autres éléments de l'image ne correspondant pas aux formes recherchées. En effet tous les points de l'image binaire participent à l'accumulation dans l'espace des paramètres. Ainsi les points isolés (souvent assimilés à du bruit) et les pixels des autres objets contribuent à augmenter localement la valeur de certains pixels du plan H et peuvent ainsi impliquer certaines fausses alarmes. Un pré-traitement (filtrage, segmentation) de l'image est généralement nécessaire afin d'optimiser le résultat.

Un autre point sensible est le choix des pas de discrétisation du plan H . Si ceux-ci sont choisis trop grands, l'accumulation risque de manquer de précision, une mauvaise estimation des paramètres du modèle en découle et la forme détectée est mal positionnée sur l'image. En contre partie s'ils sont trop petits, l'accumulation relative à une forme paramétrique se répartit sur plusieurs cellules voisines. Ainsi plusieurs maxima très proches caractériseront la même forme qui sera détectée plusieurs fois par le processus de seuillage du plan H .

Le dernier inconvénient concerne le choix du seuil d'extraction des maxima du plan de Hough. Cette opération est généralement délicate et il n'existe pas à notre connaissance de méthode efficace permettant de le fixer proprement. Une extraction par tâtonnement est généralement opérée [65].

IV.4.2.2 Pré-traitement: suppression du bruit (Filtrage)

Avant la détection des contours on procède à un pré-traitement pour supprimer le bruit provenant des imperfections des capteurs. Le filtre le plus fréquemment utilisé pour supprimer le bruit est le filtre gaussien $G_{\sigma}(x, y)$:

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)}$$

Qui pondère la valeur de chaque pixel selon une distribution normale autour de ce pixel. Cela résulte en un lissage de l'intensité de l'image. La dimension du filtre dépend du σ et plus on a un σ élevé, plus le lissage est important.

Ceci permet d'éliminer les pixels isolés qui pourraient induire de fortes réponses lors du calcul du gradient, conduisant ainsi à de faux positifs. Le but principal dans notre cas est de rendre l'homogénéité sur la route au même niveau (voir Fig. IV.19.b).

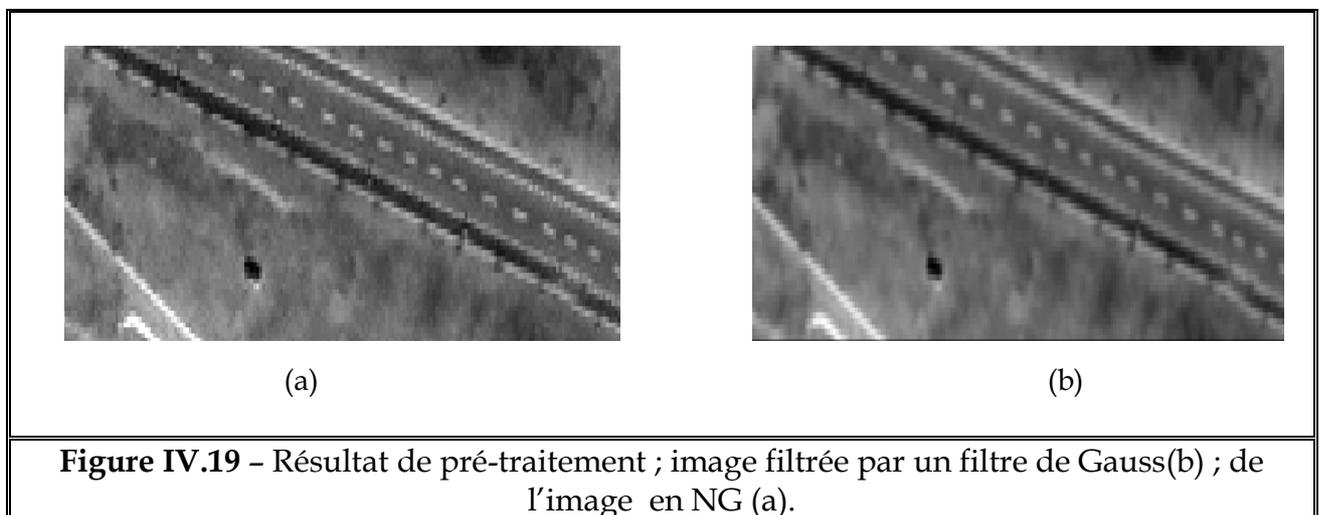


Figure IV.19 - Résultat de pré-traitement ; image filtrée par un filtre de Gauss(b) ; de l'image en NG (a).

IV.4.2.3 Détection de contours

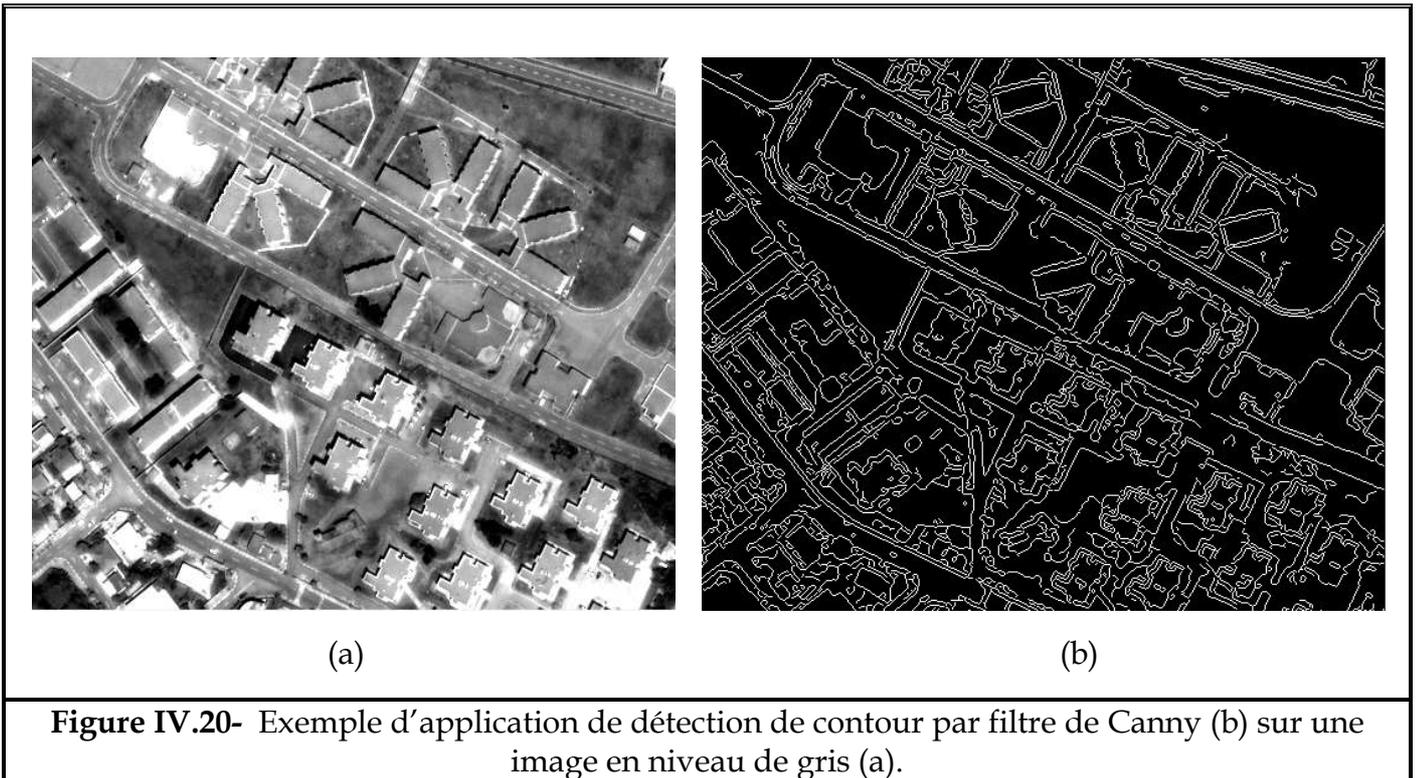
Les contours d'un objet donnent suffisamment d'information sur sa forme, ils correspondent aux changements brusques de l'intensité de la lumière sur l'image. Sur une image numérique ces changements peuvent être détectés à l'aide des

dérivées du premier et du second ordre de la fonction d'intensité. Un point de contour est défini comme le maximum du module du gradient dans la direction du gradient.

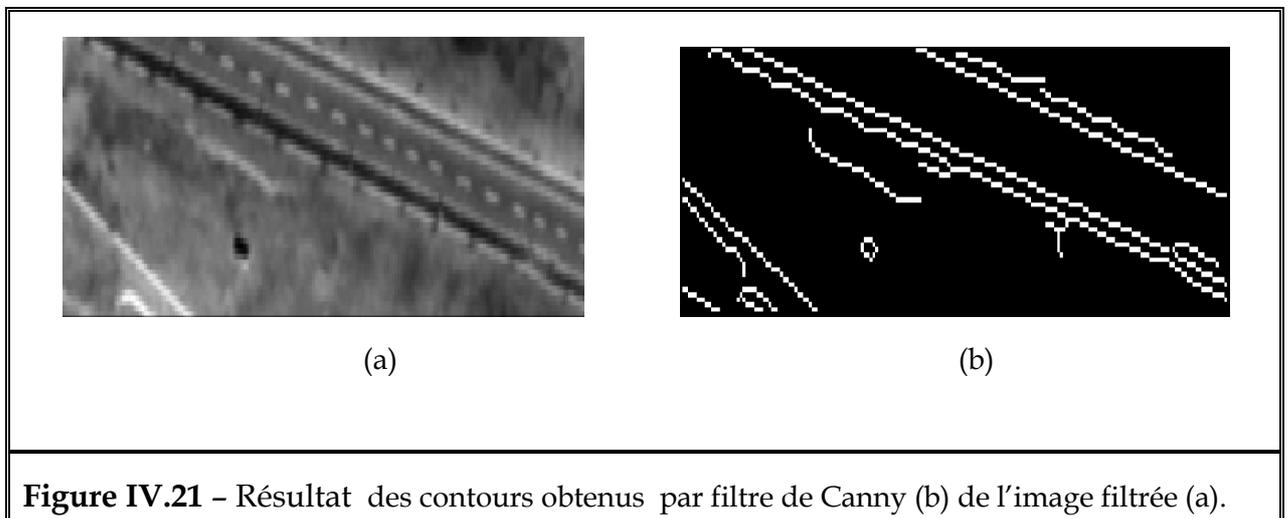
Pour commencer la détection de contours de la route, nous avons utilisé le détecteur (filtre) de Canny - Deriche. Le filtre de Canny est un filtre optimal à Réponse Impulsionnelle Finie (RIF). La détection de contours se fait par la convolution d'un signal monodimensionnel continu $f(x)$ avec une impulsion antisymétrique $h(x)$ d'une amplitude égale à zéro. Le contour est alors marqué par le maxima local de la convolution $f(x) * h(x)$.

Nous avons choisis d'appliquer le filtre de Canny à cause de ces trois caractéristiques suivantes [58].

- ✓ **La bonne détection:** par la minimisation de l'erreur de détection, tous les bords doivent être dépistés, c'est-à-dire qu'il ne faut pas oublier des pixels contour ni rajouter des pixels non contour.
- ✓ **La bonne localisation:** les bords doivent être situés dans leurs idéales positions (minimisation des distances entre les contours réels et contours détectés).
- ✓ **Faible multiplicité** de la réponse (la clarté de la réponse): ne donne pas de multiples réponses ou faux bords (une seule réponse par contour).



La figure (Fig. IV.21.b) montre les contours de la route obtenus avec l'algorithme de Canny classique.



La détection des contours est souvent suivie d'une étape de post-traitement qui sert à réduire le nombre de points de contours et à les relier. Très souvent, on élimine les points de contour qui ont un gradient faible par un seuillage.

Dans notre travail, nous avons appliqué une ouverture surfacique, pour garder que les bords parallèles de la route (Fig. IV.22.b).

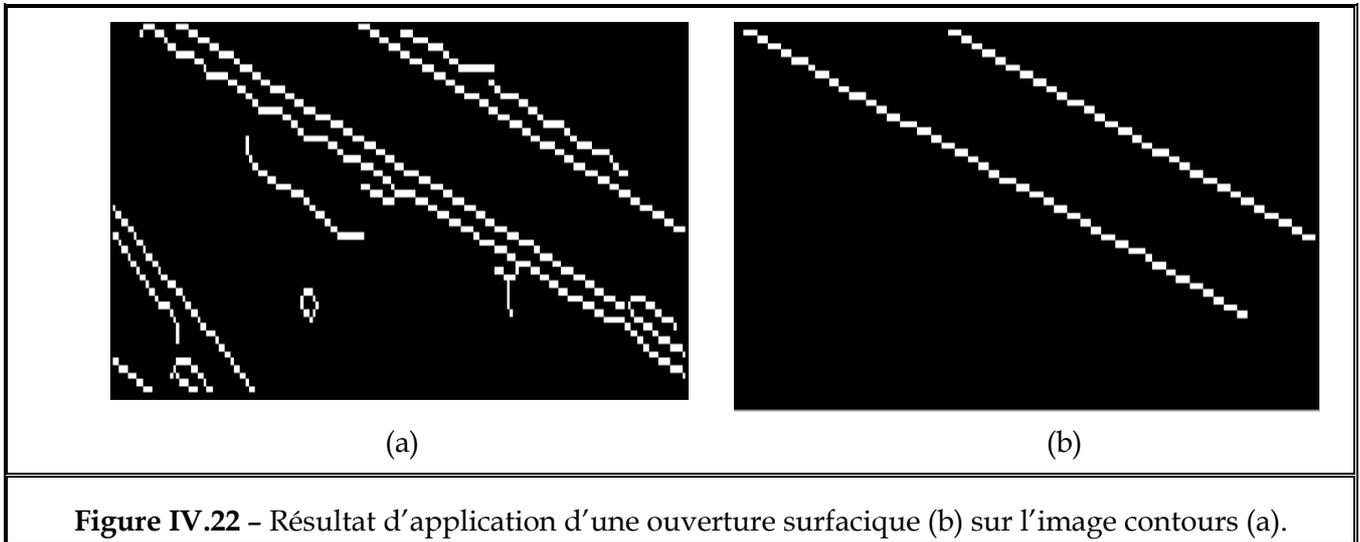


Figure IV.22 – Résultat d’application d’une ouverture surfacique (b) sur l’image contours (a).

L’algorithme de la transformée de Hough est utilisé ici pour la localisation des bords parallèles de route d’un réseau routier, qui est le cas qui nous intéresse dans cette étude.

Nous avons fixés une contrainte forte à la méthode de détection qui est d’éviter toute redondance : une portion rectiligne ne doit être détectée qu’une seule fois par le processus. Cette contrainte s’avérera très intéressante pour le choix du seuil d’extraction des maxima du plan accumulé de Hough.

L’algorithme de détection par la transformée de Hough est appliquée à l’image contours (binaire) (Fig. IV.23.a). Les résultats sont présentés sur la figure (Fig. IV.23.b):

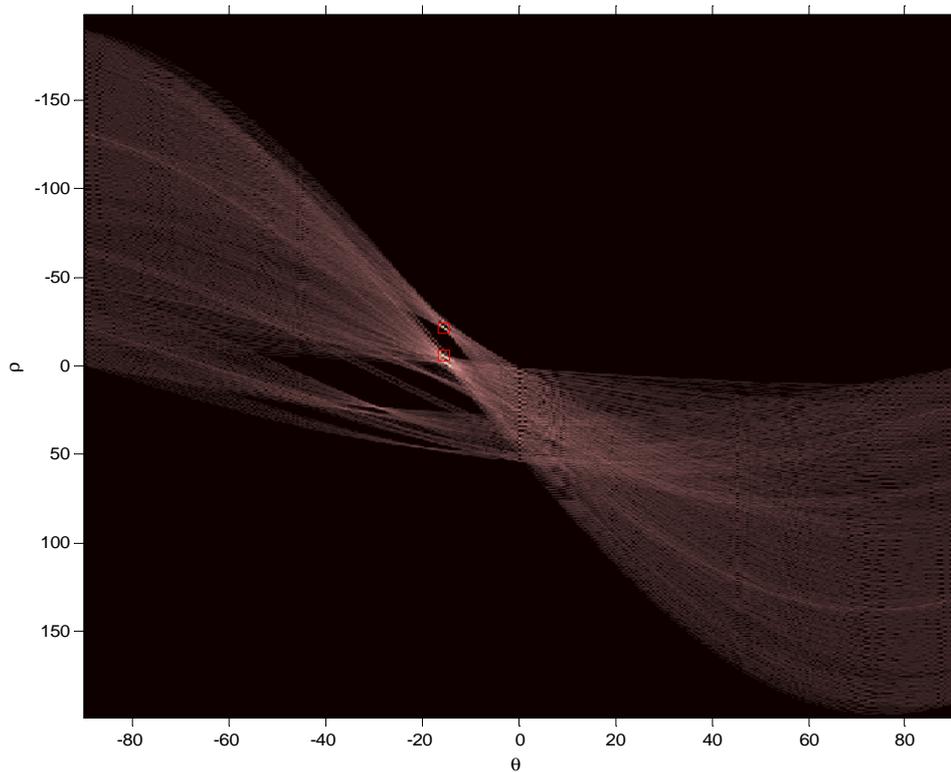
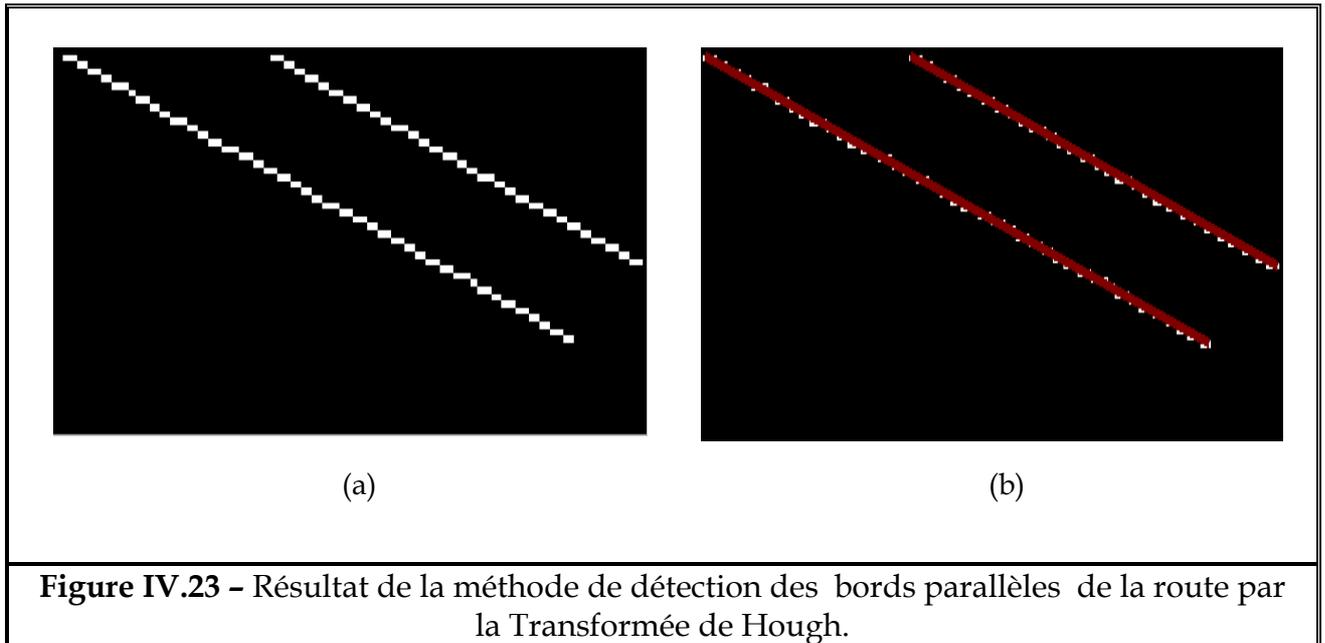


Figure IV.24 - Plan transformé H (Plan H).
(pas en $\theta = 1$ radian et pas en $\rho = 1$ pixel du plan image)

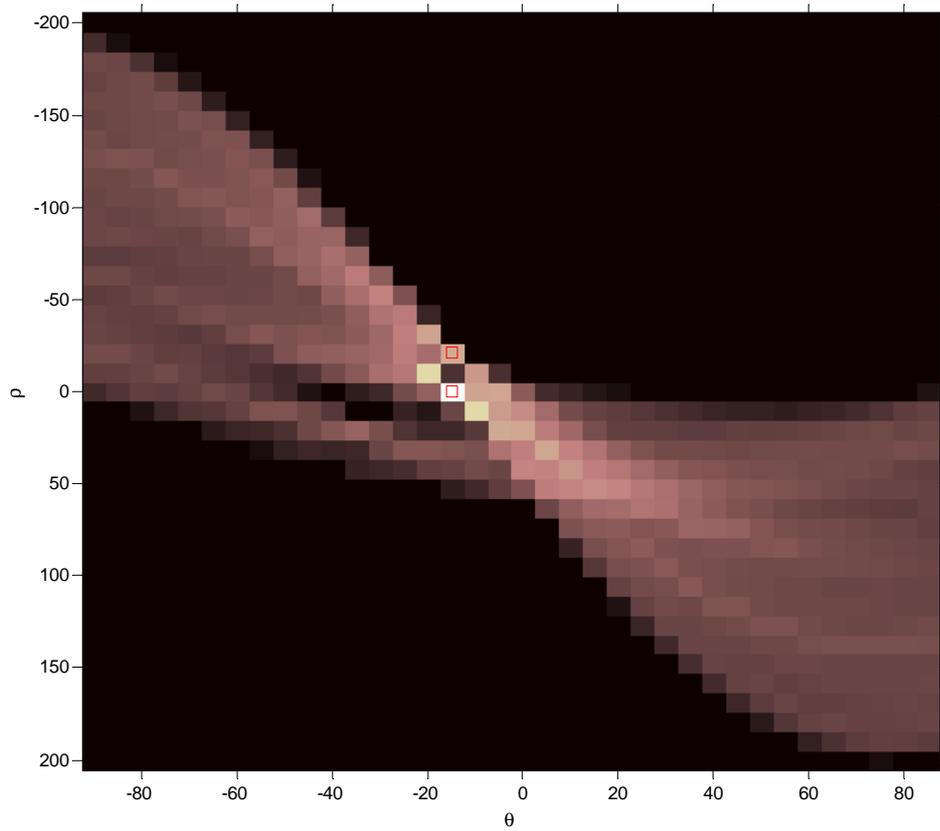


Figure IV.25 - Plan transformé H (Plan H).
(pas en $d\theta = 5$ radian et pas en $d\rho = 10$ pixels du plan image)

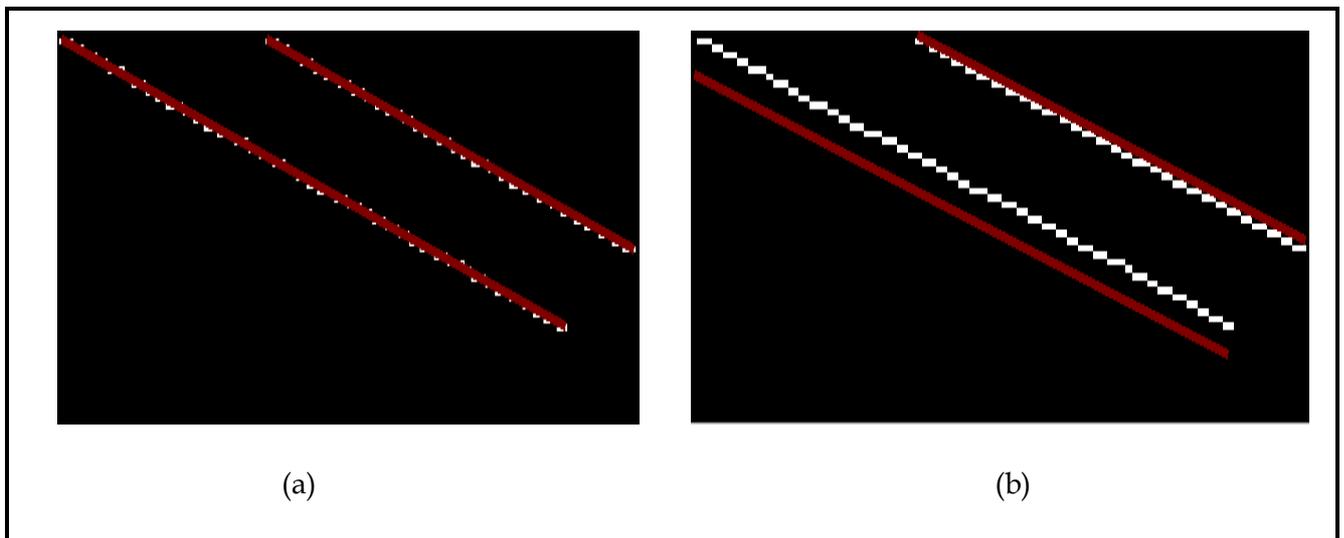


Figure IV.26 - (a) localisation des bords de la route correspondant au plan H de la Fig.IV.24 ; Localisation des bords de la route correspondant au plan H de la Fig.IV.25.

Les images des figures (Fig. IV.24) et (Fig. IV.25) représentent le plan transformée H avec différents pas de discrétisation respectivement petits et grands. Les images présentées sur la figure (Fig. IV.26), représentent les résultats de la détection correspondante.

Première remarque intéressante : les intersections des sinusoïdes qui caractérisent les droites principales de la route du plan image apparaissent nettement sur la figure (Fig. IV.24). Ensuite, il est intéressant aussi de noter l'influence du pas de discrétisation du plan H . La figure (Fig. IV.26.a) donne l'exemple d'un pas petit : une droite est bien détectée et bien localisée sur les bords de la route. La figure (Fig. IV.26.b) illustre l'exemple d'un pas trop grand : cette fois la détection est mal localisée.

Concernant la contrainte opérationnelle de la méthode de TH, le nombre de paramètres d'entrée est limité, comme nous l'avons souhaité. Pour chaque scène, il est seulement demandé à l'utilisateur d'indiquer le nombre de route dont il veut extraire une portion rectiligne.

IV.5 Conclusion

L'extraction automatisée du réseau routier à partir des images satellitaires est importante pour des buts commerciaux ainsi que scientifiques. Elle est devenue un centre d'intérêts des recherches et plusieurs algorithmes ont été proposés pour réduire le coût d'extraction. Mais jusqu'au aujourd'hui, aucun algorithme est capable de fournir un résultat stable, et ça est du à la qualité des images utilisées ainsi que à cause de la complexité de l'environnement.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la détection de la route à partir des images de télédétection satellitaires à haute résolution spatiale, en utilisant deux méthodes permettant une extraction d'une manière robuste et efficace.

Dans la première méthode nous avons mis au point un algorithme de segmentation issue de la Morphologie Mathématique : la Ligne des Partage des Eaux (LPE), qui permettent la détection de contours de la route ainsi que l'extraction de son axe médian.

Nous avons vu que la segmentation morphologique par la LPE est un processus qui s'appuie sur deux phases complémentaires ; le succès de l'une est conditionné par le succès de l'autre : une phase intelligente pour la recherche des marqueurs et la seconde phase automatique d'application de la ligne de partage des eaux, en utilisant les données de la phase précédente.

L'objectif de la deuxième méthode est de localiser (détecter) de manière quasi automatique les bords parallèles des portions rectiligne de route de la scène. Notre choix de la méthode de localisation s'est porté sur un algorithme de transformée de Hough, appliqué au résultat de détection de contours par le filtre de canny.

CONCLUSION GENERALE

Le sujet de notre mémoire s'inscrit dans un contexte actuel. Grâce au développement récent enregistré dans le domaine de télédétection, les images satellitaires qui étaient auparavant de basse résolution, ont atteint actuellement des résolutions phénoménales, et les méthodes d'extraction des réseaux linéiques (en particulier les réseaux routiers) développées dans ce domaine n'étaient pas en reste de ce développement, puisque on assiste à un passage d'une représentation linéique à une représentation surfacique qui correspond à leur emprise réelle au sol. La très haute résolution spatial permet donc une localisation plus précise des bords de la route, mais engendre en contrepartie une augmentation significative du bruit, ce qui augmente de la complexité de ce travail. De plus, son arrivée très récente n'aura donné que peu de temps pour exploiter au mieux la richesse de ses informations.

L'interprétation du réseau routier est un sujet déjà largement abordé dans la littérature. Une étude bibliographique a mis en évidence les limitations des méthodes d'extraction ; elles nécessitent la construction d'un modèle dont la complexité est inversement proportionnelle à l'exhaustivité. Trop simple, le réseau extrait présentera une quantité importante de fausses détections. Trop complexe, il présentera énormément de sous-détections.

Inversement, l'interprétation exhaustive d'une image est une tâche excessivement complexe mettant en jeu la modélisation de l'ensemble des objets pouvant exister dans les scènes traitées et nécessitant des processus très lourds de gestion de l'incertitude et de résolution des conflits.

Dans ce mémoire, nous avons proposé deux techniques (méthodes) d'extraction du réseau linéique (le réseau routier) en milieu rural à partir d'une

Conclusion Générale et Perspectives

image IKONOS à haute résolution spatiale. Son objectif est de répondre à la forte demande dans la création et/ ou la mise à jour automatisée de cartes.

Chaque étape de ces deux méthodes proposées est effectuée en partant de l'hypothèse que l'étape précédente doit dérouler avec succès ; si une étape échoue, toutes les autres étapes échouent.

Dans la première méthode nous avons mis au point un algorithme de segmentation issue de la Morphologie Mathématique : la Ligne des Partage des Eaux (LPE), qui permettent la détection des bords parallèles de la route ainsi que l'extraction de son axe médian (le squelette de la route) d'une manière robuste et efficace.

Dans un premier temps, l'image originale a été prétraitée, afin de supprimer le bruit et de rendre l'image bien contrastée. Cette opération fondée sur un ensemble de filtrage, de seuillage et d'opérations morphologiques.

Par la suite, nous avons prouvé la fiabilité et la performance de la segmentation LPE Contrôlé par Marqueurs pour la détection des bords parallèles de la route ainsi que son axe médian. La difficulté principale de cette approche est de trouver des marqueurs pertinents. On utilise souvent une intervention humaine pour détecter ces marqueurs.

L'objectif de la deuxième méthode est basé sur la localisation ou bien la détection de manière quasi automatique les portions rectiligne de route de la scène. Notre choix de la méthode de localisation s'est porté sur un algorithme de transformée de Hough, appliqué au résultat de détection de contours par le filtre de canny. Cette méthode montre une meilleure performance pour l'extraction des tronçons de la route à bords parallèles.

Les résultats des méthodes que nous avons implémentées, ont montré que le choix de la méthode dépend principalement de la résolution de l'image, ainsi que de l'environnement étudié.

Perspectives

Les perspectives que nous envisageons dans le prolongement de ce travail, nous les résumons dans ces quelques lignes :

- Le test et la validation de ces approches sur d'autres types d'images optiques (résolutions différentes, différents tissus urbains), afin d'étudier l'effet du changement de la résolution, ainsi que la comparaison des résultats sur d'autres régions.
- Le test et la validation sur des images radar.
- Au niveau de prétraitement des images, on pourra envisager d'utiliser des outils dédiés à la localisation de la route tels qu'une classification non supervisée qui permet de classer les régions qui peuvent susceptible être des routes, ce qui aura pour conséquences l'amélioration considérable des méthodes développée.

- [01] R.Péteri, « Extraction de réseaux de rues en milieu urbain à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale », *Ecole des Mines de Paris*, 2003.
- [02] Chiang, T.Y., Hsieh, Y.H., Lau, W., "Automatic road extraction from aerial images", Stanford education, 2001.
- [03] Vosselman, G., De Knecht, J., "Road tracking by profile matching and Kalman filtering", In: Gruen, Kuebler, Agouris, (Eds.), Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Birkhauser, Basel, pp. 265-274. 1995.
- [04] Geman, D., Jedynak, B., "An active testing model for tracking roads in satellite images", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 18, pp.1-14, 1996.
- [05] Airault, S., Jamet, O., "Détection et restitution automatiques du réseau routier à partir d'images aériennes", *Traitement Signal*, vol. 12, no. 2, 189-200 (Hermès), 1995.
- [06] Ruskoné, R., "Extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte", Thèse de Doctorat, Université de Marne la Vallée, 1996.
- [07] Fischler, M.A., Tenenbaum, J.M., Wolf, H.C., "Detection of roads and linear structures in low-resolution aerial imagery using a multi-source knowledge integration technique", *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 15, pp. 201-223, 1981.
- [08] Mena, J.B., Malpica, J.A., "Color image segmentation using the Dempster Shafer theory of evidence for the fusion of texture", *Pattern Recognition. Internat. Arch. Photogrammet. Remote Sensing*, vol. 34, Part 3/W8, 2003.
- [09] O.Viveros cancino, « Analyse du milieu urbain par une approche de fusion de données satellitaires optiques et radar », *Université de Nice-Sophia Antipolis*, 2003
- [10] I.Laptev, « Road extraction based on snakes and sophisticated line extraction », 1997.
- [11] B. Wessel, C. Wiedemann, O. Hellwich, W.C. Arndt, « Evaluation of automatic road extraction results from SAR imagery », *Technische Universität München*.
- [12] A. Baumgartner, W. Eckstein, C. Heipke, S. Hinz, H. Mayer, B. Radig, C. Steger, C. Wiedemann, « T-REX: tum research on road extraction », *Université de Munich*.
- [13] C. Lacoste, « Extraction de réseaux linéiques à partir d'images satellitaires et aériennes par processus ponctuels marqués », *INRIA Sophia Antipolis*, 2004.

- [14] Z. Nougrara, « Un système d'extraction de réseaux routier à partir d'images satellitaires », *USTO*, 2000.
- [15] L. Meddeber, « Un système d'inférence floue et possibiliste pour l'extraction du réseau routier et le recalage Markovien en imagerie satellitaire », *USTO*, 2005.
- [16] Gruen, A., Li, H., "Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 50, no. 4, pp.11-20, 1995.
- [17] Dal Poz, A.P., Gyftakis, S., Agouris, P., "Semiautomatic road extraction: Comparison of methodologies and experiments", In: 2000 ASPRS Annual Conf., Washington, DC, USA, 2000.
- [18] Fua, P., Leclerc, Y. G., "Model driven edge detection", *Machine Vision and Applications*, vol. 3, pp. 45-56, 1990.
- [19] Neuenschwander, W. M., Fua, P., Iverson, L., Székely, G., Kubler, O., "Ziplock snakes", *International Journal of Computer Vision*, vol. 25, no. 3, pp. 191-201, 1997.
- [20] M. Rochery, I. H. Jermyn et J. Zerubia. Contours actifs d'ordre supérieur appliqués à la détection de linéiques dans des images de télédétection. Rapport de Recherche 5063, INRIA, France, décembre 2003.
- [21] Couloigner, I., Ranchin, T., "Mapping of urban areas: A multi-resolution modeling approach for semiautomatic extraction of streets", *Photogrammet. Eng. Remote Sensing*, vol. 66, no. 7, pp. 867-874, 2000.
- [22] Péteri, R., Couloigner, I., Ranchin, T., "A multiresolution modelling approach for semi-automatic extraction of streets: application to high resolution images from the Ikonos satellite", *Proceedings of the EARSEL/SFPT Symposium, "Observing our environment from space: new solutions for a new millenium"*, Marne-la-Vallée, France, mai 2001.
- [23] Haala, N., Vosselman, G., "Recognition of Road and River Patterns by Relational Matching", In: *Proc. ISPRS, Commission III*, Whashington, DC, 1992.
- [24] Ferraro, M., Boccignone, G., Caelli, T., "On the representation of image structures via scale space entropy conditions", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 21, pp. 1199-1203, 1999.
- [25] Agouris, P., Doucette, P., Stefanidis, A., "Spatiospectral cluster analysis of elongated regions in aerial imagery", *IEEE Internat. Conf. Image Process. (ICIP) 2001*, Thessaloniki, Greece, vol. 2, pp. 789-792, 2001.

- [26] Chen, A., Donovan, G., Sowmya, A., Trinder, J., "Inductive clustering: Automatic low level segmentation in high resolution images", In: ISPRS Photogrammet. Comput. Vision, 9-13 September, Graz, Austria, p. A-73. 2002.
- [27] Roggero, M., "Object segmentation with region growing and principal component analysis", In: ISPRS. Photogrammet. Comput. Vision, Graz, Austria, pp. A-289, 9-13 September 2002.
- [28] Mena, J.B., Malpica, J.A., "Color image segmentation using the Dempster Shafer theory of evidence for the fusion of texture", Pattern Recognition. Internat. Arch. Photogrammet. Remote Sensing, vol. 34, Part 3/W8, 2003.
- [29] Bhattacharya, U., Parui, S.K., "An improved back propagation neural network for detection of road-like features in satellite imagery", International Journal of Remote Sensing, vol. 18, pp. 3379-3394, 1997.
- [30] Matheron, G., "Random Sets and Integral Geometry", Wiley, New York, 1975.
- [31] Serra, J., "Image Analysis and Mathematical Morphology", vol. 1, Academic Press, London, 1982.
- [32] I. Destival. Recherche automatique des réseaux linéaires sur les images SPOT. Bulletin de la S.F.P.T., 105:5-16, 1987.
- [33] M. A. Serendero. Extraction d'Informations Symboliques en Imagerie SPOT : Réseaux de Communication et Agglomérations. Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, 1989.
- [34] Zhang, C., Murai, S., Baltasvias, E., "Road network detection by mathematical morphology", In: Proc. ISPRS Workshop on 3D Geospatial Data Production: Meeting Applicat. Requirements, Paris, pp. 185-200, 1999.
- [35] Roux, L., "Recalage d'images multi-sources. Application au recalage d'une image SPOT et d'une carte", Thèse de Doctorat, ENST, Paris, France, 1992.
- [36] Tupin, F., Maitre, H., Mangin, J.F., Nicolas, J.M., Pechersky, E., "Detection of linear features in SAR images: Application to road network extraction", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 2, pp. 434-453, 1998.
- [37] D. Haverkamp. Extracting straight road structure in urban environments using IKONOS satellite imagery. Optical Engineering, 41(09):2107-2110, septembre 2002.
- [38] Géraud, T., "Fast road network extraction in satellite images using mathematical morphology and Markov random fields", IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, juin 2003.

- [39] T.M. Koller, G. Gerig, G. Szekely et D. Dettwiler. Multiscale detection of curvilinear structures in 2-D and 3-D image data. Proceedings of IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pages 864-869, Cambridge, Massachusetts, juin 1995.
- [40] Heipke, C., Steger, C., Multhammer, R., "A hierarchical approach to automatic road extraction from aerial imagery", In: McKeown, Jr. D.M., Dowman, I.J. (Eds.), Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II, Proc. SPIE, vol. 2486, pp. 222-231, 1995.
- [41] Baumgartner, A., Steger, C., Wiedemann, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H., "Update of roads in GIS from aerial imagery: Verification and multi-resolution extraction", Internat. Arch. Photogrammet. Remote Sensing, vol. 31, no. 3, pp. 53-58, 1996.
- [42] Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H., "Automatic road extraction based on multi-scale, grouping and context", Photogrammet. Eng. Remote Sensing, vol. 65, no. 7, pp. 777-786, 1999.
- [43] Laptev, I., Mayer, H., Lindeberg, T., Eckstein, W., Steger, C., Baumgartner, A., "Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes", Machine Vision Applicat., vol. 12, no. 1, pp. 23-31, 2000.
- [44] R.Ruskoné, « Extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données cartographiques », *Université de Marne-La-Vallée*, 1996.
- [45] Hinz, S., Baumgartner, A., "Automatic extraction of urban road networks from multi-view aerial imagery", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 58, pp. 83-98, 2003.
- [46] Zhang, C., "Towards an operational system for automated updating of road databases by integration of imagery and geodata", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 58(3-4):127-258, 2004.
- [47] V. Risson. Application de la Morphologie Mathématique à l'analyse des Conditions d'Eclairage des Images Couleur. Thèse Ecole des Mines de Paris, 17 Décembre 2001.
- [48] T. Walter. Application de la Morphologie Mathématique au diagnostic de la Rétinopathie Diabétique à partir d'images couleurs. Thèse Ecole des Mines de Paris, 12 Septembre 2003.
- [49] F. Meyer. Cytologie quantitative et Morphologie Mathématique. Thèses de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1979.

- [50] A. Feroui. Traitement automatique d'images du fond d'œil : Application au recalage des images rétiniennes. Thèse de magister, Département d'Electronique Biomédicale. Université abou Bekr Belkaid, Juin 2009.
- [51] C.Cienti. Architecture flot de données dédiées au traitement d'images par Morphologie Mathématique. Thèse Ecole des Mines de Paris, 30 septembre 2009.
- [52] I.Hadjidj. Approche Morphologie pour la segmentation d'images médicales, Application à la détection des lésions mammaires. Thèse de magister, Département d'Electronique Biomédicale. Université Abou Bekr Belkaid, 06 Juillet 2011.
- [53] C. Vachier. Extraction de caractéristiques, segmentation d'image et morphologie mathématique. Thèse Ecole des Mines de Paris, 18 Décembre 1995.
- [54] G. Matheron. Elément pour une Théorie des Milieux Poreux. Masson, Paris, 1967.
- [56] S. Beucher. *Segmentation d'images et morphologie mathématique*. Thèse Ecole des Mines de Paris, Juin 1990.
- [57] L. Vincent. Algorithmes morphologiques à base de files d'attente et de lacets. Extension aux graphes. Thèse Ecole des Mines de Paris, Mai 1990.
- [58] F. Dell'Acqua, P. Gamba, G. Lisini, « Road extraction aided by adaptive directional filtering and template matching », *Università di Pavia Via Ferrata, Italy*.
- [60] M.Bendouda « Etude et réalisation d'« UREGIS » : un SIG pour la gestion du réseau routier urbain ».Thèse de magister, département d'électronique, USTO, 2009.
- [61] J. Illingworth et J. Kittler, "A survey of the Hough transform,"*CVGIP*, vol. 44, no. 1, pp. 87-116, 1988.
- [62] H.Maître, "Un panorama de la transformation de Hough,"*Traitement du Signal*, vol. 2, no. 4, pp. 305-317, 1985.
- [63] R.O. Duda et P.E. Hart, "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures," *Commun. ACM*,vol. 15, no. 1, pp. 11-15, 1972.
- [64] P. Soille. *Morphological Image Analysis: Principales and Applications* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1999.
- [65] V. Amberg « Analyse de scènes péri-urbaines à partir d'images radar haute résolution : Application à l'extraction semi-automatique du réseau routier ». Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, 10 Novembre 2005.

[66] B.Benarbia, « Conception et réalisation d'un système d'information géographique - SIG -pour le réseau routier ». Mémoire de magister, département d'Electronique *USTO*, 2007.

[67] « Cahier méthodologique sur la mise en œuvre d'un SIG », *Institut atlantique d'aménagement des territoires*, 2003.