



La télédétection et les banques de données. L'extraction de la voirie sur image satellite comme outil d'analyse de la densité urbaine

Bernard Allouche, Gérard Foucheyrand

► To cite this version:

Bernard Allouche, Gérard Foucheyrand. La télédétection et les banques de données. L'extraction de la voirie sur image satellite comme outil d'analyse de la densité urbaine. [Rapport de recherche] 611/89, Ministère de l'équipement et du logement / Bureau de la recherche architecturale (BRA); Ministère de la recherche; Ecole nationale supérieure d'architecture de Saint-Etienne. 1989. <hal-01906349>

HAL Id: hal-01906349

<https://hal.science/hal-01906349v1>

Submitted on 26 Oct 2018

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

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



HAL Authorization

611

MINISTERE DE L'EQUIPEMENT ET DU LOGEMENT
DIRECTION DE L'ARCHITECTURE ET DE L'URBANISME
SOUS DIRECTION DES ENSEIGNEMENTS ET DES PROFESSIONS
BUREAU DE LA RECHERCHE ARCHITECTURALE

ECOLE D'ARCHITECTURE DE SAINT ETIENNE

LA TELEDETECTION ET LES BANQUES DE DONNEES.
L'EXTRACTION DE LA VOIRIE SUR
IMAGE SATELLITE COMME OUTIL
D'ANALYSE DE LA DENSITE URBAINE.

Bernard ALLOUCHE
Gérard FOUCHÉYRAND

Rapport final de recherche

Lettre de commande n°76765 du 28 Novembre 1988

LA TELEDETECTION ET LES BANQUES DE DONNEES.
L'EXTRACTION DE LA VOIRIE SUR IMAGE SATELLITE
COMME OUTIL D'ANALYSE DE LA DENSITE URBAINE.

Bernard ALLOUCHE (*)
Gérard FOUCHÉYRAND (**)

Lettre de commande n°76765

Rapport final d'une recherche financée par le Ministère de l'Equipeement et du Logement, Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme, Sous Direction des Enseignements et des Professions, Bureau de la Recherche architecturale.

Le présent document constitue le rapport final d'une recherche remise au bureau de la Recherche en exécution du programme général de recherche mené par le Ministère de l'Equipeement et du Logement avec le Ministère de la Recherche. Les jugements et opinions émis par les responsables de la recherche n'engagent que leurs auteurs.

AVERTISSEMENT : La seconde partie de ce rapport a fait l'objet d'un travail universitaire dans le cadre d'un D.E.A. d'analyse d'image soutenu par Bernard ALLOUCHE sous la responsabilité de Michel JOURLIN (responsable pédagogique du D.E.A.) et de Jean-Paul SCHON (directeur du centre de calcul de l'Université de Saint-Etienne).

(*) Bernard ALLOUCHE (Ingénieur des T.P.E. poste informatique à l'Ecole d'Architecture de Saint Etienne)

(**)Gérard FOUCHÉYRAND (chargé de cours en urbanisme et adjoint au Directeur de l'Ecole d'Architecture de Saint Etienne).

REMERCIEMENTS : Jean-Marie BECKER (informaticien), Jacques BETHEMONT (géographe), Bernard DUPUIS (cartographe), Michel JOURLIN (informaticien), Jean-Paul SCHON (informaticien), François TOMAS (géographe).

Ainsi qu'aux anciens élèves de l'Ecole d'Architecture de Saint-Etienne en cours de thèse informatique image à l'Université : Philippe GREMILLET, Philippe JAILLON, Marc TISSOT.

AVANT-PROPOS	1
1ère PARTIE.....	3
1. INTRODUCTION	4
2.LES BANQUES DE DONNEES EXISTANTES.....	5
2.1 TROIS REALISATIONS PHARES.....	5
2.2 DES REALISATIONS LOCALES.....	6
3. LES PRODUITS EXISTANTS.....	8
3.1 UNE VUE D'ENSEMBLE	8
3.2 LES PRODUITS INEXISTANTS	8
4. L'APPORT DE LA TELEDETECTION.....	9
5. CONCLUSION.....	11
2ème PARTIE.....	1
1.INTRODUCTION.....	2
2.GENERALITES.....	4
2.1.Les images SPOT.....	4
2.2.La voirie, le bâti, les sols nus	5
3.L'ETAT DE L'ART	8
3.1.Seuillage sur histogramme.....	8
3.2.Le seuillage sur l'histogramme des variations.....	9
3.3.L'approche du GDTA.....	10
3.4.L'approche des Universités de Californie et du Michigan.....	12
4.OBJECTIFS FIXES.....	13
5.CONSTRUCTION DE LA METHODE.....	14
5.1.Le suivi de contours sur un seuil brutal.....	16
5.1.1.La binarisation.....	16
5.1.2.Le suivi de contours sur image binaire.....	17
5.1.3.Conclusion sur cette première approche.....	20
5.2.Le suivi de contours sur un seuil adaptatif.....	21
5.3.Le lissage de l'image originale.....	23
5.4.La croissance de région.....	26
5.4.1.la croissance de région brute.....	26
5.4.2.la croissance de région adaptative.....	28
5.4.3.Le lissage par région.....	29
5.5.L'implémentation retenue de la croissance de région adaptative.....	29
5.6.Résultats obtenus après lissage.....	33
5.7.Les améliorations apportées par un seuillage à partir d'un histogramme local.....	37
6.FORMULATION DEFINITIVE DE LA METHODE	43
7.CONCLUSION.....	50
8.ANNEXES.....	51
8.1.BIBLIOGRAPHIE	52
8.2.CARACTERISTIQUES DES IMAGES.....	54

AVANT-PROPOS

Nous assistons actuellement, dans l'environnement micro-informatique, à une augmentation considérable des capacités de manipulation de l'information, tant du point de vue de la vitesse de traitement que de la possibilité de stockage (Disque optique numérique, par exemple). Cette évolution matérielle devrait s'accompagner d'une refonte des outils logiciels adaptée à ces nouvelles caractéristiques et qui permettrait de manipuler de façon plus simple et plus efficace, de grandes quantités d'information en affranchissant l'utilisateur des contraintes inhérentes à l'environnement informatique habituel, souvent perçu comme trop lourd.

Parallèlement à ce développement technologique, des besoins grandissants d'information existent pour les collectivités locales, pour un certain nombre d'institutions (syndicats intercommunaux, agences d'urbanisme), mais aussi pour le secteur privé. Ces besoins sont divers : socio-économiques, écologiques, agriculture, occupation des sols et ne peuvent être résolus qu'en croisant diverses sources d'information.

C'est ainsi que ce rapport de recherche s'articule autour des deux outils complémentaires que sont la télédétection et les banques de données géographiques et statistiques et leur coopération possible.

La première partie tente de faire un bilan succinct de l'existant et envisage l'interfaçage du traitement d'image avec des systèmes de gestion de banques de données comme un outil pour l'aménageur et l'urbaniste.

La seconde partie, davantage pragmatique, propose une méthode d'extraction de voirie automatisée sur une image satellite, apportant ainsi une contribution aux recherches menées en matière de télédétection appliquée à l'analyse du milieu urbain et faisant apparaître une nouvelle possibilité de coopération entre traitement d'image et banques de données urbaines.

1ère PARTIE

1. INTRODUCTION

Le but de cette partie est de faire le point succinctement sur les problèmes en matière de systèmes d'information appliqués à l'aménagement et à l'urbanisme et de montrer qu'il est envisageable de s'orienter vers des outils qui font autant appel à la télédétection qu'aux banques de données statistiques, et qui ne sont donc plus seulement des systèmes graphiques fermés.

C'est ainsi que l'on abordera des réalisations phares sur le plan national, en matière de banques de données (IGN, INSEE, SPOT), ou encore des réalisations plus modestes et locales (Conseil Général de la Loire, Municipalité de Toulouse).

Nous verrons également qu'il existe déjà des outils de manipulation et des voies de recherche prometteuses, mais qu'un certain nombre de problèmes subsistent et entravent le développement de ces outils.

Enfin nous tenterons de montrer en quoi l'interfaçage télédétection / banques de données statistiques peut apporter une solution à ces problèmes.

2.LES BANQUES DE DONNEES EXISTANTES

2.1 TROIS REALISATIONS PHARES

Il s'agit là de véritables monuments en matière de banques de données.

L'INSEE propose depuis peu, pour l'ensemble du territoire français et pour chaque commune, un ensemble de renseignements statistiques commercialisé sous trois formes :

- sur support papier: ce sont des tableaux et des cartes.
- sur support magnétique : les tableaux et les cartes ont conservé leur origine informatique qu'est le listing.
- sur serveur télématique: les informations peuvent être recueillies sur tout terminal à partir de la Banque de Donnée Locale.

Cette banque propose en effet près de 4500 variables (6000 à terme) couvrant l'ensemble de l'activité économique française. Ainsi, il est possible de consulter cette masse d'information moyennant un certain coût d'utilisation du serveur, ou d'acquérir tout ou partie des informations utiles pour un problème donné pour ensuite les stocker dans un système d'information spécifique.

De son côté l'IGN investit de gros efforts pour informatiser ses productions et les adapter aux outils informatiques.

On dénombre aujourd'hui dans cette institution bon nombre de projets en cours de développement ou à plus long terme, dont les trois principaux sont:

- BD Z: couverture altimétrique de la France
- BD Carto: couverture à une échelle de l'ordre de 1/100 000
- BD TOPO: couverture au 1/5000_1/50000

La BD-Z est une base de donnée altimétrique qui a été développée par digitalisation des courbes de niveaux selon une maille d'un pas de 50 à 100 mètres.

La BD-Carto est une base de données cartographique couvrant la France avec une précision compatible avec des échelles allant de 1/50000 à 1/100000. Là aussi la constitution de cette base a nécessité la digitalisation de l'existant. Son achèvement est prévu pour 1991, mais certains thèmes sont déjà disponibles (réseau routier, électrique, etc...).

La cession des fichiers issus de cette base est envisagée par l'IGN au profit d'aménageurs (collectivités, entreprises, etc).

La BD-Topo est certainement le plus ambitieux des projets de l'IGN, puisqu'il vise la réalisation d'une base de données relationnelle d'une précision compatible avec des échelles allant du 1/5000 au 1/50000. Elle sera obtenue par restitution photogramétrique numérique. Cette réalisation sera étalée sur 30 ans. Pour l'heure les volumes d'informations exploitables sont énormes (de l'ordre du GØ pour la BDZ par exemple). Mais rien n'empêche d'envisager une exploitation sur des ordinateurs de bureau dans quelques années, si l'on fait abstraction des coûts d'acquisition de ces informations.

Enfin, le CNES et SPOT-Images conservent une photothèque des images transmises par le satellite SPOT représentant une masse colossale d'informations intéressant tous les départements français. Ces images permettent une production de cartes thématiques et remplacent avantageusement des campagnes de photographies aériennes pour bon nombre d'applications.

2.2 DES REALISATIONS LOCALES

Partout en France naissent des systèmes d'information urbain à différents niveaux : municipalités, agglomérations et départements. Parmi toutes ces réalisations, nous en avons choisi deux pour exemple: celles du Conseil Général de la LOIRE et de la Ville de TOULOUSE.

Le Conseil Général de la Loire a développé, par le biais du Comité d'Expansion de la Loire, une banque de données baptisée Géraldine 42, reflet de l'activité économique du département, dans ses moindres détails. Son exploitation se fait à la demande et par un langage d'interrogation. Les résultats sont obtenus sous forme de listings.

Parallèlement, une réflexion a été menée sur l'informatisation des services techniques (en priorité la Direction de la Voirie Départementale) et à plus long terme, sur l'ensemble de l'activité du Conseil Général. Celle-ci a conduit à la mise en place d'un système d'information graphique (reposant sur le système APIC). Un des points durs du cahier des charges était le problème de la mise à jour des données. Aussi le Conseil Général s'est-il prononcé pour un système simplifié de gestion de la voirie, en limitant au strict minimum les informations décrivant le réseau de voirie.

Pour ce qui concerne la Ville de Toulouse, dont l'expérience en la matière est plus longue, la banque de données urbaines est extrêmement riche en détails et en précisions. On y retrouve toute information relative à la commune sur les quatre thèmes suivants:

- relevés topographiques
- relevés cadastraux
- implantation des réseaux souterrains
- un ensemble de données administratives

Les données sont saisies à partir de digitalisation de plans au 1/200, ou mesurées sur le terrain avec une précision de saisie de l'ordre du centimètre en X,Y,Z.

Toutes ces données sont organisées de façon à assurer une hiérarchie des consultations (sécurité, confidentialité). Le résultat est imposant et à la dimension d'une grande ville. Il nécessite néanmoins une maintenance lourde, notamment en ce qui concerne les mises à jour effectuées par un service spécialisé de saisie. Ces problèmes de mise à jour dépendent également de l'adhésion et du partenariat des services concernés par cette banque de données (PTT, EDF, Cadastre,...). A ce sujet il faut noter des incompatibilités majeures de fonctionnement:

- manque de coordination (mise à jour tardive du cadastre par les services fiscaux)
- problèmes de "secrets défense" (PTT, ...)

3. LES PRODUITS EXISTANTS

3.1 UNE VUE D'ENSEMBLE

Nous ne voulons pas entrer dans le détail d'une comparaison des différents logiciels disponibles à l'heure actuelle. En effet, une telle étude comparative a déjà fait l'objet d'une publication du Service Technique de l'Urbanisme en collaboration avec le CETE Méditerranée et le Club Aménagement et Micro-informatique (voir [20]). Toutefois, nous voulons préciser quelques caractéristiques communes à ces différents produits.

Compte tenu de l'importance du volume d'information à traiter, la plupart de ces logiciels ont hérité d'un passé technologique tout au long de leurs évolutions successives qui cantonne leur utilisation à de "grosses" machines.

Par ailleurs, tous ces logiciels ont comme point commun de traiter de l'information sous forme alpha-numérique ou graphique (vectorielle). La nature de cette information requiert une saisie par digitalisation, souvent longue et fastidieuse et une mise à jour qui l'est tout autant.

3.2 LES PRODUITS INEXISTANTS

Malgré les caractéristiques communes qui viennent d'être évoquées, tous ces logiciels sont très disparates et il n'existe pas de produit référence pouvant être pris comme standard (langage de requête, format des données, etc...). Cette lacune est sans conteste un frein à l'engouement pour ce type de logiciels de la part des différents aménageurs auxquels ils s'adressent.

Nous devons constater également pour l'ensemble de ces logiciels un manque d'ouverture par rapport à des sources d'informations traditionnelles, notamment celles déjà évoquées à propos de l'IGN et de l'INSEE. A ce sujet, il faut souligner un certain manque de maturité des politiques de commercialisation de ces nouveaux produits informatiques documentaires : l'IGN, par exemple, évalue actuellement l'opportunité de la réalisation d'un logiciel destiné à manipuler aisément les futures cartes numériques.

Par ailleurs, si tous ces logiciels traitent l'information graphique sous forme vectorielle, aucun d'entre eux ne sait manipuler des images numériques et n'offre par conséquent aucun outil de traitement ou d'analyse d'images, notamment pour la production automatisée de cartes thématiques.

Enfin, l'utilisation de ces logiciels entraîne de sérieux problèmes de mise à jour pour assurer la fiabilité des informations qu'ils manipulent. Ces mises à jour sont d'autant plus difficiles à mettre en œuvre que le nombre de sources alimentant le système d'information est élevé. En effet, il existe des problèmes de communication entre les différentes parties prenantes qui peuvent induire certaines incohérences, comme nous l'évoquions dans le cas de Toulouse

4. L'APPORT DE LA TELEDETECTION

Nous venons de voir que les logiciels existants souffrent d'un manque d'ouverture sur des sources d'information modernes appelées à se généraliser très rapidement. En outre, ils induisent des contraintes de maintenance et de mise à jour assez lourdes. Nous allons voir maintenant que l'introduction de la télédétection dans un système d'information géographique constitue à bien des égards une solution aux problèmes non résolus par les logiciels actuellement disponibles.

L'aspect visuel d'une image satellite rapproche celle-ci des photographies aériennes, et constitue de ce point de vue un outil bien supérieur, en termes de communication, aux cartes schématiques "froides et abstraites" issues d'un système gestionnaire de plans numériques. Ce point de vue vaut surtout pour les aménageurs défendant une position face aux décideurs. En outre, rien n'empêche de croiser la concision du plan numérique avec l'esthétique de l'image numérique pour obtenir un support des plus convaincants. Cet aspect des choses est loin d'être négligeable, bien qu'il paraisse secondaire comparé aux autres avantages de l'image satellitaire.

En effet, l'image satellite, de nature périodique, résout d'une façon très séduisante les problèmes de mise à jour, tout au moins en ce qui concerne l'information qu'elle contient. Celle-ci étant très riche, il est possible de réaliser un grand nombre de cartes thématiques en s'assurant d'une périodicité de mise à jour pratiquement aussi grande que l'on veut (suivi de cultures, suivi de chantier, d'inondation, etc...). Cette richesse autorise en outre des applications nouvelles, et d'un grand intérêt. L'expérience de la Ville de Toulouse nous permet de citer par exemple le calcul automatisé des coefficients de ruissellement des bassins versants en milieu urbain. Beaucoup

d'autres applications concrètes de ces images sont possibles (calculs de modèles numériques de terrain par stéréoscopie, surveillance de pollution,...) mais restent encore dans le domaine de la recherche.

Nous venons de voir deux utilisations possibles des images satellites au sein d'un système d'information géographique qui en font un outil de communication et de production de l'information. On peut envisager d'aller encore plus loin en imaginant une architecture de système d'information pouvant gérer sans distinction des images numériques, des graphiques vectoriels et des informations alpha-numériques. L'image numérique permettrait ainsi, en plus des utilisations qui viennent d'être décrites, de jouer le rôle de critère de sélection spatial, facilitant ainsi la manipulation de l'information. Ainsi l'image facilite la recherche d'information. Réciproquement, chaque pixel étant en relation avec le reste de l'information du système, l'interprétation des images satellitaires s'en trouverait dans beaucoup de cas facilitée.

Cette intégration des données de la télédétection dans un système d'information nécessite la "localisation" (la mise en correspondance avec le système de repérage utilisé par l'image satellite) des autres informations de la base (données statistiques, données géographiques). Cette localisation ne pose pas de problèmes techniques de fond. On peut d'ores et déjà envisager deux techniques. La première consiste à répartir l'information vectorielle (textes et graphiques) selon une matrice identique à celle de l'image satellite (voir [21]). L'autre méthode fait appel à la notion de quad-tree pour coder la répartition de l'information, comme le propose [22].

5. CONCLUSION

Nous venons de voir que les systèmes d'information géographiques actuels sont assez difficiles à mettre en œuvre, et en conséquence ne s'adressent qu'à des aménageurs ou des collectivités de grande importance.

Les petites et moyennes communes, et autres aménageurs de plus petite dimension, devront attendre encore quelques années avant de pouvoir utiliser des petits systèmes "standardisés" utilisant des produits informatiques IGN, INSEE, etc... Ces nouveaux systèmes devront intégrer des outils de télédétection satellitaire, gage d'une réactualisation simple et fréquente, pour la réalisation automatique de cartes thématiques locales en relation avec diverses autres sources d'information.

2ème PARTIE.

1. INTRODUCTION

La gestion d'un territoire urbain nécessite en permanence de bonnes connaissances sur l'état de l'occupation du sol et de son évolution.

Depuis plusieurs années, les spécialistes de l'aménagement des zones urbaines ont suivi avec intérêt les progrès de la télédétection par satellite pour évaluer dans quelle mesure les images spatiales pourraient se substituer ou compléter les moyens traditionnels d'investigation que constituent les photographies aériennes et les enquêtes au sol. Celles ci restent actuellement l'outil d'observation privilégié des urbanistes grâce en particulier à leur résolution. Elles sont cependant d'une mise en œuvre lourde et coûteuse, surtout lorsqu'il faut procéder à des analyses multidates (suivi de chantiers, péri-urbanisation le long des principales voies de communication,...).

Avec les images satellites, notamment celles de SPOT d'une résolution de 10 et 20 mètres, la qualité de représentation est largement comparable aux cartes IGN au 1/50 000 et souvent à celles au 1/25 000.

Bien que les images satellitaires traduisent seulement un aspect physique de l'urbain (géométrie, réflectance), celui-ci peut être corrélié à d'autres aspects socio-économiques importants (répartition démographique par exemple).

Toutefois, la complexité du milieu urbain et la faiblesse de résolution des images satellitaires rendent difficiles les approches dont la réussite passe par une amélioration de la détection des modes d'occupation du sol.

Plusieurs méthodes **interactives** d'analyse et de classification du milieu urbain existent. Toutes sont basées sur les niveaux de brillance et traitent l'image de façon globale (seuillage, laplacien,...). Traiter le problème par une approche plus locale, tenant compte des voisinages des pixels et des éléments structurants de l'image (voies de communication en particulier) nous a semblé plus opportun. Ainsi avons nous envisagé la mise au point d'une méthode d'extraction de voirie comme étape préalable à une analyse urbaine. En effet la connaissance du réseau de voirie peut permettre, d'une façon assez aisée, de quantifier la densité urbaine dans la mesure où plus celle-ci est importante, plus elle nécessite un réseau de transport fortement maillé.

Nous nous sommes donc efforcés de proposer une méthode qui soit à la fois **originale** par le principe théorique qui la soutend (la croissance de région) , et **automatique**, c'est à dire sans intervention d'un observateur ou manipulateur qui aurait pour effet d'ajuster la précision du résultat en fonction de la qualité de l'image originale.

2. GENERALITES

2.1. Les images SPOT

Il ne sera question par la suite que d'images satellitaires transmises par SPOT, satellite d'observation.

Les images SPOT sont numériques. Elles sont le résultat d'une mesure point par point de la réflectance du sol terrestre (quantité de lumière réfléchiée par le sol).

Elles sont obtenues à l'aide de deux capteurs CCD, l'un pour les images panchromatiques, l'autre pour les images multispectrales. En ce qui concerne ces dernières, il existe trois bandes spectrales qui sont désignées par XS1 ("verte"), XS2 ("rouge") et XS3 ("proche infra-rouge"). Le choix de ces trois bandes (voir figure 1) a été déterminé en fonction des réponses spectrales des corps que l'on souhaitait observer (végétation, sols nus, étendues d'eau, bâti,...).

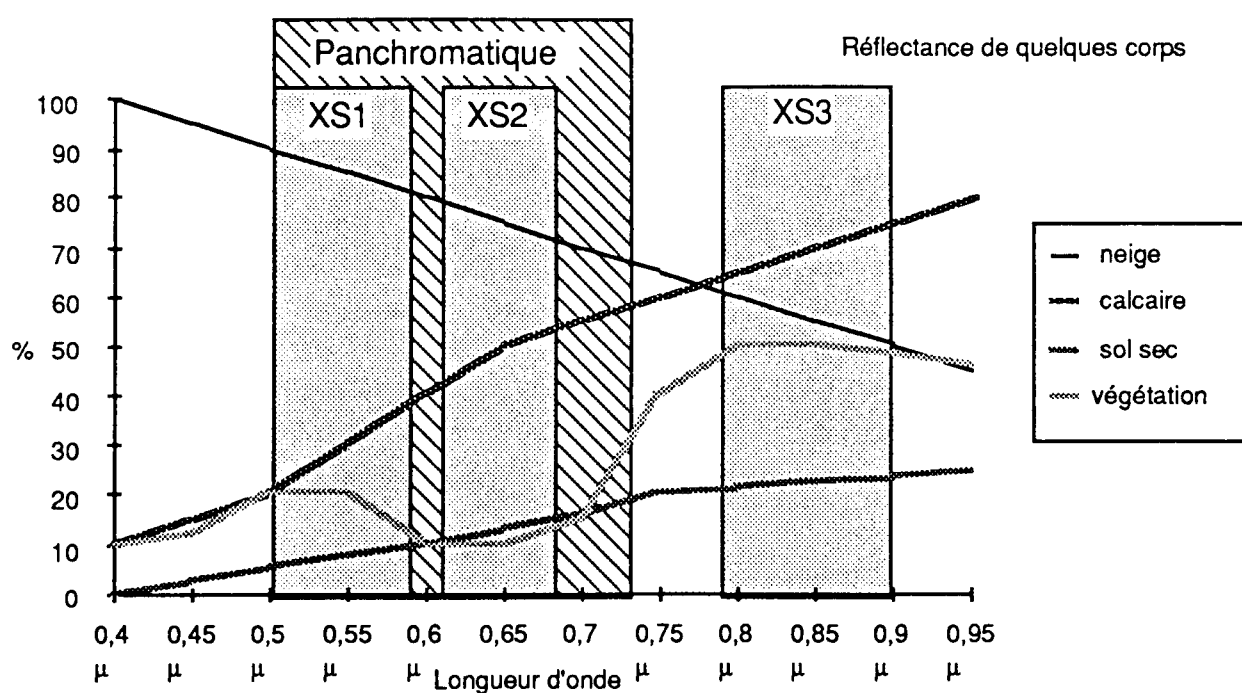


figure 1

Les images panchromatiques correspondent à une seule bande de longueur d'onde plus large, correspondant au domaine visible par l'œil humain.

Le caractère numérique de ces images se traduit par une discrétisation spectrale et spatiale de l'information, selon une trame carrée. Chaque image est donc constituée de lignes, chaque ligne correspondant à une série de points contigus (3000 pour les multispectrales, 6000 pour les panchromatiques). Enfin, pour chaque point intervient une discrétisation des réflectances à l'aide de 256 niveaux. Chaque point de l'image est donc la mesure de la réflectance du sol sur une zone carrée de terrain. La dimension de cette zone correspond à la résolution de l'image. Elle est de 20 mètres pour les images multispectrales, et de 10 mètres pour les panchromatiques. Si ces dernières apportent une plus grande finesse, très appréciable en milieu urbain, les multispectrales offrent en contrepartie la possibilité de combiner les différents canaux pour mieux discriminer certaines signatures spectrales (l'indice de végétation IV met en évidence les zones de forte activité chlorophyllienne: $IV = (XS3 - XS2) / (XS3 + XS2)$).

Il est par ailleurs possible de *simuler* de façon assez précise une image multispectrale d'une résolution de 10 mètres. Cette précision est permise grâce à une corrélation importante des deux canaux XS1 et XS2 (typiquement de l'ordre de 0,9) et celles des canaux XS1, Panchro et XS2, Panchro (respectivement de l'ordre de 0,8 et 0,9). On peut donc obtenir par un rééchantillonnage adéquat deux images XS1 et XS2 avec une résolution de 10m, sans introduire trop d'erreur.

En revanche, le canal XS3 est peu corrélé avec le canal panchromatique et un rééchantillonnage de XS3 n'aurait guère de réalité physique. Les résultats de ces rééchantillonnages ne sont que des approximations de ce que les satellites d'une résolution de 10m en multispectral pourraient à l'avenir nous transmettre. Il faut enfin préciser que cette simulation n'est possible qu'avec des images multispectrales et panchromatiques parfaitement superposables.

2.2. La voirie, le bâti, les sols nus

Dans ce qui suit, nous allons revenir un peu plus en détail sur les caractéristiques des images que nous utiliserons et celles des entités que nous voulons en extraire, à savoir l'ensemble de la voirie urbaine et interurbaine.

Sur des images panchromatiques, la voirie apparaît généralement plus claire que l'ensemble du reste de l'image. Ce niveau de brillance peut toutefois se confondre avec celui d'autres objets (toiture, culture,...) de natures très différentes (métallique, végétation, minérale,...).

Sur les images multispectrales, les canaux XS1 et XS2 sont proches du canal panchromatique, comme nous venons de le voir. Nous allons donc nous intéresser au canal XS3, proche infra-rouge. Ce canal correspond essentiellement à l'activité chlorophyllienne. Ainsi, tout ce qui est recouvert de végétation apparaîtra avec des intensités relativement importantes. En conséquence, toutes les étendues d'eau seront très sombres sur ces images. Il en sera de même des sols nus (terres labourées, chantiers importants,...) et de tout ce qui concerne le bâti et la voirie.

Ainsi, sur le canal XS3, les niveaux de faible brillance correspondent à des entités beaucoup plus homogènes de part la nature des matériaux qui les composent (minéraux, eau), que sur les images en lumière visible (XS1, XS2 et Panchro).

Nous pouvons affirmer dès maintenant que les images XS3 sont plus contrastées et mieux adaptées à l'analyse de l'urbain et de la voirie que les images XS1, XS2 et panchromatiques. Toutefois, l'utilisation du canal Panchro est envisageable dans la mesure où elle permet des investigations plus précises, notamment en centre-ville.

Notre démarche consistera en la réalisation d'une chaîne de traitement adaptée au XS3, et dans un deuxième temps en une application aux images panchromatiques pour évaluer l'augmentation de précision.

En outre, il convient de préciser quelques caractéristiques communes à ces deux types d'image, en ce qui concerne la voirie et le bâti par rapport aux terres labourées et aux étendues d'eau. D'une part le bâti présente des variations brutales et très ponctuelles spatialement des réflectances (compte tenu de la résolution de 10 et 20 mètres et des dimensions des constructions ordinaires). D'autre part, les voies urbaines et inter-urbaines ont des largeurs comprises entre 5 et 30 mètres (rues, autoroutes) ce qui se traduit par des "chapelets" de pixels d'une largeur de deux pixels au plus, le long desquels les radiométries varient peu .

Ces quelques remarques nous permettrons de mieux saisir ce qui a conduit aux différentes approches du problème de l'extraction de la voirie sur une image satellite.

3. L'ETAT DE L'ART

On trouvera en annexe 1 une bibliographie sur l'ensemble des publications que nous avons pu consulter. Nous avons recensé des articles traitant d'un sujet pouvant être rapproché de celui qui nous intéresse ici. C'est ainsi qu'au vu de ces résultats, nous avons distingué nettement deux phases qui sont:

- l'extraction des pixels correspondant à de la voirie, puis
- la meilleure reconstruction possible du tracé de cette voirie sous forme vectorielle.

L'extraction des pixels consiste donc à partir d'une image satellite en niveaux de gris (les niveaux traduisant les réflectances) en l'obtention d'une image binaire des pixels correspondants à de la voirie sur le terrain. Il s'agit donc d'une segmentation d'image.

Pour procéder à cette segmentation, il faut tenir compte des deux facteurs caractérisant la voirie évoqués plus haut:

- les radiométries faibles (caractéristiques radiométriques)
- les formes très minces dessinées par les réseaux (caractéristiques topologiques)

Nous allons présenter ici quelques méthodes, parmi les plus représentatives, employées actuellement.

3.1. Seuillage sur histogramme

Cette méthode extrêmement simple et rapide ne garde de l'image originale que les pixels dont la radiométrie appartient à un sous-ensemble déterminé, soit par l'utilisateur, soit par algorithme automatique, à partir de la forme de l'histogramme.

Cette méthode présente de nombreux inconvénients dont l'imprécision, puisqu'elle ne tient pas compte de la topologie des éléments que l'on veut extraire de l'image: outre les réseaux, cette méthode extrait aussi toutes les formes ayant des radiométries comparables à la voirie.

Le choix d'un (ou plusieurs) seuil est également très délicat puisque son caractère optimal ne peut être défini de façon satisfaisante que localement et non sur toute l'image.

3.2. Le seuillage sur l'histogramme des variations

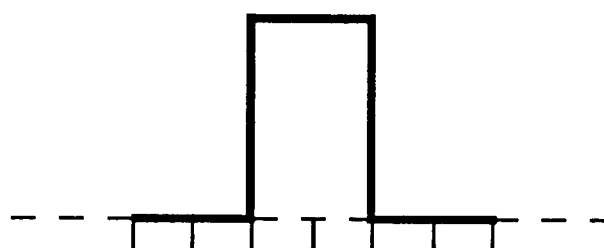
Nous groupons sous cette appellation différentes méthodes utilisant des calculs différentiels: gradient, laplacien, sobel, kirsch,... Ces méthodes ont l'avantage très théorique d'éliminer les plages uniformes de niveaux de gris. En réalité, sur une image "naturelle", il existe beaucoup de zones texturées, ce qui introduit du bruit lors de l'application de ces méthodes. En outre, de part leur nature différentielle, elles induisent systématiquement le problème du "double contour". Prenons l'exemple suivant concernant le laplacien sur un voisinage de quatre pixels, et présenté figure 2.

Non seulement les contours sont élargis ou dédoublés, mais de faux contours apparaissent, correspondant aux frontières entre deux plages de gris différents (limite entre deux parcelles cultivées par exemple).

Enfin, les images résultant des applications de ces méthodes sont toujours en niveaux de gris, et le problème du seuillage optimal se pose encore.

Bien entendu, ces techniques ne doivent pas être employées seules mais peuvent constituer un bon prétraitement. Nous allons dans ce qui suit donner deux exemples de telles mises en œuvre.

Une portion de ligne
sur l'image originale



Double contour

Après calcul du laplacien

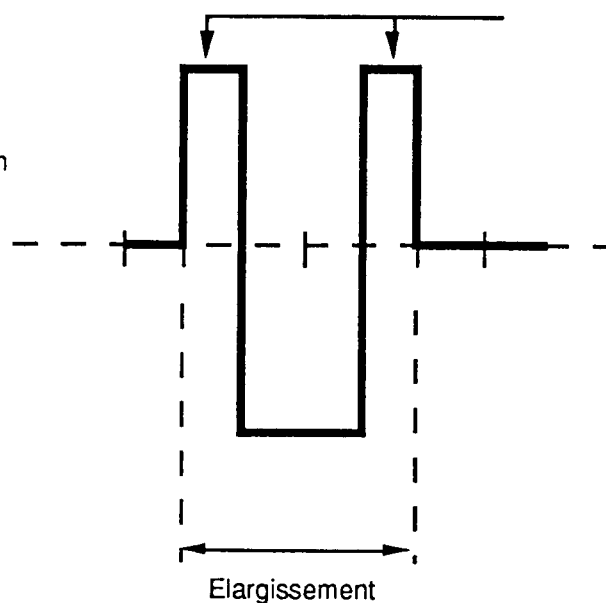


figure 2

3.3. L'approche du GDTA

Cette approche nous a été présentée par J.P. Darteyre, ingénieur Géographe au GDTA (Groupement pour le Développement de la Télédétection), et Y. Merghoub, chercheur au CESR (Centre d'Etude Spatial des Rayonnement) à Toulouse.

Cette méthode nécessite une image multispectrale et se déroule en deux phases. Nous reproduisons sous forme d'organigramme les différentes étapes qui les constituent.

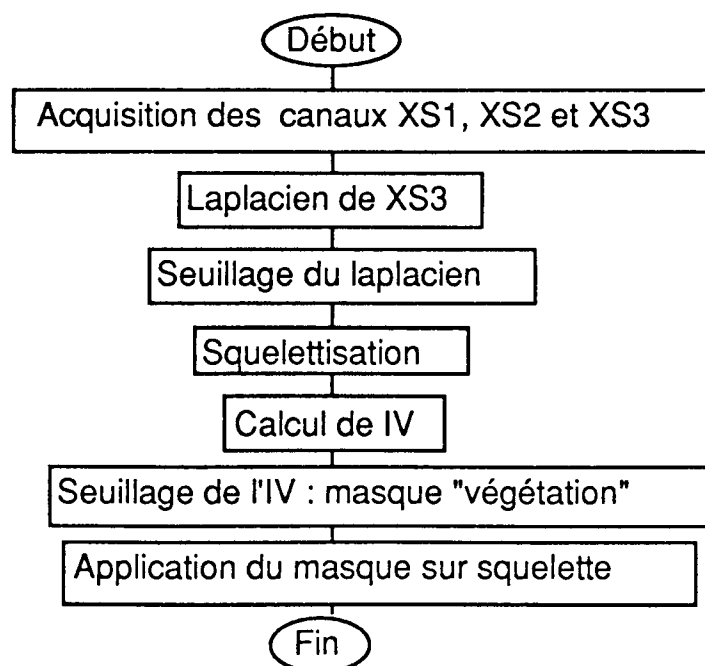


figure 3

A partir du laplacien d'une images XS3, on procède à un seuillage manuel que l'on squelettise pour une meilleure lisibilité du résultat. Remarquons que cette squelettisation fait perdre de l'information en ce qui concerne la largeur des voies détectées (1 ou 2 pixels de large), et nous tenterons de ne pas l'utiliser dans l'approche que nous présenterons plus loin.

Comme nous l'avons déjà dit, le laplacien n'est pas assez sélectif pour l'extraction de la voirie, et son emploi entraine l'apparition d'artefacts gênants (limites de cultures, etc...).

A fin de supprimer ces derniers, on a recours au calcul de l'indice de végétation de la scène à l'aide des canaux XS1 et XS2. Cet indice fournit une image que l'on seuille à nouveau visuellement. Le résultat de ce seuil constitue un masque que l'on applique alors au résultat de la première phase, ce qui élimine une bonne partie des artefacts d'origine "végétale".

Là encore, le seuillage manuel sur histogramme intervient.

3.4. L'approche des Universités de Californie et du Michigan

On en trouvera l'essentiel dans [5] et dans [14]. Nous en résumons ci-après le principe.

Les auteurs procèdent en deux passes.

La première consiste à balayer l'image avec un opérateur de "brillance directionnelle": on regarde, pour chaque pixel de l'image, dans quelle direction le contraste est le plus fort; à chaque direction est associé un masque de type sobel. On obtient donc deux images résultantes : l'une indiquant la brillance, l'autre la direction de la voirie en ce pixel.

Nevatia et Al. améliorent encore le résultat par la squelettisation suivante: il ne garde le pixel que s'il est d'amplitude maximale, pour un voisinage 3x3, dans la direction perpendiculaire à celle obtenue à l'étape précédente.

La seconde passe consiste en une vectorisation du résultat obtenu précédemment. Nous ne la détaillerons pas davantage puisqu'elle n'entre pas dans le cadre de cette étude.

4. OBJECTIFS FIXES

Nous nous proposons de définir dans ce qui suit une méthode d'analyse d'image de bas niveau, conduisant à l'extraction des pixels représentant de la voirie ou fortement corrélés à celle-ci (alignement de constructions le long d'une voie ombragée par de la végétation par exemple).

Nous nous sommes imposés deux contraintes:

- Cette méthode doit être automatique dans la mesure où elle ne nécessite aucune intervention extérieure.

- Les algorithmes doivent être rapides (pas de convergence d'itérations par exemple) et "parallélisables".

Enfin, notre démarche peut être envisagée comme une étape préalable à une analyse de plus haut niveau (vectorisation des tracés de voirie, ou encore reconstruction de voies très fragmentées). Nous n'aborderons pas davantage cette éventualité (voir sur ces sujets [1],[6],[9],[13] et [15])

Pour ce qui nous concerne, cette approche doit être replacée dans un contexte plus large d'analyse urbanistique (au sein d'un système d'information géographique par exemple), et non de cartographie routière. Ainsi, une des applications possibles de la méthode que nous allons définir est la réalisation de cartes de densité urbaine selon une maille carrée de 100m x 100m par exemple.

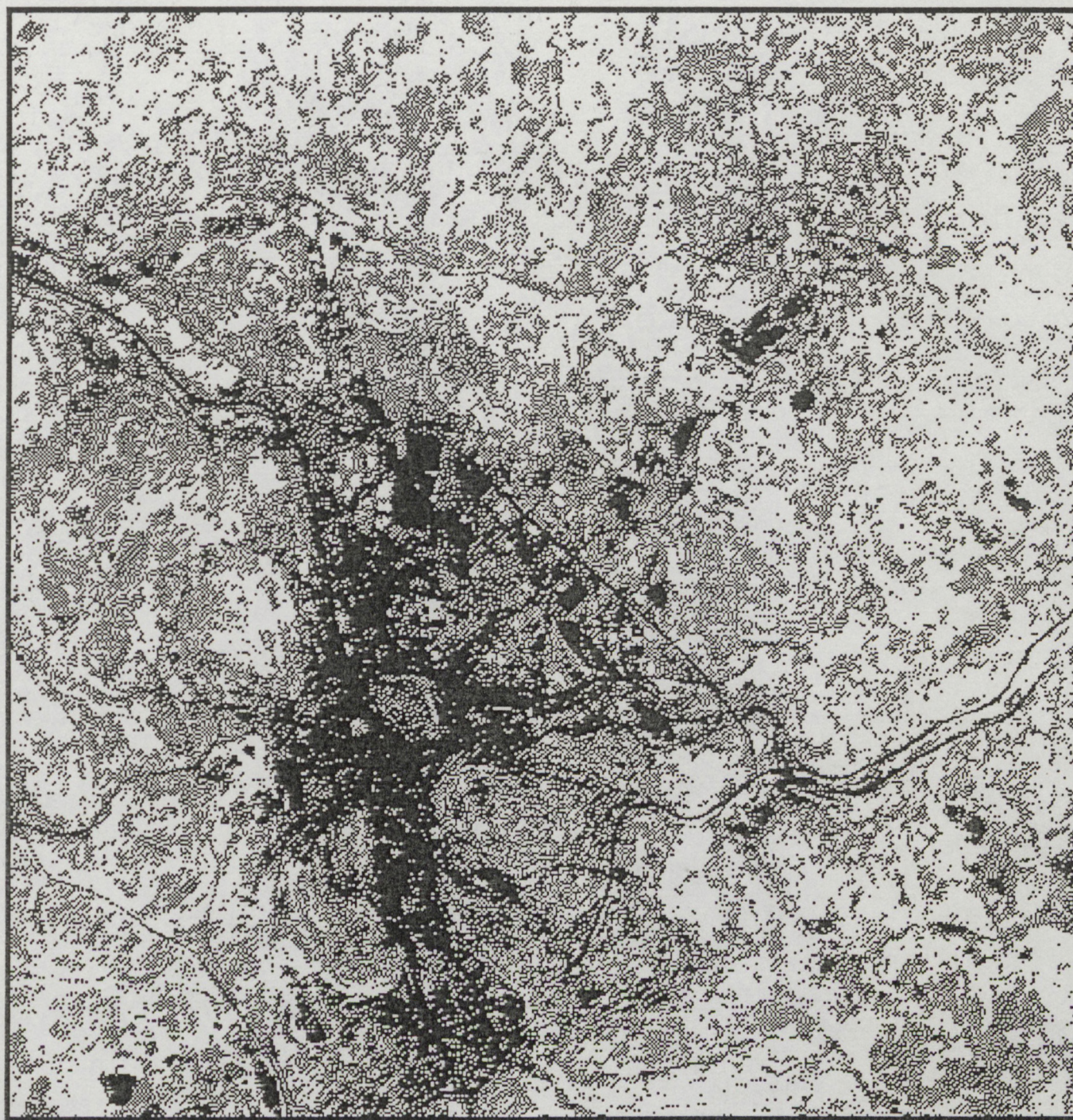
5. CONSTRUCTION DE LA METHODE

Dans ce chapitre, nous allons retracer l'historique de notre démarche en nous attachant à l'essentiel, tout en apportant les détails "techniques" nécessaires et les illustrations des résultats. Pour ces dernières, nous avons travaillé à partir de deux extraits de scènes SPOT lors de son passage au dessus de Saint-Etienne.

Ces scènes ont été prises à des dates différentes, et avec des conditions d'éclairement et de prises de vue différentes. On en trouvera les caractéristiques en annexes 2. Leurs résolutions sont différentes: l'une est multispectrale (512*512 pixels de 20m de côté), l'autre est panchromatique (1024*1024 pixels de 10m de côté).

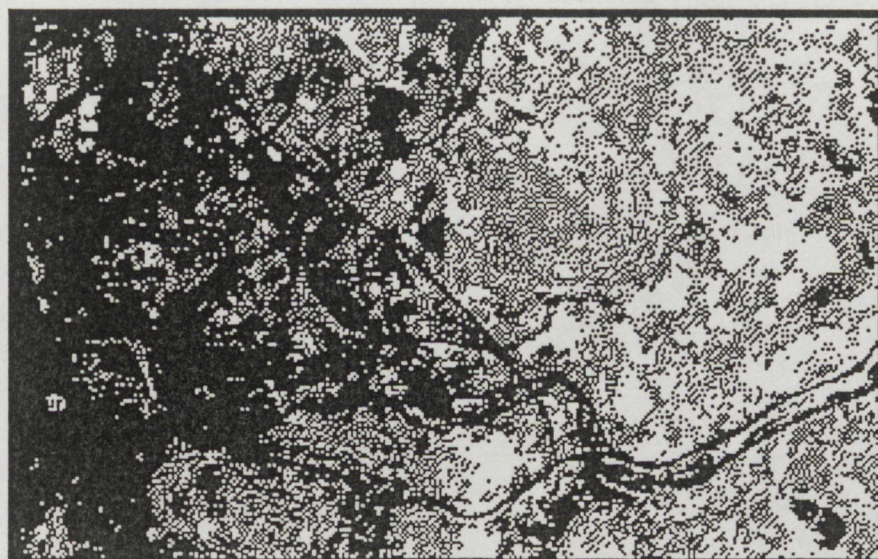
Pour les raisons évoquées plus haut, les caractéristiques du canal XS3 font qu'il est le mieux adapté à l'extraction de la voirie. Aussi avons nous choisi d'emblée de travailler sur ce type d'image pour définir notre méthode d'extraction automatique de voirie. C'est dans un deuxième temps que nous avons testé le comportement de cette méthode sur des images panchromatiques.

Enfin, pour de simples raisons de temps de calcul, d'encombrement de mémoire et de disque, nous avons pris le parti de travailler sur une fraction seulement de ces extraits de scènes. Les dimensions retenues sont ainsi de 320*200 pixels. Dans cet exposé, on trouvera des images dans ce format. Celles-ci illustrent les résultats des différentes étapes de notre démarche, appliquée à une même fraction de scène positionnée sur le centre ville de Saint Etienne. Cette fraction de scène présente une partie de l'agglomération stéphanoise, un échangeur reliant les autoroutes du Puy et de Roanne, et plusieurs pénétrantes en direction du centre.



Canal XS3 d'une imagerie SPOT de 512x512 pixels

Cette image est en fait obtenue par une extension d'histogramme afin d'en améliorer son contraste et donc sa lisibilité (voir annexe 2).



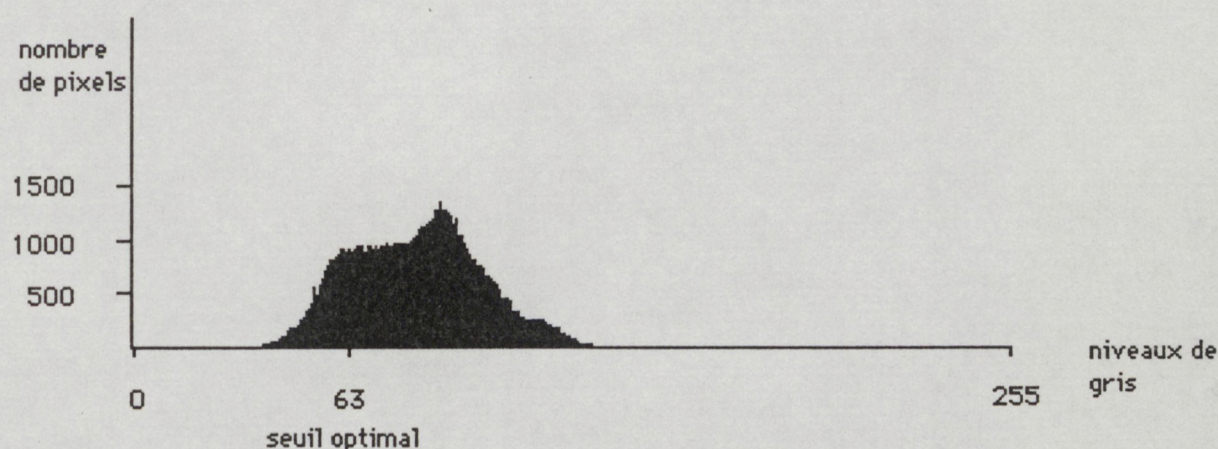
Extrait de la scène SPOT 320x200

5.1. Le suivi de contours sur un seuil brutal

5.1.1. La binarisation

Nous avons dit précédemment que les radiométries correspondant à de la voirie étaient parmi les plus faibles de l'image, tout au moins pour le canal XS3.

Il vient immédiatement à l'esprit d'essayer de seuiller cette image à partir de son histogramme, en choisissant un seuil faible. L'histogramme de la scène retenue est présenté ci-dessous:



Le résultat d'une binarisation avec le seuil indiqué sur l'histogramme donne ceci:

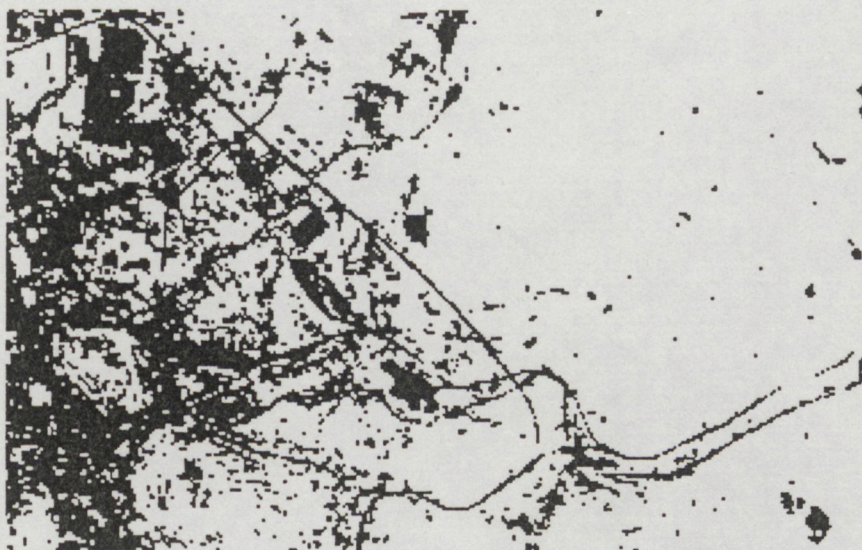


image 1

Le seuil choisi a été déterminé de façon optimale visuellement. Pourtant le résultat est loin d'être satisfaisant, puisqu'il subsiste un amalgame de pixels "voirie" et "non voirie".

On peut tenter d'améliorer ce résultat avec un suivi de contours simple.

5.1.2. Le suivi de contours sur image binaire

Ce que nous appelons contours est en fait constitué des formes linéaires "fines" de l'image. Pour les extraire, nous utiliserons les opérateurs morphologiques très classiques que sont l'érosion et la dilatation. Notre problème consiste donc à ne garder de l'image binaire que les éléments fins ne résistant pas à une érosion.

Ainsi, une érosion et une dilatation seront appliquées successivement, ce qui éliminera les parties fines; puis par soustraction à l'image de départ, nous n'aurons plus que les éléments linéaires fins de l'image binaire (voir image 2). L'élément structurant choisi est une boule de rayon unité sur trame carrée.

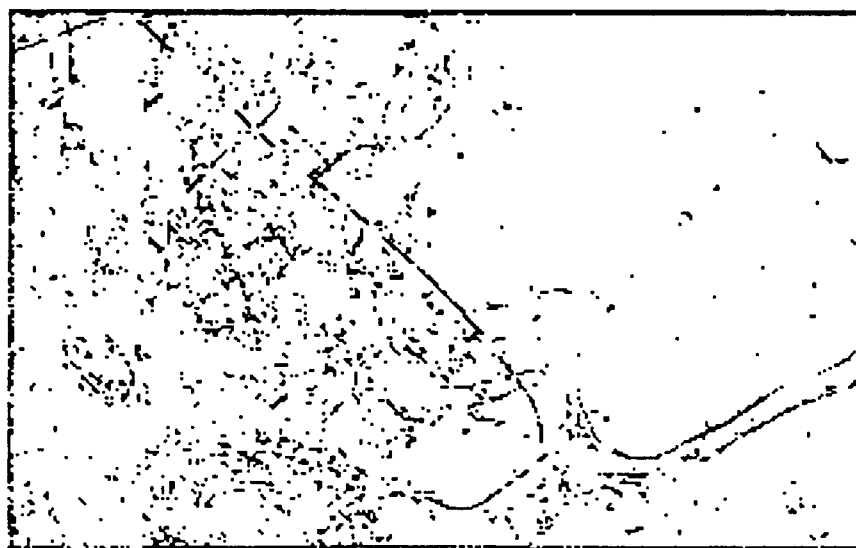


image 2

Une érosion suivie d'une dilatation constituent une fermeture de l'image. Une fermeture suivie d'une soustraction à l'image originale sont communément appelée "Transformation Chapeau Haut de Forme" binaire.

Une amélioration possible du résultat de cette transformation consiste à balayer l'image binaire obtenue avec un filtre directionnel. Celui ci a pour but de ne garder de l'image binaire que les pixels appartenant à un alignement d'au moins cinq pixels, et dans huit directions privilégiées ainsi définies pour un voisinage 5x5:

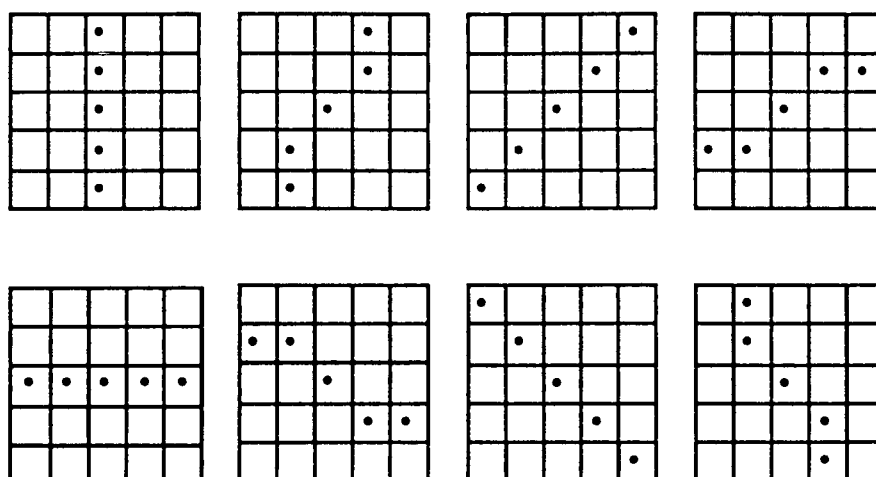


figure 4

Plus la largeur du masque est importante, plus le nombre de directions possibles est grand. Nous avons donc choisi ce compromis en considérant que cinq pixels alignés correspondent sur le terrain à un élément de 100 m de long. Cette dimension semble suffisamment discriminante quant à l'interprétation des pixels "bâti" et des pixels "voirie". L'application de ce filtre à l'image binaire obtenue précédemment fournit le résultat suivant:

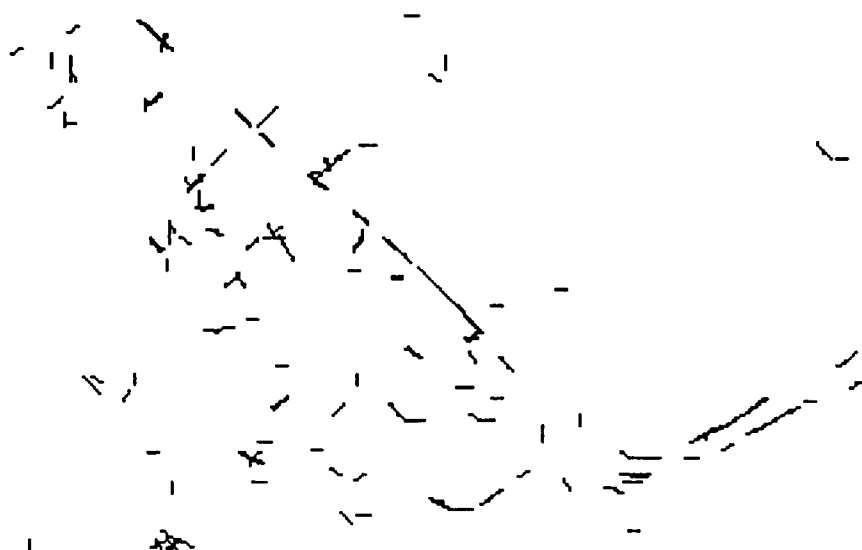


image 3

Le résultat n'est guère meilleur. Il faut donc en conclure que le seuillage sur histogramme n'est pas adapté à l'extraction de voirie. Reprenons la démarche du GDTA (qui consiste dans un premier temps à seuiller un résultat de laplacien) en la modifiant légèrement. Nous utiliserons comme extracteur de contours le classique sobel que nous binariserons. Le résultat obtenu est notablement meilleur qu'un seuillage sur l'image originale, mais le problème déjà évoqué du double contour rend cette méthode impraticable (image 4). En outre on distingue bien les limites de parcelles soulignées par ces opérateurs.

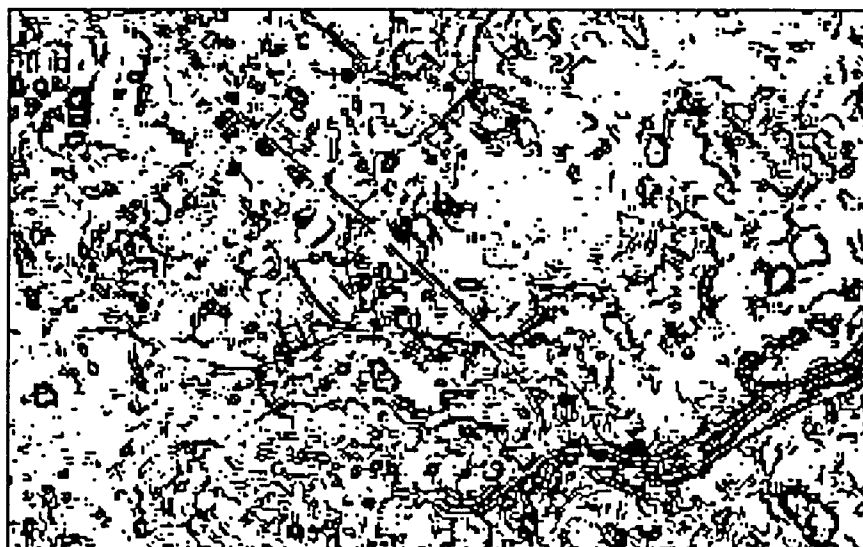


image 4

Le gradient de Kirsch (gradient directionnel - image 5) n'est pas plus performant de ce point de vue, et le problème du seuillage optimal reste entier, tout comme pour le Sobel.

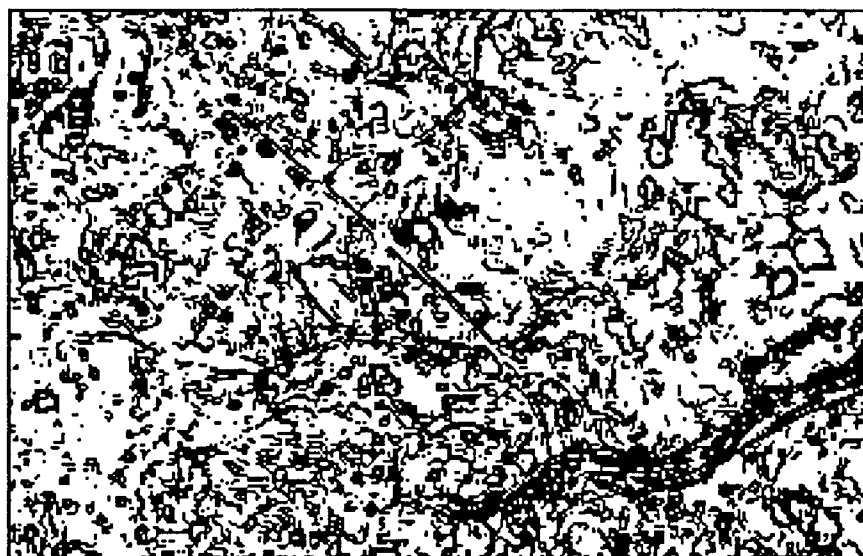


image 5

5.1.3. Conclusion sur cette première approche

Si le seuillage sur histogramme n'est pas adapté à notre problème, les opérateurs différentiels classiques (extracteurs de contours) sont en

contrepartie beaucoup trop sensibles et nécessitent dans tous les cas un seuillage du résultat.

5.2. Le suivi de contours sur un seuil adaptatif

Au vu des résultats précédents, nous avons jugé intéressant d'utiliser un seuillage adaptatif, qui permettrait en fonction du voisinage du pixel de déterminer un seuil convenable pour chaque pixel.

Compte tenu des caractéristiques topologiques et radiométriques de la voirie sur le canal XS3, il a été choisi d'utiliser pour ce seuillage adaptatif les techniques offertes par la morphologie mathématique en niveaux de gris. En effet, comme nous l'avons déjà dit, la voirie constitue en général des formes très allongées d'un ou deux pixels de large. De plus, sur une ligne d'image, les radiométries correspondent à des "fonds de vallées". Notre problème est donc bien adapté à une utilisation de la transformation Chapeau Haut de Forme (CHF), mais en niveau de gris cette fois.

Rappelons brièvement le principe de cette transformation. Un pixel donné prend une valeur en fonction des voisinages de ces voisins, et cette valeur est donnée par:

$$\max_{P_i \in V_4(P_0)} \left(\min_{P_j \in V_4(P_i)} G(P_j) \right)$$

où $G(P)$ désigne le niveau de gris d'un pixel P et $V_4(P)$ l'ensemble de ses quatre plus proches voisins.

Cette définition traduit une ouverture des niveaux de gris, c'est à dire une dilatation suivie d'une érosion. L'image originale est ensuite soustraite à l'image obtenue. L'élément structurant que nous avons choisi est un disque de rayon unité sur trame carrée (voir figure 5), permettant "l'extraction" d'éléments d'un ou deux pixels de large. Le résultat de cette transformation est une image en niveaux de gris qu'il faut donc seuiller.

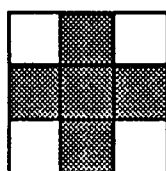
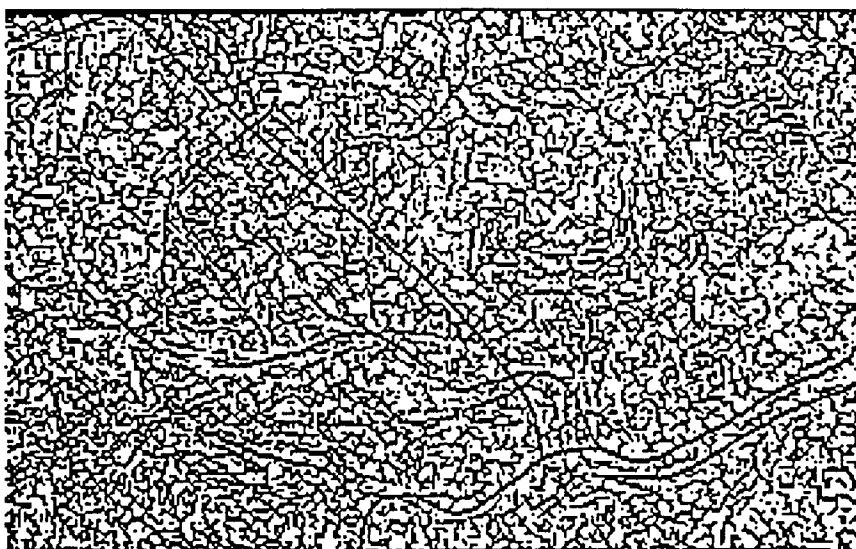


figure 5

Le problème de la détermination du seuil est résolu visuellement par l'équipe de l'ORSTOM dans [18]. Nous écarterons donc cette solution qui ne correspond pas à nos objectifs.

Partant de l'hypothèse, a priori réaliste, qu'un pixel sur une image "naturelle" (très texturée en général) a une probabilité de l'ordre de 0,5 d'être dans un fond de vallée (au sens de la transformation Top Hat, cela signifie que le pixel prend une valeur non nulle) nous avons décidé de seuiller notre image avec le seuil nul. Cette binarisation très simple fournit l'ensemble des pixels susceptibles de correspondre à de la voirie; ils représentent, sur l'exemple de l'image 5, environ 45% de l'image entière. L'hypothèse d'une probabilité de 0,5 est donc ici vérifiée.

image 6

Cette transformation a ainsi éliminé la moitié des pixels sans que l'on ait eu à définir un seuil particulier. Il faut remarquer deux caractères importants de ce résultat.

D'une part, la voirie apparaît plus ou moins large (un ou deux pixels) selon son importance (rue, route de rase campagne, autoroute...). Le CHF respecte donc l'information concernant la largeur des voies. Cette information peut présenter un grand intérêt par la suite, lors de l'analyse de l'urbanisation d'un site.

D'autre part, le seuil de la binarisation étant zéro, toute variation relative des niveaux de gris décelée sur l'image originale par le CHF est conservée sur l'image binaire. En conséquence, le résultat obtenu paraît relativement bruité par les faibles variations de niveaux de gris, omniprésentes sur une image très texturée. Ce bruit se présente sous la forme de pixels isolés ou de petites ramifications (barbules) le long des tracés routiers bien visibles.

Pour éliminer ce bruit, on pense naturellement à employer la squelettisation. Mais cette technique nous ferait perdre l'information sur la largeur des voies. En revanche, le suivi de contours que nous avons déjà utilisé peut s'appliquer encore dans ce cas et donne le résultat suivant:

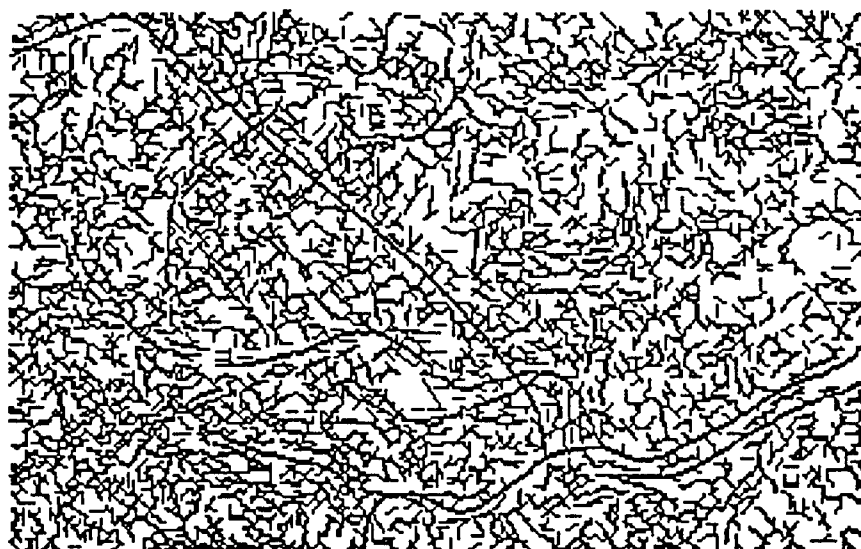


image 7

Si la "lisibilité" de la voirie est améliorée, il subsiste dans certaines régions de l'image une confusion totale avec le bruit. Les pixels "bruit" sont en effet trop connexes et génèrent des alignements de cinq pixels qui sont confondus avec de la voirie par le suivi de contour.

Il nous a semblé nécessaire, après obtention de ces résultats, de traiter le problème du bruit en amont du CHF, à l'aide de lissages adaptés à notre type de problème.

5.3. Le lissage de l'image originale

Le lissage d'une image consiste à atténuer les variations des niveaux de gris des pixels qui la composent. En général, il s'agit pour chaque pixel de calculer une certaine moyenne sur un voisinage donné.

Il existe un très grand nombre de lissages possibles. Le filtre médian est le plus "simple" que l'on puisse utiliser sur une image puisqu'il consiste à faire la moyenne arithmétique de tous les pixels contenus dans un voisinage fixé.

Nous avons choisi à titre de démonstration de l'appliquer sur un voisinage 3x3. Une fois le filtrage effectué, on procède à une transformation CHF sur le résultat du filtre médian (voir image 8).

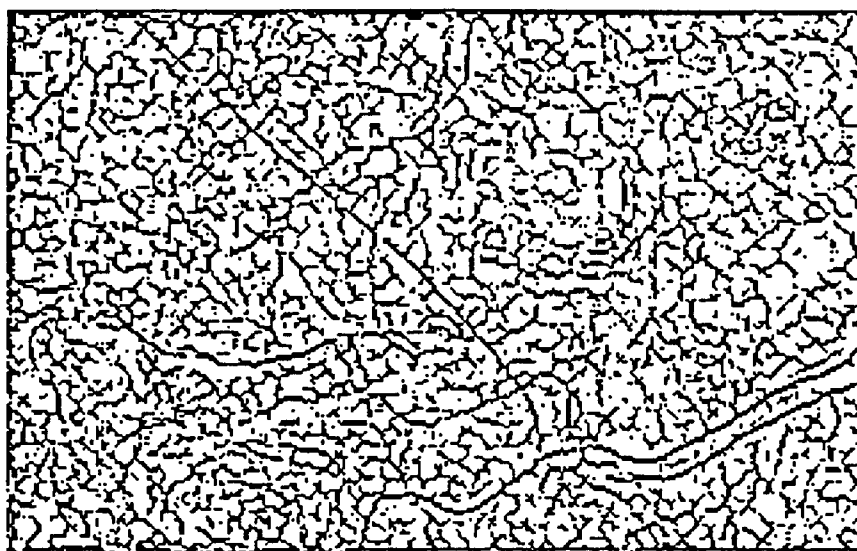


image 8

Si l'on effectue un suivi de contours à la suite, on obtient le résultat suivant:

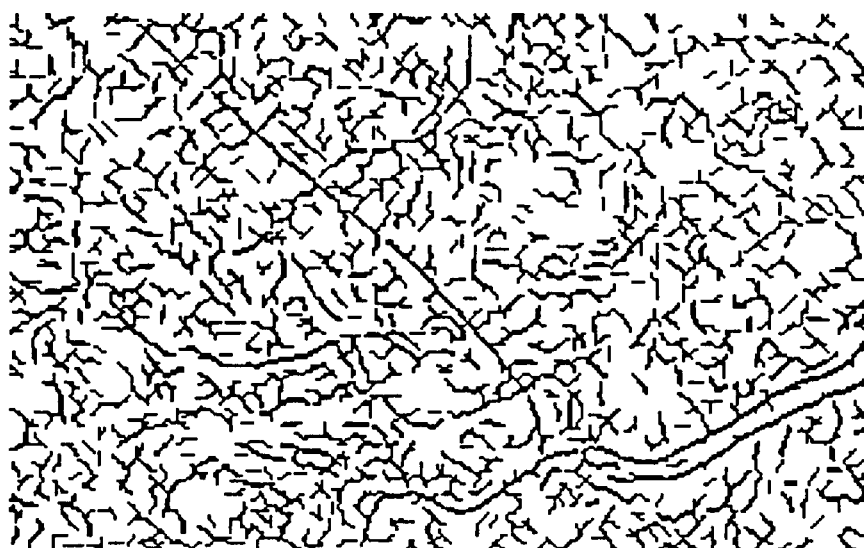
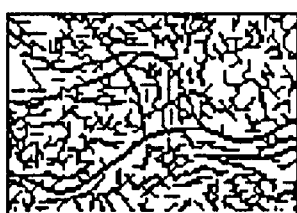


image 9

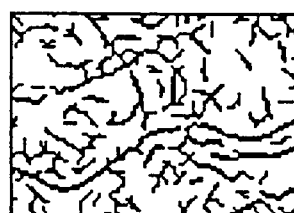
Le caractère dépouillé de cette image ne présente pas que des avantages. La lisibilité des tracés routiers a souffert du lissage:

- * les traits se sont souvent épaissis (deux pixels au lieu d'un) par rapport au CHF sur image originale. Ce défaut s'explique naturellement par le lissage médian qui "étale" l'information. On ne dispose donc plus de l'information "largeur de voie". En outre de fortes discontinuités apparaissent sur les tracés.

- * Un certain nombre de détails ont disparu, complètement "écrasés" par le lissage. C'est le cas de l'échangeur de la bifurcation ROANNE-LE PUY (voir détail de la figure 6).



CHF sur original



CHF après filtre médian

figure 6

Si le filtre médian élimine assez bien le bruit, il détériore d'autant la qualité de l'extraction de la voirie. Aussi, il faut envisager un meilleur lissage, moins "aveugle", qui s'adapte à la morphologie des "objets" que l'on veut

extraire de l'image. Pour cela, nous avons fait appel à la segmentation d'image par croissance de région.

5.4. La croissance de région

Dans ce qui suit nous allons adopter une démarche similaire à celle qui nous a conduit à tester un seuillage "brutal" sur histogramme, pour conclure à l'utilisation d'un seuillage adaptatif. Ici, l'opération de base n'est plus le seuillage, mais la croissance de région.

Nous présenterons deux types de croissance de région, en nous attachant uniquement aux résultats qu'elles donnent et à leur intérêt par rapport à notre problème d'élimination du bruit. Ainsi, nous n'aborderons qu'au 5.5.4 les problèmes "techniques" de l'implémentation de ces types de segmentation d'image.

5.4.1. la croissance de région brute

Rappelons tout d'abord ce qu'est la croissance de région. Il s'agit d'une technique de segmentation d'image qui repose sur une agglomération des pixels selon une contrainte donnée. Cette contrainte, que nous noterons \mathbb{R} , définit en fait une relation d'équivalence entre les pixels: chaque région représente donc une classe d'équivalence d'un pixel relativement à \mathbb{R} .

Un exemple simple de croissance de région, que nous appellerons croissance brute, est donné par la relation suivante:

$$P_0 \mathbb{R} P_n \iff |G(P_0) - G(P_n)| < S \text{ et } P_0, P_n \text{ sont connexes}$$

ou

$$P_0 \mathbb{R} P_n \iff \exists P_1, P_2, \dots, P_m \text{ tels que: } P_0 \mathbb{R} P_1, P_1 \mathbb{R} P_2, \dots, P_m \mathbb{R} P_n \text{ et } P_0, P_n \text{ ne sont pas connexes.}$$

S étant un seuil fixé arbitrairement et $G(P_i)$ étant le niveau de gris du pixel P_i . Cette définition signifie qu'un pixel appartient à la même classe (la même région) que l'un de ses voisins si la différence de niveau de gris avec celui-ci est inférieure au seuil S .

On peut voir "numériquement" comment se regroupent les pixels sur l'exemple de la figure 7 pour les seuils $S=3$ et $S=4$.

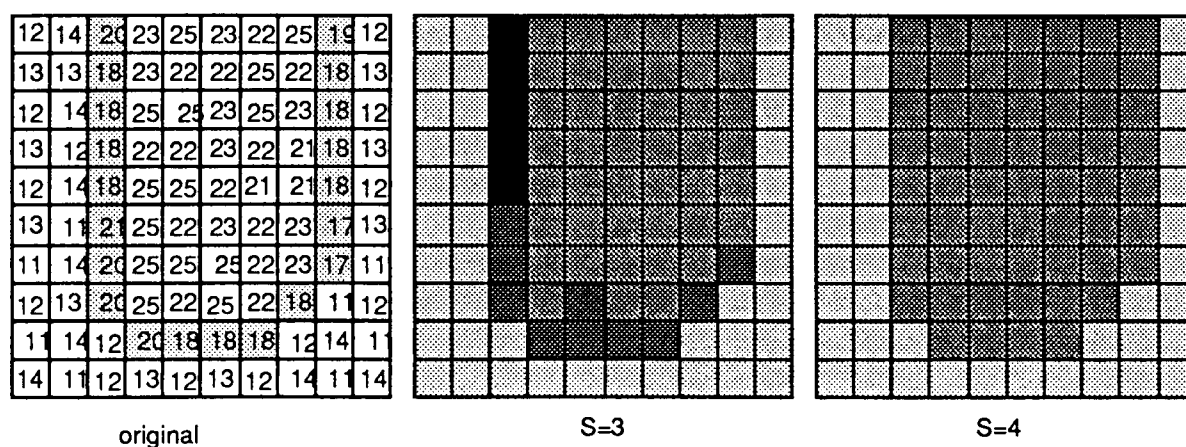


figure 7

Sur la partie gauche sont représentées les valeurs des niveaux de gris d'une portion d'image de 10x10 pixels. On distingue grossièrement trois zones: un "U" sur fond grisé (pouvant représenter une route sur le terrain par exemple) et dont la valeur moyenne des pixels est de l'ordre de 19, et deux autres zones de part et d'autre de ce U, ayant des valeurs de l'ordre respectivement de 13 et 23.

Au centre, le seuil agrégation des pixels est fixé à 3. La croissance de région a donc partiellement "séparé" les trois zones.

Sur la partie droite est représenté le résultat de la segmentation en deux zones: le U a été absorbé lors de la croissance de région. Le seuil $S=4$ était suffisant pour segmenter en deux zones, mais il était trop élevé pour séparer le U. Si l'on prenait un seuil égal à 5, alors la segmentation se réduirait à une seule zone. En dessous du seuil 3, les zones de la segmentation sont trop petites: l'image est alors trop morcelée.

Nous retrouvons donc le même type de problème que pour le seuillage sur histogramme: la détermination d'un seuil optimal. Visuellement, on peut parvenir à un résultat relativement satisfaisant par des essais successifs, comme nous l'avons fait sur l'exemple de la figure 7. Toutefois, il est rare qu'un seuil puisse être déterminé de façon à donner un bon résultat

pour l'ensemble de l'image à traiter. Nous retrouvons donc les notions de seuil local et de seuillage adaptatif.

A problèmes similaires, solutions similaires? Dans une certaine mesure, oui.

C'est en tenant compte des variations locales des niveaux de gris que le CHF permet un seuillage adaptatif. Une méthode qui fournirait, d'une façon analogue au CHF, un seuil agrégation en fonction du voisinage de chaque pixel devrait donner de bons résultats.

Cette méthode existe et a été proposée par MM. ASANO et YOKOYA dans []. Ces deux auteurs proposent en fait deux solutions: **les plus proches voisins** et **la similarité relative**. Nous avons retenu la première qui était mieux adaptée à des zones très allongées correspondant à de la voirie. Nous appellerons cette méthode Croissance de Région Adaptative d'Asano-Yokoya (CRAY).

5.4.2. la croissance de région adaptative

La CRAY (les plus proches voisins) est définie par la relation d'équivalence suivante:

$$P_0 \mathbb{R} P_n \iff |G(P_0) - G(P_n)| < S(P_0, P_n) \text{ et } P_n \in V_4(P_0)$$

ou

$$P_0 \mathbb{R} P_n \iff \exists P_1, P_2, \dots, P_m \text{ tels que: } P_0 \mathbb{R} P_1, P_1 \mathbb{R} P_2, \dots, P_m \mathbb{R} P_n \text{ et } P_0, P_n \text{ ne sont pas connexes.}$$

$$S(P_0, P_n) = \max(\partial, \min(|G(P_0) - G(P_i)|), \min(|G(P_n) - G(P_j)|))$$

et $P_i \in V_4(P_0), P_j \in V_4(P_n)$, ∂ étant une constante fixée, arbitrairement, généralement à 2.

Notons au passage la similitude entre cette définition du seuil adaptatif d'agrégation et celle de la fermeture en niveaux de gris, qui est la base de la transformation CHF qui nous a servi de seuillage adaptatif.

Examinons en reprenant l'exemple de la figure 7 le résultat fourni par cette méthode avec $\partial = 2$.

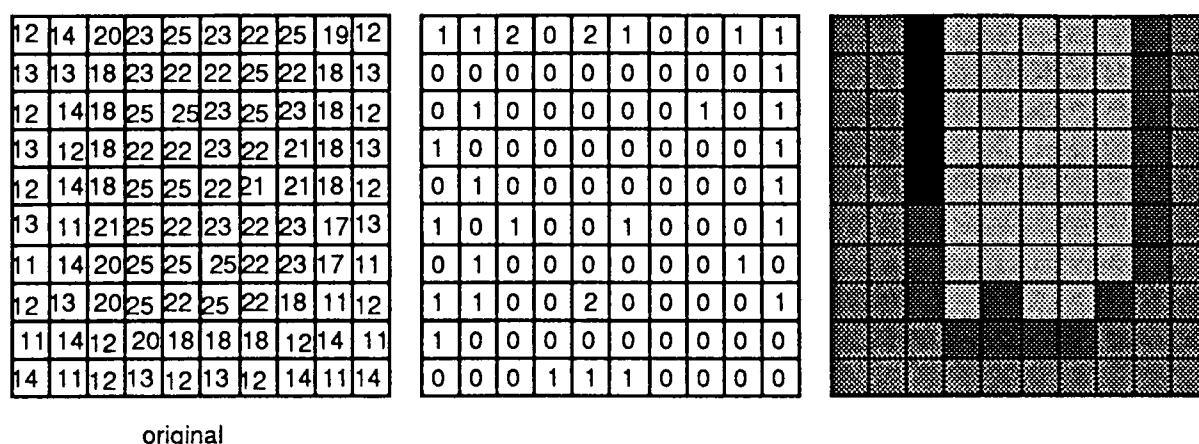


figure 8

Le résultat obtenu sur cet exemple est tout à fait satisfaisant en ce qui concerne la mise en évidence du "U". On peut imaginer que le U représente une portion de voie. Dans ce cas, la CRAY semble permettre une bonne séparation de la voirie par rapport à son environnement. Voyons maintenant comment tirer parti de cette segmentation d'image.

5.4.3. Le lissage par région

La croissance de région n'affecte pas les valeurs des niveaux de gris des pixels. En revanche elle souligne d'une certaine façon la morphologie des "objets" visibles sur l'image originale en regroupant les pixels dans des régions qui reprennent assez bien les contours de ces objets. Bien entendu, la qualité de la segmentation dépend des contrastes qui existent entre ces objets. Dans le cas de la voirie, ce contraste est assez fort dans le canal XS3 pour que cette méthode donnent des résultats intéressants.

Une fois la segmentation obtenue, il suffit d'affecter aux pixels la valeur moyenne des niveaux de gris de la région à laquelle ils appartiennent. On procède ainsi à un lissage qui élimine une bonne part du "bruit" tout en préservant la géométrie et les "frontières" des objets.

Avant de présenter les résultats obtenus par ce lissage sur croissance de région, nous allons expliciter la façon dont nous avons exploité la méthode d'Asano-Yokoya.

5.5. L'implémentation retenue de la croissance de région adaptative

Si l'on reprend la définition de CRAY qui précède, on constate qu'elle ne prend en compte que le voisinage V_4 des pixels. Pour l'exemple de la figure 9, cette méthode n'est pas satisfaisante. En effet chaque pixel noir ne fait pas partie des voisinages V_4 des autres pixels noirs. Il y aura donc autant de régions noires contenant un seul pixel qu'il y a de pixels noirs. Il s'agit là d'une mauvaise segmentation, tout au moins dans le cas où la figure 9 représente une portion de route oblique (ce cas peut se présenter fréquemment dans la réalité) et d'un pixel de large. Aussi avons nous étendu cette définition à un voisinage V_8 pour pallier cet inconvénient (il faut noter également sur ce point que la figure 8 tient compte de cette extension à V_8).

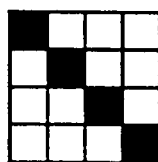


figure 9

Si l'article d'ASANO-YOKOYA proposent des méthodes très intéressantes en ce qui concerne la segmentation d'image, il laisse en revanche le programmeur fainéant (et lui seul...) en plein désarroi car aucune indication n'est donnée sur la façon d'obtenir l'algorithme optimal.

Ainsi donc, après une longue période de désarroi, nous avons éliminé une première solution au problème qui consistait en une détermination des régions d'une façon analogue au remplissage de contours fermés. Cette solution nous a semblée trop coûteuse en temps par la gestion des points de reprise (du remplissage). Par ailleurs, l'idée de pouvoir programmer éventuellement notre chaîne de traitement sur une machine à traitement parallèle (CRAY en parallèle avec CHF par exemple) paraissait incompatible avec cette méthode.

Nous nous sommes donc tournés vers une solution plus classique en traitement d'image, à savoir le balayage ligne par ligne de l'image (de haut en bas et de gauche à droite). L'agrégation des pixels entre eux se fait de la façon suivante.

Pour chaque pixel de l'image, on teste s'il vérifie le critère définissant R avec chacun de ces huit voisins. Si le résultat d'un test est positif, alors les deux pixels correspondants appartiennent à la même zone. Le

test sur les huit voisins n'est en fait pas nécessaire, quatre d'entre eux peuvent suffire dans une certaine mesure.

En effet, \mathbb{R} est une relation d'équivalence donc symétrique. Si A et B sont deux pixels tels que $B \in V_8(A)$ et $A \mathbb{R} B$, alors $A \in V_8(B)$ et $B \mathbb{R} A$. En testant les huit voisins, l'algorithme fait deux fois le même travail. On peut donc se limiter au voisinage illustré par la figure 10.

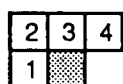


figure 10

Dans ce voisinage, le pixel central (grisé), est testé avec chacun de ces quatre voisins dans l'ordre indiqué. Si le test est satisfait pour un (ou plusieurs) de ces voisins, le pixel central peut être agrégé à celui-ci (ou ceux ci). Sinon, c'est qu'il fait partie d'une zone nouvelle, non encore rencontrée. Mais le problème n'est pas aussi simple d'un point de vue pratique, comme le montre la figure 11.

10	0	0	0	10	A	B	B	B	C	A	B	B	B	C	A	B	B	B	C	A	B	B	B	C	A	B	B	B	C
0	10	0	10	0						B	A	B	C	B	B	A	B	C	B	B	A	B	C	B	B	A	B	C	B
0	0	10	0	0											B	B	A	B	B	B	B	A	B	B	B	B	A	B	B
0	0	10	0	0																B	B	A	B	B	B	B	A	B	B
10	10	0	0	0																					D	D	B	B	B

figure 11

Sur cette figure on trouve à gauche l'"image" binaire originale représentant un Y. Ensuite, est représenté le résultat de la segmentation de la première puis de la seconde ligne. Les zones sont représentées par des lettres que nous appellerons "étiquettes de zones".

Examinons ce qui se passe pour la seconde ligne sur un exemple. Le deuxième pixel (10) ne peut être agrégé à son voisin n°1 (0) ni aux n°3 et n°4. En revanche, il peut être agrégé au n°2 (10). On lui affecte donc la même

étiquette que le n°2, soit A. Il en est de même du principe appliqué aux autres pixels de la seconde ligne.

En ce qui concerne la ligne n°3, la situation est très différente. En effet, sur cette ligne, le pixel n°3 possède deux voisins avec lesquels le test de \mathbb{R} est positif. Or ces deux voisins ont des étiquettes différentes. On en conclut que ces deux étiquettes représentent une même classe d'équivalence puisque \mathbb{R} est transitive. Ceci prouve qu'au cours du balayage ligne par ligne de l'image, il faut tenir à jour des listes d'étiquettes équivalentes afin d'obtenir une segmentation conforme à la méthode d'Asano-Yokoya. La complexité de l'image peut rendre cette gestion de liste très pénalisante pour ce qui est du temps d'exécution. En outre la parallélisation devient là encore impossible, puisqu'il faut un deuxième balayage qui mette à jour la segmentation obtenue après le premier balayage, en fonction des listes d'équivalence d'étiquettes.

Si la ligne 4 ne présente pas de caractère particulier, il n'en va pas de même de la dernière. Le premier pixel de cette ligne n'a aucun voisin, indépendamment des effets de bord bien sûr, auquel il puisse se rattacher. On est donc contraint de lui donner une nouvelle étiquette: D. Pour le second pixel, on se retrouve dans un cas où deux voisins ayant chacun une étiquette différente entrent en concurrence.

Cette exemple met bien en évidence les deux problèmes que pose le passage d'une méthode de type "remplissage de tâche", classique en algorithmique graphique, à une méthode de balayage de ligne.

Cependant, la croissance de région définie par Asano-Yokoya n'est pas une fin en soi. Cette gestion de liste est nécessaire si l'on veut obtenir un résultat strictement conforme à la théorie de ces deux auteurs. Dans le cas contraire, chaque classe d'équivalence serait subdivisée en sous-classes (la classe du Y de la figure 10 est subdivisée en trois sous-classes A, C et D après le premier balayage; la liste d'équivalence permet de "recoller les morceaux" lors d'un second balayage). Ces sous-classes n'en constituent pas moins une segmentation de l'image. Comme nous avons constaté que la méthode Asano-Yokoya séparait bien la voirie du reste de l'image (figure 8), il en est forcément de même pour les sous-classes.

Or nous n'attendions de la technique de segmentation qu'un moyen de lisser une image pour en éliminer du bruit en faisant une moyenne des pixels zone par zone; nous n'avons pas cherché à parfaire l'apparence de la

segmentation en faisant fusionner ces sous-classes. Nous procéderons dans la suite à un lissage pour chacune d'entre elles ce qui nous conduira à un résultat peu différent de celui obtenu à partir d'une croissance de région strictement au sens d'Asano-Yokoya.

Nous avons donc modifié légèrement la définition de \mathbb{R} proposée par les deux auteurs japonais en lui ajoutant la contrainte suivante:

parmi les plus proches voisins au sens d'Asano-Yokoya, nous ne gardons que le plus proche d'entre eux au sens des niveaux de gris (le premier dans l'ordre défini par le voisinage asymétrique de la figure 10 s'il en subsiste plusieurs).

Cette nouvelle définition ne correspond plus à une relation d'équivalence. Le voisinage de la figure 10 n'est pas symétrique mais antisymétrique donc $A\mathbb{R}B$ n'entraîne plus $B\mathbb{R}A$. Il s'agit donc d'une relation d'ordre: la segmentation dépend entre autre du sens du balayage ligne par ligne puisque le voisinage asymétrique est orienté par rapport au sens de balayage. En contrepartie, cette nouvelle relation nous permet de nous affranchir de la gestion des listes d'équivalence d'étiquettes. Si cette méthode paraît, à nos yeux, plus bridée que la méthode japonaise, elle reste cependant assez efficace comme le montreront les résultats présentés au 5.6. Dans la suite nous noterons CROA (Croissance de Région Ordonnée Adaptative) cette pseudo-croissance de région. La CROA est donc une implémentation "ordonnée" ligne par ligne de la CRAY.

5.6. Résultats obtenus après lissage

Dans ce qui suit nous allons comparer les qualités des lissages obtenus par la pseudo-croissance de région brute (ordonnée ligne par ligne) et la CROA.

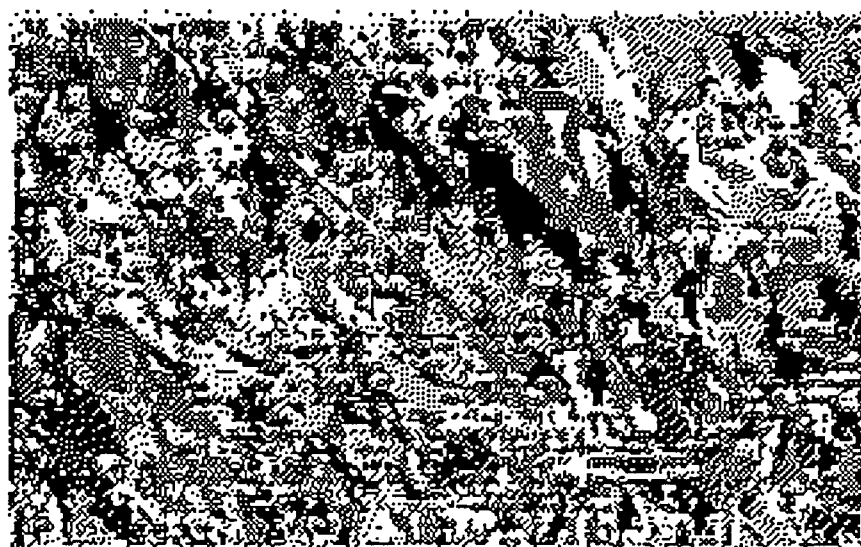


image 10

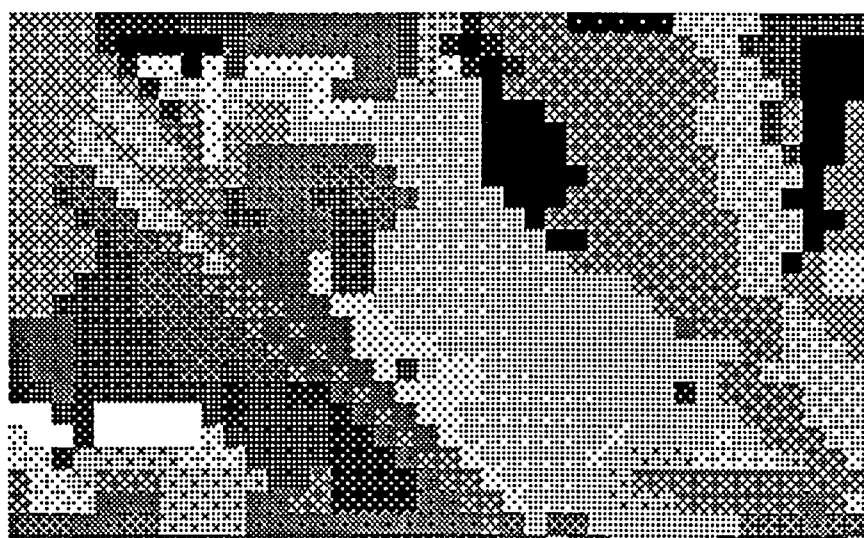


image 11

L'image 10 est le résultat de la segmentation par croissance de région brute. Le seuil retenu dans ce cas est de 5. On appréciera mieux la taille des régions sur la vue grossie que fournit l'image 11.

Lorsqu'on affecte pour chaque région la moyenne des niveaux de gris des pixels qu'elle contient, on obtient une image lissée, proche de l'image originale et où la voirie n'a pas subi d'effet "buvard" comme avec le filtre médian. Lorsqu'on applique une transformation CHF à cette image lissée, on obtient le résultat suivant:

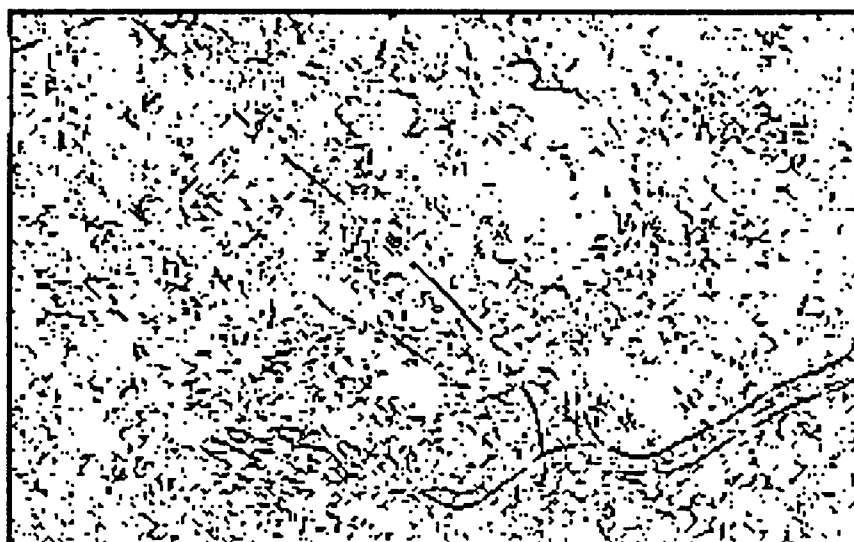


image 12

Cette extraction de voirie n'est pas très satisfaisante puisque de nombreuses portions de voirie ont été gommées, ce qui donne un aspect tireté au résultat. Ceci est dû au seuil fixe d'agrégation que l'on impose à la croissance de région. Si les pixels de voirie ont une différence de niveau de gris de l'ordre de dix avec les autres pixels (végétation, etc...), ce qui convient parfaitement pour un seuil d'agrégation égal à 5, en revanche il arrive fréquemment qu'un pixel soit "à cheval" sur de la voirie et de la végétation. Dans ce cas, le capteur, qui fait une moyenne des radiométries, donne une valeur intermédiaire, entre voirie et végétation. Cette valeur fait que le pixel concerné joue le rôle de passerelle (bridge point) entre la région voirie et la région non-voirie qui le jouxte. Dans ce cas, de la voirie peut être absorbée dans une région plus vaste et disparaître lors du CHF.

Cela explique aussi pourquoi, la CROA, avec son seuil adaptatif, donne de meilleurs résultats comme le montre la figure 12.

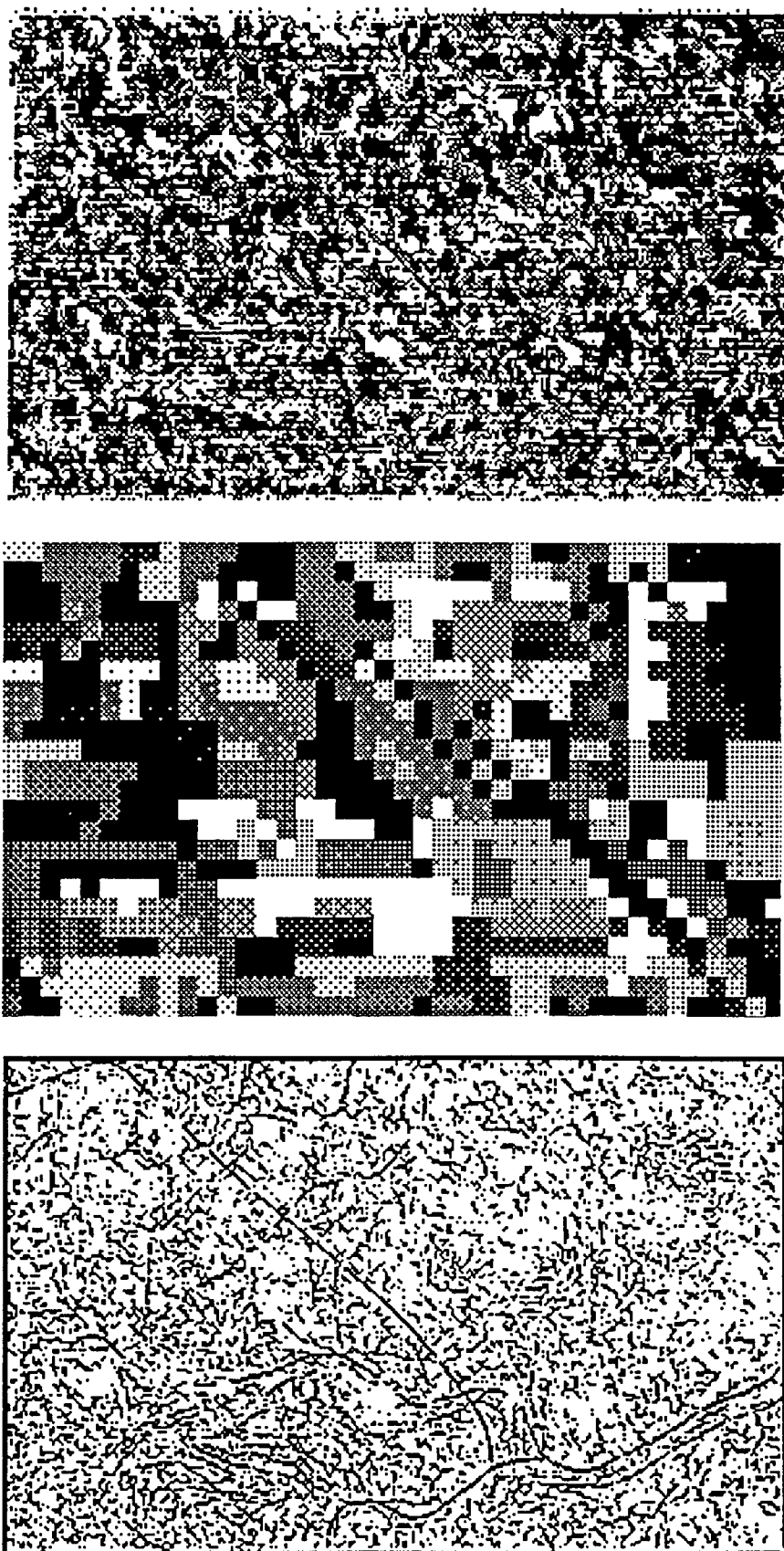


figure 12

Nous constatons ainsi que la CROA fournit une segmentation dont les régions sont beaucoup plus petites et donc plus nombreuses (13794 régions contre 6847) que pour une croissance de région brute. Ceci est dû à la contrainte plus forte exprimée par la relation d'équivalence d'Asano-Yokoya. Par ailleurs, en ce qui concerne l'élimination du bruit, le résultat est assez satisfaisant si on le compare à celui d'une transformation CHF seule.

Le bruit non éliminé correspond aux deux cas de figure présentés par la figure 13. Ce bruit est inhérent à la transformation CHF et à la CROA. Il sera facilement éliminé lors du suivi de contour.

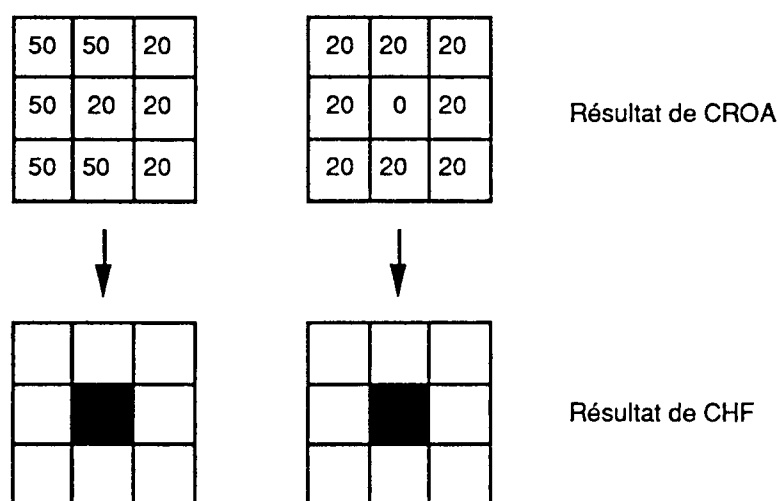


figure 13

5.7. Les améliorations apportées par un seuillage à partir d'un histogramme local

Si l'on compare nos résultats avec une carte ou, mieux, une photographie aérienne, on s'aperçoit que la partie est de Saint Etienne n'est pas aussi "parsemée" de voirie que le laisse supposer la dernière image de la figure 13. Après un examen rapide, on en conclut que les pixels noirs obtenus dans cette partie est proviennent de zones d'ombre, de bâti ou de voirie plus ou moins noyée dans la végétation. Pour ces pixels, les radiométries sur l'image originale varient entre des valeurs propres à la végétation et des valeurs intermédiaires entre végétation et sols nus.

Pour éliminer ces pixels douteux, nous pourrions avoir recours à l'indice de végétation comme on le fait couramment. Mais cette méthode ne nous satisfait pas pleinement dans la mesure où le calcul de cet indice nécessite la manipulation des canaux XS1 et XS2 en plus du canal XS3. Nous allons proposer une méthode qui n'utilise que le canal XS3.

Cette méthode a pour point de départ l'image binarisée obtenue par une CROA suivie d'une transformation CHF. La caractéristique principale de ces images est de présenter un "enchevêtrement" de formes allongées et très minces (un ou deux pixels de large) supposé correspondre à de la voirie. Comment extraire de cette image une portion de voirie la plus grande possible pour en faire l'histogramme des valeurs de niveaux de gris correspondants sur l'image originale? Il est bien entendu hors de question d'utiliser des opérateurs morphologiques classiques (érosion, dilatation, dilatation conditionnelle, reconstruction à l'aide d'un marqueur...) étant donnée la largeur des formes à traiter qui est inférieure à trois pixels (l'"enchevêtrement" ne résisterait pas à une érosion).

Il se trouve que la pseudo-croissance de région que nous avons utilisée pour le lissage se prête très bien à pareille utilisation. En effet l'image binaire va être segmentée en un certain nombre de zones plus ou moins grandes. Parmi les zones correspondant à des pixels noirs sur l'image binaire, il suffit de prendre celle qui a le plus grand effectif. Ce choix ne garantit pas de trouver une zone dont on soit sûr qu'elle correspond exclusivement à de la voirie, mais la probabilité est très grande pour qu'il en soit ainsi, compte tenu des opérateurs utilisés en amont (CROA et CHF). Le résultat de cette extraction est illustré par l'image 13 ci-après.

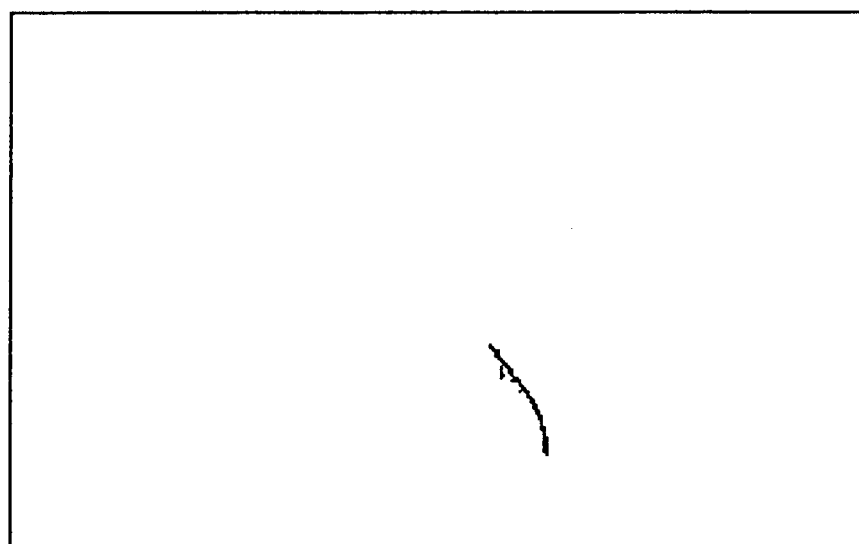


image 13

En considérant les niveaux de gris sur l'image originale des pixels de cette région, on construit un histogramme local correspondant à une portion de voirie. Cet histogramme présente en abscisse deux extrêma (au delà desquels tous les autres comptes sont nuls) dont le plus grand sera utilisé comme seuil de binarisation dans la suite.

Si l'on effectue cette binarisation sur l'image originale, le résultat sera proche de celui obtenu sur l'image 1, ce qui ne présente pas d'intérêt. En revanche l'utilisation préalable du résultat de la figure 13 (CROA+CHF) comme masque appliqué sur l'image originale, fournit une image en niveaux de gris épurée qui se prête bien à une binarisation (image 14).



image 14

Cette image permet de bien distinguer le réseau de voirie principale. Les pixels très isolés qui donnent un aspect pointilliste au résultat, représente des matériaux non recouverts de végétation. Il ne peut donc s'agir que de bâti. Ainsi ce résultat peut être considéré comme un bon indicateur de l'urbanisation (le contraste bien marqué entre l'ouest et l'est est révélateur). On pourra par exemple dresser une carte de la densité urbaine assez précise en appliquant simplement un filtre médian 16x16 sur l'image 14.

Si l'on s'intéresse davantage au réseau de voirie, le bâti peut être éliminé simplement par un suivi de contour, ce qui donne le résultat de la figure 14.



image 15

Nous n'avons pu vérifier précisément l'exactitude des emplacements de chaque portion de voirie représentée sur cette image, mais ce n'est pas primordial dans la mesure où, comme nous l'avons déjà dit, c'est l'aspect quantitatif et non cartographique qui nous intéresse. Là encore, un filtre médian 16x16 permet de mesurer le degré d'urbanisation: plus un point est éloigné de toute voie de communication, moins il a de chance d'être occupé par du bâti.

Si l'on dispose ainsi d'un bon outil de mesure de l'urbanisation, l'image 14 nous amène cependant à conclure sur la faiblesse de la résolution des images SPOT multispectrales en milieu urbain. L'extraction de réseau obtenue ne permet pas de mettre en évidence la trame des rues du centre ville et ignore complètement les rue de moins de 10 mètres de largeur.

Toutefois, en ce qui concerne les chaussées larges des autoroutes, nous pouvons dire qu'elles sont bien détectées car la résolution des images est dans ce cas bien adaptée. Les petites interruptions de tracé le long des autoroutes peuvent aisément être comblées en utilisant des dilatations directionnelles, dont les éléments structurants sont dérivés des filtres directionnels du suivi de contour que nous avons utilisé jusqu'ici (voir figure 14).

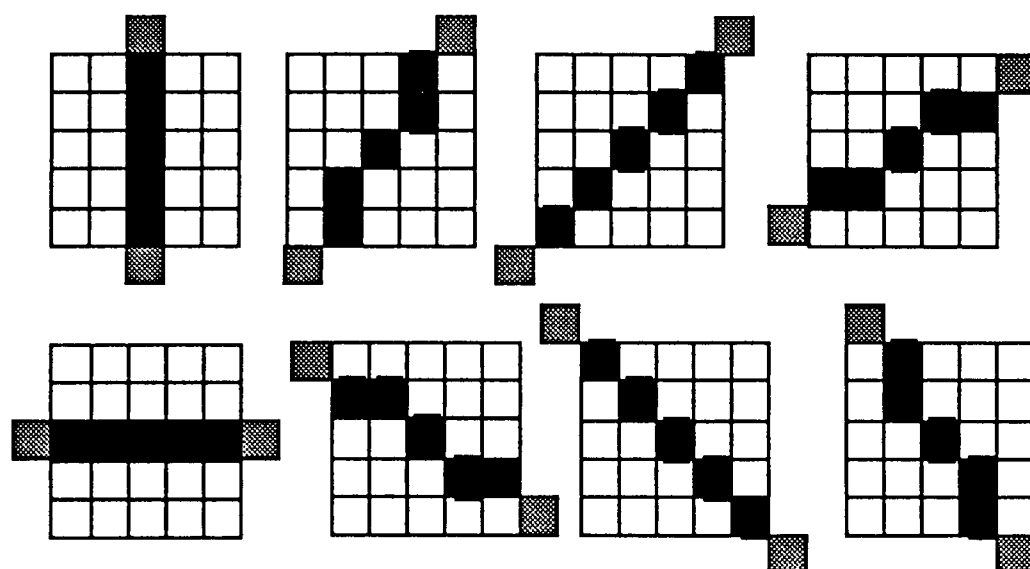


figure 14

Les pixels grisés représentent l'étendue de la dilatation dans chacune des huit directions. Appliquer cette dilatation à l'image 15 est équivalent à l'appliquer à l'image 14, ce qui nous fait gagner une étape. Le résultat est illustré par l'image 16.



image 16

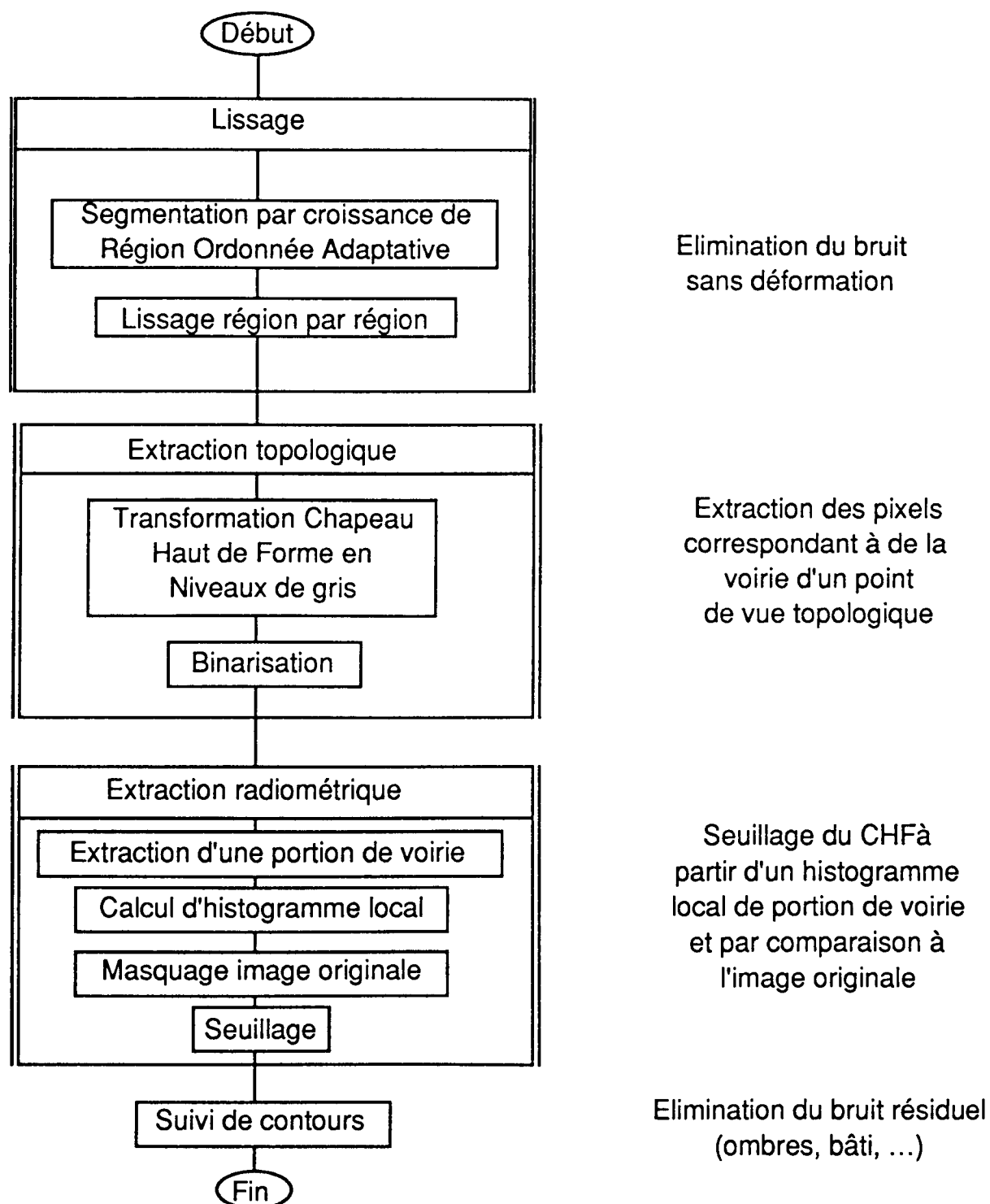
Si l'autoroute est notablement améliorée, en revanche le milieu urbain n'a pas gagné en clarté. Aussi, nous abandonnerons dans la suite ce type de traitement.

Nous allons maintenant faire une synthèse de la construction d'une méthode que nous venons de présenter, et appliquer celle-ci à une autre

scène XS3, afin d'en tester la validité, ainsi qu'à des échantillons de scène panchromatique, afin d'estimer l'apport futur d'une meilleure résolution dans le canal XS3.

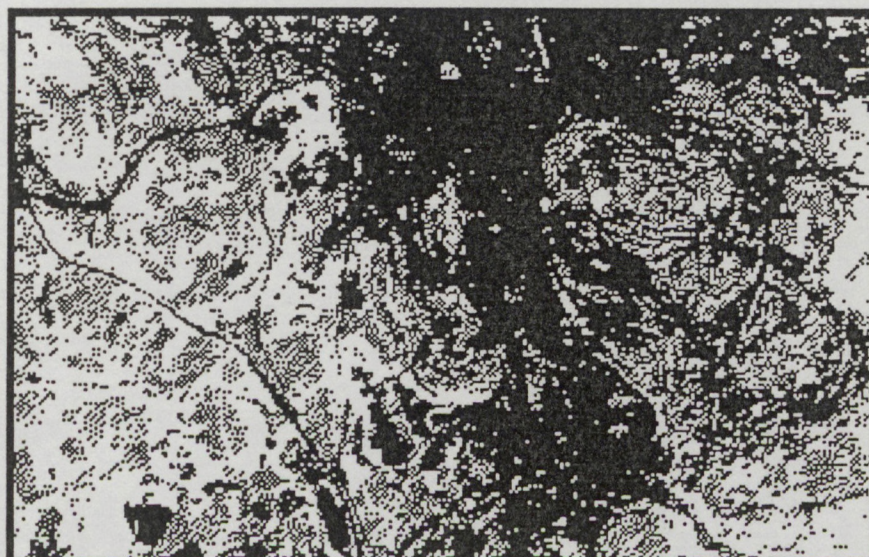
6. FORMULATION DEFINITIVE DE LA METHODE

Nous proposons une présentation sous forme d'organigramme des différentes étapes de la méthode d'extraction automatique de voirie sur une image satellite proche infrarouge à laquelle nous sommes parvenus au chapitre précédent.

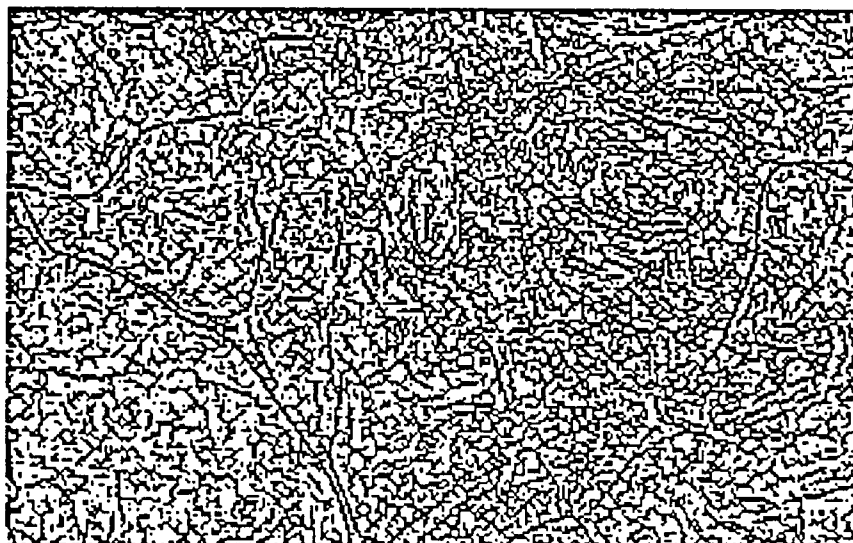


Cette méthode répond aux objectifs que nous nous étions fixés. Ainsi l'extraction est elle automatique puisqu'aucune intervention manuelle n'est nécessaire (choix d'un seuil par exemple). Le résultat n'en est pas moins bon comme l'ont montré les diverses illustrations de l'exemple du chapitre 5. En ce qui concerne la rapidité, si elle n'a rien d'exceptionnelle, elle est cependant acceptable puisque la chaîne complète de traitement d'une image 320x200 demande environ une minute sur un micro-ordinateur à base de 80286 cadencé à 8MHz (avec le langage Turbo C). Sur ce dernier point il faut ajouter que les algorithmes utilisés se prêtent bien à une programmation en assembleur (addition, soustraction, comparaison sur des octets essentiellement).

Afin de nous assurer du bon comportement de cette méthode, nous allons la mettre en œuvre sur une autre fraction de scène SPOT, située au sud-ouest de Saint-Etienne, comme l'indique l'image ci-dessous.



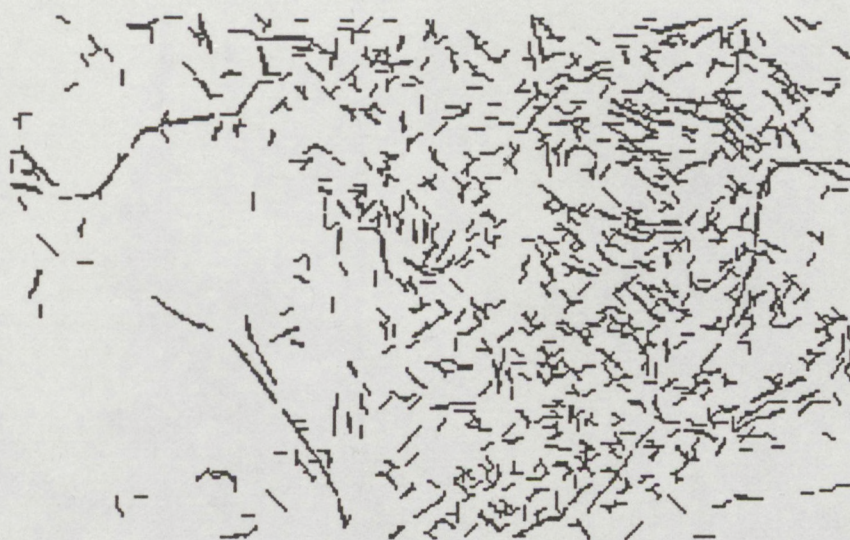
Sur cette image, on peut effectuer un CHF afin de mieux évaluer la qualité du résultat final:



après lissage par CROA puis extraction par CHF, on procède au seuillage sur histogramme local, ce qui donne ceci:



Enfin un suivi de contours permet de s'affranchir du bruit résiduel:



Les interruptions de tracé mettent en évidence l'insuffisance de la résolution, qui fait qu'une portion de route suffisamment étroite apparaît sur l'image originale avec une radiométrie intermédiaire entre végétation et sol nu. Cela explique pourquoi ces portions apparaissent bien après le CHF, et disparaissent ensuite après le seuillage.

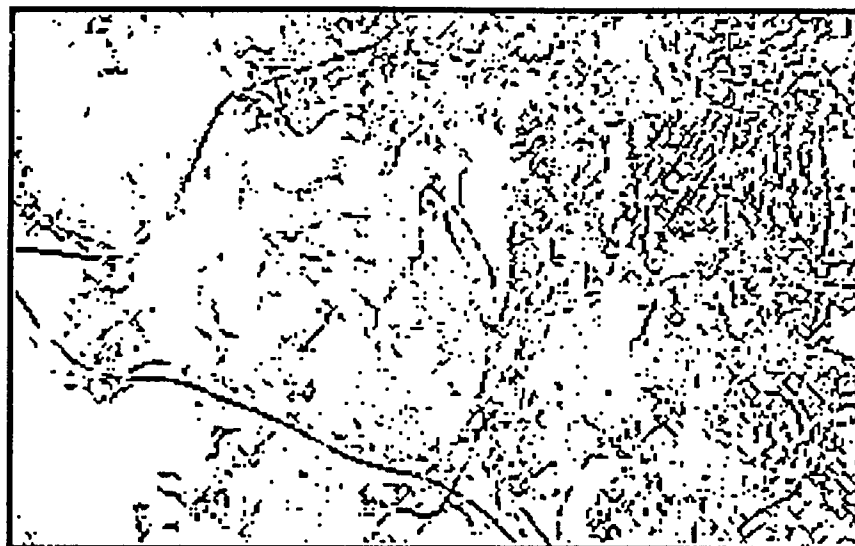
De ce fait, essayons de voir ce qui se passe avec des images panchromatiques d'une résolution de 10 m. Ces images ne sont pas très adaptées à l'extraction de voirie car le contraste de celle-ci sur son environnement est mauvais. Toutefois, dans des régions de rase campagne, les routes peuvent dans certains cas bien se détacher du fond. C'est le cas de l'image ci-dessous, où l'on peut évaluer tout l'intérêt d'une résolution plus fine:



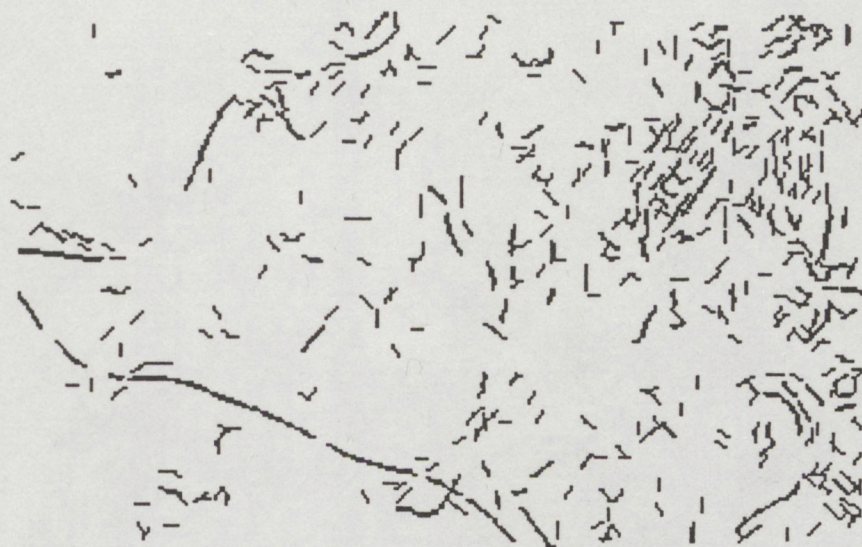
Sur ce type d'image le CHF donne de très bons résultats:



tout comme la méthode que nous avons proposée au chapitre précédent:



Après un suivi de contour, cela donne:



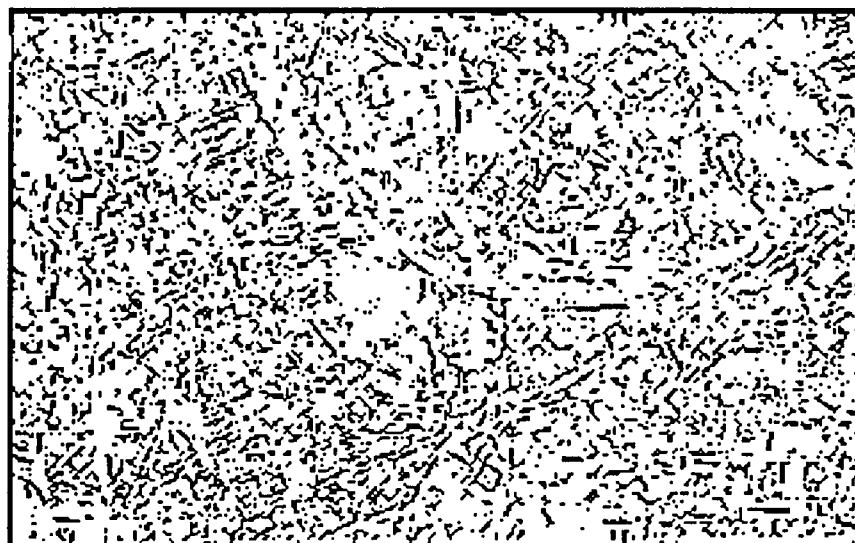
L'image précédente était située en limite d'urbanisation, dans une zone peu texturée. Observons maintenant le comportement d'une image panchromatique dans un périmètre fortement urbain, les alentours de la gare de Châteaureux de Saint Etienne:



Une fois encore, le CHF donne des résultats intéressants et met en évidence la trame des rues.



Mais il n'en est pas de même de la méthode CROA+CHF, pour laquelle le contraste de la voirie n'est pas assez fort, ce qui ne serait sans doute pas le cas pour des images XS3 à 10m de résolution:



7. CONCLUSION

Les résultats obtenus par la méthode qui vient d'être présentée permettent de quantifier la présence d'urbanisation indirectement, par la mise en évidence des réseaux de voiries. Toutefois, ces résultats sont tributaires de la résolution des images satellitaires dont une amélioration très nette est attendue dans les prochaines années. Pour l'heure, nous devons constater l'impossibilité d'envisager une extraction fine en centre ville, se rapprochant d'une cartographie traditionnelle. Par contre, la précision et la fiabilité du résultat sont suffisantes pour assurer une bonne évaluation de la densité urbaine.

En revanche, pour ce qui concerne les liaisons interurbaines, le résultat de l'extraction peut être amélioré par des techniques de vectorisation, et de lissage de courbes pour obtenir les véritables tracés routiers. Cette approche cartographique avait déjà été tentée sur des images aériennes par Nevatia et al. dans [14]. Nous avons eu le plaisir de constater que nos résultats étaient aussi bons (meilleurs en centre ville) et obtenus plus rapidement et d'une manière automatique, ce qui n'est pas le cas dans [14], si l'on s'en tient aux informations données par les auteurs.

8. ANNEXES

8.1. BIBLIOGRAPHIE

- | | | |
|--|--|------|
| 1-ALIGNMENT AND CONNECTION OF FRAGMENTED
LINEAR FEATURES IN AERIAL IMAGERY | Mc KEOWN IEEE
F.PANE | 1985 |
| 2-A MODEL FOR LOGARITHMIC IMAGE PROCESSING | M. JOURLIN JOM N°149
J.C PINOLI | 1988 |
| 3-ANALYSE DE MOUVEMENT PAR IMAGERIE IN-
FRAROUGE UTILISANT UNE SEGMENTATION
COOPERATIVE POINTS D'INTERET VS REGION | P.BONNIN PIXIM
E.PAUCHON | 1988 |
| 4-AN EDGE EXTRACTION TECHNIQUE FOR NOISY
IMAGES. | MINSOO SUK CVIP N° 25 | 1984 |
| 5-AUTOMATIC ROAD DETECTION ON LANDSAT 4 TM
IMAGES | J. TON 21TH ISRS
W. ENSLIN | 1987 |
| 6-CARACTERISATION AUTOMATIQUE DE DEGRA-
DATIONS DE SURFACES DE CHAUSSEES PAR
ANALYSE D'IMAGES NUMERIQUES | G.SOUSSAIN PIXIM | 1988 |
| 7-DETECTING BUILDINGS IN AERIAL IMAGES | A.HUERTAS CVIP N° 41
R.NEVATIA | 1988 |
| 8-EDGE EXTRACTION USING ENTROPY OPERATOR | A. SHIOZAKI CVIP N° 36 | 1986 |
| 9-HEURISTICS FOR INTERMEDIATE LEVEL ROAD
FINDING ALGORITHMS | VASUDEVAN CVIP N° 44
CANNON
BEZEK
CAMERON | 1988 |
| 10-HYPERQUADRICS : SMOOTHLY DEFORMABLE
SHAPES WITH CONVEX POLYHEFRAL BOUNDS | J. HANSON CVIP N° 44 | 1988 |
| 11-IMAGE SEGMENTATION SCHEMA FOR LOW LEVEL
COMPUTER VISION | T. ASANO PR N°14
N.YOKOYA | 1981 |
| 12-INTRODUCTION TO MATHEMATICAL MORPHOLOGY | J. EAN SERRA CVIP N° 35 | 1986 |
| 13-KNOWLEDGE-BASED PICTURE UNDERSTANDING OF
WEATHER CHARTS | TANIGUCHI PR N° 17
YOKOTA
KAWAGUCHI
TAMATI | 1984 |
| 14-LINEAR FEATURE EXTRACTION AND DESCRIPTION | R. NEVATIA CVIP N° 13
K.RAMESH | 1980 |
| 15-RECONNEXION DE CONTOUR UTILISANT LE
PARCOURS OPTIMAL D'UN GRAPHE | P.FABRE PIXIM | 1988 |
| 16-RECONSTRUCTION OF PLANAR BOUNDARIES FROM | H.NAIR CVIP N° 39 | 1987 |
| 17-SEGMENTATION ET CLASSIFICATION SUR UNE | A.MICHEL PIXIM | 1988 |

IMAGE SATELLITE SPOT EN MILIEU URBAIN APPLICATION à LA VILLE DE QUITO	B.LORTIC			
18-SEGMENTATION OF A HIGH-RESOLUTION URBAN SCENE USING TEXTURE OPERATORS	W.CONNERS M.TRIVEDI A.HARLOW	CVIP N° 25	1984	
19-VECTORGRAPH CODING: EFFICIENT CODING OF LINE DRAWINGS	S. LANDY Y. COHEN	CVIP N° 30	1985	
20-URBACLUB N°12			1988	
21- APPLICATION DE LA TELEDETECTION EN MILIEU URBAIN	GDTA C.PEDRON	SITAU89	1989	
22- A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM USING QUADTREES	H.SAMET A.ROSENFELD	PR N° 17	1984	

CVIP = Computer Vision, Graphics and Image Processing

ISRS = International Symposium of Remote Sensing

JOM = Journal of Microscopy

PR = Pattern Recognition

8.2. CARACTERISTIQUES

Les imageries utilisées sont issues des images du catalogue de SPOT IMAGE référencées ainsi :

* image multispectrale de Saint-Etienne référencée sous le n°= 0094507T au catalogue de SPOT IMAGE (KJ 047 258)

angle de prise de vue : 1,9 ° W

date de prise de vue : 13/07/86

* image panchromatique de Saint-Etienne référencée sous le n°= 0217697G

angle de prise de vue : 12,1° W

date de prise de vue : 15/04/87

Les deux imageries utilisées sont centrées sur le point de coordonnées Lambert II

latitude : 45° 26'

longitude : 4° 23'

et ont un niveau de correction 1B.

