

Extra. Actes du 1^{er} Colloque Scientifique International
Pixim 88 : l'image numérique à Paris, 1988 No 124-2
p. 361 - 377
D.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : B 26053
Cote : ex 1 7/6/88

**SEGMENTATION ET CLASSIFICATION SUR UNE IMAGE SATELLITE SPOT
EN MILIEU URBAIN**
Application à la ville de QUITO (Equateur)

Alain MICHEL, Bernard LORTIC (*),
Olivier BARBARY, Françoise DUREAU, Marc SOURIS (**),
(*) ORSTOM; L.I.A., Unité de Télédétection,
70-74 Route d'Aulnay, 93140 Bondy, France, Tel 48 47 31 95.
(**) ORSTOM, Apartado Postal 6596 CCI, Quito, Equateur. Tel 238 216.

ABSTRACT :

The general target of the research program is to work out a permanent urban population observation system dealing with information coming from high resolution satellites (SPOT and Thematic Mapper).

Satellites are continuously informing us about urban land use. Our method consists of using this exhaustive information on urban morphology, especially the space build density, to quickly collect, by sample survey, urban population data.

In the first part of the paper, we explain our methodology to automatically extract the urban road system, which define zones, from a SPOT imagery using mathematical morphology.

The second part is spared to geometrically rectify the image and then to estimate the quality of the extraction in comparison with 1/2000 digitalized maps.

The comparison between 2 supervised classifications of zones according to space build density fill the third part.

INTRODUCTION

L'objectif général assigné au programme de recherche*¹ est de mettre au point un système d'observation permanent des populations urbaines utilisant l'information apportée par les satellites à haute résolution (SPOT et Thematic Mapper).

Les satellites renseignent de manière continue sur l'occupation du sol en milieu urbain : il s'agit donc, dans la méthode que nous développons, d'utiliser cette information exhaustive sur la morphologie urbaine pour recueillir rapidement, sur le terrain, des données relatives aux populations urbaines. Les travaux réalisés (par M. VERNIERE notamment) sur photographies aériennes ont montré l'efficacité de ce principe.

*1 L'équipe de l'ORSTOM, pluridisciplinaire, est composée de : F. DUREAU (géographe-démographe, responsable du programme), O. BARBARY (statisticien, allocataire MRT), B. LORTIC (télédétection, technicien de recherche), A. MICHEL (urbaniste télédétection, allocataire MRT), I. RANNOU (télédétection, technicienne, photographe) et M. SOURIS (informaticien, ingénieur de recherche).

Une meilleure connaissance de l'espace urbain grâce à l'information apportée par les images satellites constitue un facteur important d'amélioration d'un système d'enquête démographique par sondage :

- pour l'établissement d'une base de sondage complète et à jour,
- pour l'optimisation du sondage par la prise en compte de l'information sur la morphologie urbaine,
- pour l'obtention de résultats localisés, selon un découpage significatif de la ville

D'après les travaux réalisés par O. BARBARY*¹ lors de l'expérimentation de la méthode à Marseille, la densité de l'espace bâti apparaît comme le descripteur de la morphologie urbaine qui importe le plus dans l'explication des relations bâti / population.

Pour faire apparaître les phénomènes urbains qui nous intéressent, ici la densité du bâti, nous avons pu constater l'avantage, en site urbain, du traitement d'image satellite (densité du bâti par exemple) dans des zones pré-définies par rapport à un traitement classique par pixel. Cet avantage nous est apparu lorsque nous avons travaillé sur les images Thematic Mapper de la ville de Marseille*². Dans ce cas précis, ces zones pré-définies résultaient de zonages visuels pour la morphologie du tissu urbain établis sur photographies aériennes et d'un zonage administratif imposé en ce qui concerne les îlots INSEE. Ces différents zonages ont été numérisés puis superposés à l'image satellite après redressement de cette dernière. Une telle superposition a permis de générer des statistiques radiométriques par zone, le traitement de ces statistiques permettant la différenciation des différents tissus urbains.

Tel n'est pas le cas à Quito, où nous nous plaçons dans une situation d'application pratique de la méthode de sondage spatial sur image satellite : nous n'utilisons aucune information autre que les documents satellitaires, et n'utiliserons donc pas la numérisation des différents pâtés de maisons. Or, c'est justement cette entité, le pâté de maisons, qui doit servir de base pour la définition des unités spatiales d'enquête.

Il s'agit donc dans un premier temps de tester la fiabilité d'une extraction automatique de la voirie devant permettre la création de zones, une zone étant l'unité spatiale incluse à l'intérieur des contours de la voirie adjacente. Cet objectif est atteint en trois étapes :

- l'extraction de la voirie,
- la reconstruction des contours (réseaux de voirie), chaque zone devant impérativement être fermée.
- la classification de l'ensemble des zones préalablement labellisées en fonction de la densité du bâti établie sur échantillon afin d'obtenir une stratification de l'espace urbain.

L'objectif de cette étude est donc d'exposer ces différents traitements à mettre au point, les choix qui devront être effectués à chaque étape, les problèmes qui en découlent et enfin les résultats obtenus.

1) DÉFINITION DE LA MÉTHODE D'EXTRACTION DE LA VOIRIE À L'AIDE D'ALGORITHMES DE MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE

Une multitude de méthodes existent pour détecter puis extraire des contours sur une image. Certaines de ces méthodes parmi les plus classiques et les plus employées dans différents domaines sont exposées dans [BASSEVILLE M., 1979]. Les méthodes de détection de contours les plus couramment utilisées en télédétection sont fondées sur les gradients (Robinson, Kirsch, Prewitt, Sobel, Roberts, etc) ou les Laplaciens. La morphologie mathématique, en teinte de gris sur image en trame carrée, d'un développement plus récent [SERENDERO M.A., 1987], [DESTIVAL I., 1987], offre des chaînes de traitements séduisantes, rapides en temps calcul et d'une mise en oeuvre aisée, ce qui n'est pas toujours le cas en ce qui concerne les méthodes plus classiques. Nous avons donc décidé de tester ces "nouvelles" méthodes sur l'image satellite SPOT de Quito.

Lors de la phase de développement, nous avons défini une imagerie de 700 lignes par 900 colonnes extraite d'une scène SPOT panchromatique de Quito. La taille de cette imagerie nous a été imposée par des contingences matérielles, taille des tableaux acceptable par l'ordinateur et temps calcul raisonnable permettant de tester différentes chaînes de traitement

*¹ Voir Bibliographie, notes de travail d'O. BARBARY

*² Voir Bibliographie équipe ORSTOM

en morphologie mathématique.

1.1) Définition de la chaîne de traitement choisie pour extraire la voirie

Les réseaux routiers principaux se singularisent sur une image satellite par 3 facteurs essentiels :

- leur réponse radiométrique (sur image panchromatique) très faible
- leur finesse spatiale
- leur configuration linéaire

Une opération de morphologie mathématique en teinte de gris est particulièrement adaptée pour prendre en compte la combinaison des 2 premières caractéristiques; il s'agit de la transformation "**chapeau haut de forme**". Il n'est pas en effet possible d'espérer pouvoir extraire la voirie à l'aide d'un simple seuillage, car les réseaux ne sont pas les seuls composants de l'image à répondre très faiblement dans la fenêtre du visible (les arbres offrent une réponse très proche). Par contre, la prise en compte simultanée de ces 2 premiers facteurs est discriminante.

1.2) Transformation "chapeau haut de forme"

Nous avons travaillé sur une image résultant de la somme du canal panchromatique et du proche infra-rouge (canal XS3) afin de bénéficier de la résolution spatiale optimum (panchromatique) et du pouvoir discriminant de la radiométrie infra-rouge (canal XS3).

Cette opération se compose de plusieurs étapes que nous allons maintenant présenter.

. Extraction des vallées. Eléments théoriques.

Si l'on considère un transect dans l'image sous la forme d'un histogramme des valeurs de gris, les réseaux apparaissent comme des vallées profondes (ils possèdent une très faible valeur) de faible amplitude (les réseaux ne sont pas larges d'un point de vue spatial). Il s'agit donc d'isoler ce phénomène afin de mieux pouvoir extraire la voirie. Cette mise en évidence est obtenue après les convolutions décrites ci-dessous :

- "**fermeture**" de l'image. Cette transformation se décompose en 2 opérations de base effectuées l'une après l'autre (l'ordre est ici fondamental) :

- une "**dilatation**",

cela revient de façon intuitive à combler les vallées et à épaissir les pics.

- une "**érosion**",

qui revient à l'inverse à réduire les pics et à élargir les vallées.

On voit que la fermeture a donc opéré un comblement des vallées, laissant globalement le reste de l'image peu transformé. Il ne reste donc plus qu'à soustraire l'image que nous venons d'obtenir par l'image origine, puis à seuiller ce résultat de façon à ne conserver que l'information qui nous intéresse, c'est à dire les vallées.

- soustraction de l'image "fermée" à l'image origine et seuillage.

Nous obtenons donc une image binaire où n'apparaissent que les vallées, c'est à dire principalement les éléments de voirie qui nous intéressent.

Deux paramètres restent à déterminer : le type de l'élément structurant et la valeur du seuil. Un tel choix n'est possible qu'après avoir testé les différentes valeurs admissibles.

. Choix des paramètres. Aspects pratiques

En ce qui concerne l'élément structurant, nous avons le choix entre 2 tailles:

- un masque 5*5 pixels
- un masque 3*3 pixels
 - connexité 4 (4 voisins)
 - connexité 8 (8 voisins)

La taille de l'élément structurant dépend de la taille de l'élément que l'on cherche à mettre en évidence sur l'image. Dans notre cas, un masque 3*3 paraît le plus adapté. En effet majoritairement, la largeur de la voirie se réduit à 1 pixel. La connexité 8 a été préférée, c'est la seule qui assure une continuité du réseau de voirie.

En ce qui concerne la détermination de la valeur du seuil, nous avons opéré par seuillage visuel interactif sur *Station de travail SUN*, la valeur optimum de ce seuil correspondant à la valeur pour laquelle nous conservons un maximum d'éléments linéaires et un minimum

de "taches". Ce choix est bien évidemment arbitraire.

1.3) Amincissement du réseau par itérations successives

Nous considérons l'image obtenue à l'issue de ces traitements comme bruitée, par exemple par des pixels doublés, informatifs de la largeur de la voirie, alors que seule l'information contour nous intéresse. Nous allons donc procéder à un amincissement des éléments de voirie extraits afin de ne conserver que la présence des éléments linéaires. Ces éléments de voirie sont codés 1 (élément de contour). Cet amincissement consiste en une succession de 8 érosions de l'image binaire, chacune de ces érosions étant effectuée dans l'une des 8 directions possibles 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° et 315° (image en trame carrée et masque 3×3 pixels).

L'avantage de ce traitement réside dans le fait qu'il n'interrompt pas les éléments linéaires; il **préserve la connexité des éléments de voirie**. Cette succession de 8 érosions (chacune avec un élément structurant différent) est menée jusqu'à idempotence, c'est à dire jusqu'à ce qu'aucun changement n'intervienne. C'est la réalisation classique d'un squelette par amincissements successifs.

1.4) Amélioration de l'extraction de la voirie

Plusieurs opérations sont indispensables pour améliorer la qualité de l'extraction de la voirie, la connexion de pixels isolés ou en groupes à un segment pour assurer la continuité du réseau ainsi que la suppression des pixels ou groupes de pixels isolés n'appartenant a priori pas à la voirie. Cette dernière opération fait appel à un enchaînement de plusieurs opérations de morphologie mathématique classique que nous ne développerons pas ici.

. Fermeture des contours. Présentation de la méthode

Il est souhaitable de prolonger la méthode que nous avons développée en soumettant notre image à des algorithmes de suivi de contour. La littérature est très abondante sur ce sujet. La méthode préconisée par [MILGRAM et Al], testée sur photographie aérienne numérisée, paraît adaptée à notre cas bien qu'un grand nombre de points selle, i.e un éventuel point contour non encore détecté, risquent d'apparaître.

Cette méthode se fonde sur l'idée principale qu'un point selle, présente la particularité d'être un point où la fonction "distance au point contour le plus proche" passe à la fois par un maximum dans une direction et par un minimum dans une autre direction. L'algorithme se scinde donc en plusieurs parties:

- génération de l'image des distances au point contour le plus proche
- recherche des points selle. Pour éviter une sur-détection de ces points selle, on élimine les points détectés qui se situent trop loin du point contraste le plus proche.

Cet algorithme peut éventuellement se répéter en transformant les points-selle en point contour, puis en recalculant une nouvelle image des distances etc...

L'image des distances est une approximation du double de la distance euclidienne utilisant les distances de "CHAMFER" afin de pouvoir générer une image constituée de nombres entiers. Elle se calcule en deux passages à l'aide de masques.

La recherche des points-selle nécessite pour chaque pixel le test des 12 configurations d'alignement à l'intérieur d'une fenêtre 3×3 centrée sur l'éventuel point-selle.

L'ensemble des deux opérations se fait très rapidement.

. Suppression des zones de 1 pixel

Afin de limiter le nombre de zones, et de ne tenir compte que des zones de taille raisonnable, nous avons décidé de supprimer les zones ne s'étendant que sur 1 pixel. Il a pour fonction de mettre à 1 (contour) les pixels isolés. Suivi d'un amincissement 8 directions, cette convolution a pour effet de supprimer les zones de surface inférieures ou égale à 1.

. Ebarbulage

La majorité des segments étant à présent reconnectés, nous effectuons un ébarbulage réitéré jusqu'à idempotence afin de supprimer les segments de faible longueur.

. Suppression des pixels isolés

Pour nettoyer l'imagette des pixels déconnectés d'un élément de réseau nous avons balayé l'imagette à l'aide d'une fenêtre 3*3. Lorsque l'on rencontre la configuration correspondant à un pixel déconnecté d'un segment, le pixel central prend la valeur 0 (intérieur de zone).

2) EVALUATION DE L'EXTRACTION AUTOMATIQUE DE LA VOIRIE PAR COMPARAISON AVEC UNE CARTOGRAPHIE 1/2000

Parvenu à cette étape de notre travail, il nous a semblé indispensable d'évaluer la fiabilité du traitement d'extraction de voirie présenté plus haut. La méthode la plus appropriée consisterait à comparer les éléments de réseau obtenus automatiquement à partir de l'image SPOT (Pa+XS) avec le réseau tel qu'il existe réellement. Compte tenu d'impératifs de temps, une telle opération n'est pas envisageable sur la totalité de la ville; néanmoins, il est concevable de sélectionner une petite zone incluant la plupart des configurations (en terme d'association des différents éléments urbains d'une part et de réseau de voirie d'autre part). C'est dans cet objectif, que nous avons réalisé une numérisation de la voirie Quiténienne, afin de pouvoir superposer sous forme numérique l'image du réseau de voirie issue de cartographie à grande échelle avec l'image de l'extraction. Une telle superposition n'est en effet réalisable que sous cette forme compte tenu de la déformation de l'image SPOT par rapport à la cartographie existante, et donc de la nécessité de corriger géométriquement cette image.

2.1) Les documents cartographiques de base

Une cartographie à l'échelle 1/1 000 de la ville de Quito a été achevée par l'IGM*1 en 1984 sur la base d'une couverture photographique aérienne. Un assemblage à l'échelle 1/2 000 de 16 de ces cartes (soit approximativement une aire de 2,5 Km sur 2,5 Km) a été choisi. La **Figure 1** montre l'assemblage au 1/2 000 de 4 cartes 1/1 000 prêt pour la saisie.

Afin de constituer une base de données utilisée par ailleurs, il a été décidé de saisir non pas la voirie, mais son complémentaire : les zones de recensement INEC*2. La préparation de ces cartes en vue de leur numérisation s'est avérée plus longue que prévue initialement; en effet, nos documents (réduit au 1/2 000) se sont révélés à l'examen être de qualité graphique moyenne. Les difficultés auxquelles nous avons été confrontés sont de différents ordres :

- la définition de la limite externe des zones INEC à prendre en compte; nous avons décidé, après examen des cartes, de retenir comme limite, le trait le plus extérieur à la zone. Cela revient donc à inclure, lorsqu'il existe, le trottoir à l'intérieur de la zone. Néanmoins, même si ces contours se sont révélés être mieux fermés que ceux délimitant la zone stricto sensu, nombre d'entre eux ne bouclent pas. En particulier la délimitation des voies sans issue est généralement intermittente. La plupart des zones situées en périphérie ne comportant pas de trottoir, nous avons alors opté pour la limite "interne" de la zone.
- le report de certaines zones du document INEC initial (l'échelle 1/10 000) inexistantes sur les cartes IGM 1/2000
- l'actualisation du tracé de la voirie; il est possible lorsque des voies apparaissent en trait pointillé de se reporter à l'image panchromatique SPOT pour vérifier que le projet a bien été exécuté.
- la densité des traits (trottoir, limite interne de zone, murs, clôture, limite de bâtiments, réseaux divers, courbes de niveau) rend parfois problématique le suivi de la limite de la zone. De plus, la non continuité de ces traits ne favorise pas la cohérence de la délimitation. Il est parfois obligatoire de suivre un réseau de canalisation pour fermer une zone...

Néanmoins, la préparation des cartes en vue de la saisie s'est déroulée sans problème majeur. La délimitation de la voirie peut être considérée comme fiable si l'on excepte la voirie interne de l'îlot à la cartographie incertaine.

*1 Instituto Geografico Militar

*2 Instituta Nacional de Planificacion y Coordinacion Economica

2.2) Saisie et assemblage des 4 feuilles - Génération d'une image pixel

L'assemblage des 4 feuilles s'effectue par le recalage en coordonnées géographiques (longitude, latitude) alors que la saisie s'opère dans la projection d'origine (UTM). Ce recalage est rendu possible par la prise sur chaque feuille de 2 points de référence : le calcul de la projection inverse (UTM \rightarrow géographique) permet un recalage de chaque feuille.

Une base de données, ne comportant pour le moment que l'information graphique de définition des entités (zones au sens de l'INEC), a ensuite été créée.

L'étape suivante a consisté à générer une image comprenant la totalité de la saisie. Nous avons opté pour une résolution spatiale de pixel de 2,50 m, taille cohérente à la fois avec l'échelle des cartes saisies mais aussi compatible avec le degré de zoom raisonnable sur image satellite. L'image ainsi obtenue est de dimension 1150*1150 pixels (voir Figure 2).

2.3) Recalage des deux images

Une rapide confrontation des 2 images (satellite et cartes numérisées) nous a convaincu de la nécessité de recalibrer l'image satellite en fonction de la carte numérisée. La méthode choisie est classique, elle consiste à déformer l'image originale en fonction d'un polynôme de déformation. Les coefficients de ce polynôme (de degré 1, 3 ou 5) sont calculés à partir des coordonnées des amers dans chacune des deux images. La méthode dite du "plus proche voisin" a été choisie préférentiellement aux méthodes de rééchantillonnage "bi-linéaire" ou "bi-cubique" qui effectuent un lissage de l'image, la valeur de chaque pixel créé tenant compte de 4 ou 16 voisins. Ce lissage a paru préjudiciable pour la suite compte tenu de l'utilisation d'opérateurs de morphologie mathématique en teinte de gris basée sur l'écart des niveaux de gris (extraction des vallées).

Le polynôme de degré 1 qui effectue uniquement une rotation-translation de l'image sur la base de 3 amers n'a pas été suffisant pour recalibrer correctement l'image satellite sur la carte.

La déformation suivant un polynôme de degré 5 nécessite la prise d'un grand nombre d'amers, en particulier sur les bords de l'image sinon la déformation enregistrée ne correspond plus à rien. Dans notre cas, la partie Nord-Est de l'image, essentiellement rurale, ainsi que le côté Sud-Est, Comité Del Pueblo, ne permettent pas le relevé d'amers de façon suffisamment fiable : pour la première compte tenu de l'absence de voirie bien déterminée et pour la seconde en raison du type de bâti très dense sans voirie marquée. Une déformation basée sur un polynôme de degré 3 a donc été retenue après plusieurs essais.

La résolution du polynôme de type $aY^3 + bX^3 + cX^2Y + dXY^2 + eY^2 + fX^2 + gXY + hX + iY + j$ nécessite la connaissance de 11 amers seulement. Cependant, ce nombre est trop faible pour obtenir un recalage optimum. Une trentaine d'amers distribués sur la totalité de l'image ont donc été repérés. Les coefficients du polynôme ont été déterminés à partir de ces 30 amers de façon à répartir **uniformément** l'erreur. La variance calculée entre les coordonnées des amers **théoriques** et les coordonnées **calculées** est de 2,58 "pixels de 10 mètres", d'où une évaluation de la précision globale à 16 mètres.

La Figure 3, en affectant la couleur bleue à l'image de la carte numérisée et la nuance grise à l'image SPOT panchromatique illustre la qualité ainsi que la non uniformité du recalage. En première approche, on peut dire que le gris le plus clair représente l'espace bâti alors que le plus sombre indique la présence de voirie bitumée ou de végétation. Bien que cela n'apparaisse pas de façon très claire sur cette figure, on note un bon recalage en ce qui concerne la partie gauche de l'image (la plus urbanisée et la plus plate) au contraire de la partie située à droite. Cela est imputable en partie au relief plus accidenté ainsi qu'à la difficulté de repérer correctement les amers. L'angle important d'enregistrement de l'image satellite (22°R) ne peut qu'accentuer la difficulté de recalage inhérent au relief important.

2.4) Evaluation de la méthode d'extraction automatique de la voirie basée sur les algorithmes de morphologie mathématique

Après avoir recalibré les deux images comme indiqué dans le paragraphe précédent nous avons appliqué à l'image satellite la chaîne de traitement décrite plus haut. La Figure 4 (gris : panchromatique et vert : extraction de la voirie) illustre le principe d'extraction de vallée sous-jacent à l'extraction de la voirie. Il montre clairement que ce principe est inapproprié dans la partie haut-gauche de l'image où la voirie apparaît comme plus claire que le fond plus foncé constitué de végétation. Il faudrait dans ce cas précis concevoir une extraction des crêtes. Cette opération judicieuse dans ce cas précis sélectionne au contraire en milieu

urbanisé les espaces construits de faible épaisseur spatiale, ce qui apparaît bien comme contradictoire avec notre objectif.

L'image résultant de tous ces traitements simples n'est pas vraiment satisfaisante dans un strict objectif d'extraction de la voirie.

La **Figure 5** est une combinaison colorée trois couleurs :

- bleu : réseau de voirie numérisé
- vert : extraction automatique de la voirie
- gris : panchromatique SPOT

elle suscite deux affirmations.

D'une part, tous les éléments de voirie ne sont pas extraits, d'autre part des pixels qui ne sont pas de éléments de voirie ont été pris en compte.

Certaines rues, et en particulier celles de moindre importance peuvent être revêtues d'un matériau autre que le bitume. C'est le cas à Quito où la voirie des quartiers sub-urbains est constituée de terre de couleur claire. Le traitement "chapeau haut de forme" tel qu'il a été ici décrit n'est bien sûr pas approprié pour les extraire. De même, nous avons vu que cette opération ne fait apparaître que la voirie bordée de part et d'autre par des bâtiments ou des éléments réfléchissants. Une rue bordant une forêt (élément peu réfléchissant dans la bande panchromatique) ne sera donc pas extraite par l'opération "chapeau haut de forme". La même difficulté est rencontrée lorsqu'il s'agit d'une voie double séparée par un terre plein central. La végétation qui souvent recouvre ce terre plein occulte partiellement l'effet "vallée" indispensable à l'extraction du réseau. Ces difficultés n'ont pour l'instant pas pu être résolues.

En ce qui concerne le second point, il convient de déterminer pourquoi ces pixels ont été identifiés à des éléments de voirie. A première vue, il semblerait que nombre de ces erreurs soient dues à l'ombre de certains bâtiments. D'une part, la réflectance très faible des surfaces à l'ombre s'apparente à celle du bitume qui constitue la nature principale de la voirie et d'autre part, les pixels d'ombre se regroupent par petits amas de faible effectif. Il est donc délicat de les séparer des pixels de voirie. Toutefois, l'ombre ne constitue pas le seul facteur d'erreur; d'autres éléments dont la nature n'est pas déterminée entretiennent la confusion. La superposition d'une partie de l'image SPOT traitée et d'un extrait de carte numérisé indique clairement que le problème à résoudre est lié à une **sur-détection** du réseau de voirie. On notera qu'une **multitude de petits segments** sont représentés à l'intérieur des pâtés de maisons et que ce ne sont pas les réseaux les plus importants qui ressortent les plus fidèlement.

Conclusions et perspectives concernant l'extraction automatique de la voirie

Plus en amont, il est envisagé de préparer l'image initiale en la traitant de manière à faire ressortir de façon plus nette le contraste. Différents filtres ou méthodes seront successivement testés et évalués.

Ces premiers résultats montrent la difficulté d'extraire **numériquement** la voirie en milieu urbain à partir d'une image où **visuellement** celle-ci apparaît de façon relativement distincte. Cependant, une première comparaison (non quantifiée) permet d'affirmer que la méthode visuelle, si elle permet de n'extraire que les éléments de voirie et de constituer ainsi des éléments linéaires continus, ne permet pas de les extraire tous. **Le réseau secondaire extrait visuellement est en effet moins important que celui, extrait par la méthode numérique (de façon discontinue).**

L'algorithme de fermeture des contours a permis la fermeture d'un grand nombre de zones, cependant il ne reconstitue pas le réseau, ce qui n'est d'ailleurs pas son usage initial. Il est nécessaire de rappeler que l'objectif principal vise, en l'absence d'une base de données complète sur Quito, à segmenter l'image satellite de façon à pouvoir définir des zones. Classifier des zones et non des pixels lorsque l'on s'intéresse à une estimation de la densité du bâti permet d'obtenir un document dans lequel l'espace apparaît comme stratifié et non comme une "mosaïque" de couleurs inutilisable pour tirer un échantillon d'enquête.

Une matrice de confusion est en cours de calcul afin de quantifier la fiabilité de l'extraction.

3) CLASSIFICATION DES ZONES. EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU BATI

L'extraction de voirie précédemment décrite n'a que pour objet de délimiter des zones sans faire appel à un critère proprement radiométrique qui aurait permis de segmenter

automatiquement l'image. En effet, notre but est de classer l'image en fonction d'une densité d'espace bâti mesurée sur échantillon. Les entités à classer sont les zones ainsi délimitées. Les pixels 4-connexes compris à l'intérieur d'un ensemble de réseaux de voirie ont été étiquetés (recodés suivant la même valeur). Nous avons ainsi identifié 9.785 zones à l'intérieur de notre première fenêtre d'étude.

Plusieurs type de classifications ont été testés :

- seuillage du néo-canal obtenu en appliquant les coefficients de régression polynomiale,
- classification de type barycentrique à partir de néo-canaux discriminants.

L'échantillon de travail des 173 îlots a été scindé en deux en respectant la proportionnalité de chacune des 6 modalités de densité du bâti

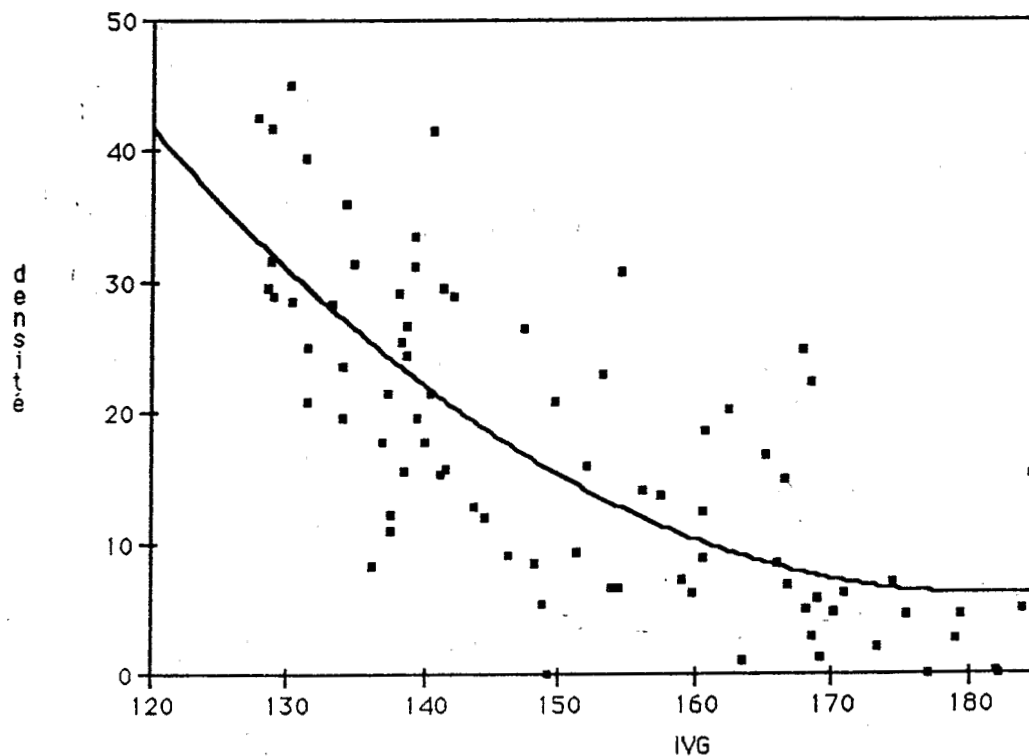
- un sous-échantillon d'initialisation (87 îlots),
- un sous-échantillon de vérification (86 îlots)

Les deux classifications ont donc été initialisées puis validées sur les mêmes sous-échantillons

3.1) Régression polynomiale

A l'instar des classifications effectuées sur l'image Thematic Mapper de Marseille, nous avons cherché quel est le canal, néo-canal ou indice le plus corrélé avec la densité du bâti estimé sur notre échantillon d'initialisation. De même que sur l'image Thematic Mapper de Marseille, l'indice de végétation verte (noté IVV) s'est avéré comme le plus pertinent pour évaluer la densité du bâti. Pour un seuil de signification à 99 % nous obtenons les résultats suivants :

CANAUX	CORRELATION	ECART-TYPE résiduel	S.C.E résiduelle	F FISHER
IVG	-0.751	7.8	4928	52.39
$BATI = 0.01 \cdot IVV^2 - 3.47 \cdot IVV + 320$				



Ces coefficients ont été appliqués à chaque moyenne (une par zone) calculée à partir de l'indice de végétation. Nous avons donc obtenu une valeur (une "densité du bâti") pour chacune des zones de notre image. En fonction des seuils calculés à partir des manzanas de l'échantillon pour chacune des 6 modalités de densité du bâti, nous avons affecté chaque zone à une des 6 classes. La classe "voirie" est codée 0. La Figure 6 représente la

classification obtenue sur l'ensemble de notre image de départ.

. Validation

Avant de valider cette classification, nous avons opéré un lissage majoritaire conditionnel (pour les pixels contour uniquement). Les pixels délimitant la voirie n'offrant plus aucun intérêt de notre point de vue, la valeur majoritaire à l'intérieur d'une fenêtre 3*3 leur a été affectée. La Figure 7 est le résultat d'un tel lissage. Les valeurs qui suivent représentent la fréquence croisée (en pourcentage) des îlots de l'échantillon de validation référencés dans la modalité "Référence" et classées dans la modalité "Classe".

Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe). Les valeurs sont exprimées en pourcentage

Confusion	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Référence 1	2 %	0	0	0	0	0
Référence 2	14	18 %	2	2	0	0
Référence 3	1	6	6 %	12	4	0
Référence 4	0	1	4	5 %	4	0
Référence 5	0	2	1	4	7 %	2
Référence 6	0	0	0	0	2	0 %

Deux principales confusions apparaissent, d'une part entre la classe non bâti (1) et la référence très faible (2), d'autre part entre la classe moyenne (4) et la référence faible (3). La fiabilité de cette classification est donc

38 % en 6 classes

72 % en 3 classes obtenues en regroupant les classes 1 et 2, 3 et 4, et 5 et 6.

3.2) Analyse discriminante

Nous avons soumis notre échantillon de 87 îlots décrit par 7 variables à une analyse discriminante afin de déterminer les coefficients à appliquer pour obtenir la combinaison de néo-canaux la plus discriminante pour l'évaluation de la densité du bâti.

Alors que la méthode précédente prend en compte le pourcentage de surface bâti par îlot, valeur peu précise du fait de l'imprécision de la surface totale de l'îlot, l'analyse discriminante cherche à séparer des classes de densité du bâti pré-définies. L'appréciation de la densité du bâti (affectation d'une modalité à chaque îlot de l'échantillon) a été faite par plusieurs observateurs à partir des photographies prises lors de l'enquête sur le terrain ainsi que par les enquêteurs. La distinction opérée entre les modalités s'avère donc paradoxalement plus fine que le résultat du seuillage du coefficient de densité du bâti calculé précédemment. Cependant, à l'intérieur de l'échantillon des 87 îlots une grande disparité règne entre les effectifs des différentes modalités. Il a donc été nécessaire de regrouper certaines modalités afin de ne pas traiter de phénomènes marginaux. La modalité non bâti (6 individus) a été regroupée avec la modalité très faible et la modalité très forte (5 individus) avec la modalité forte. Il demeure ainsi 4 modalités, ce qui d'après les travaux de O.BARBARY sur Marseille*1 paraît suffisant dans une optique de stratification à objectif démographique. Les 7 variables explicatives retenues pour la discrimination sont les moyennes par îlot de 7 canaux et néo-canaux : XS1, XS2, XS3, panchromatique, indice de végétation verte (IVV), indice de brillance (IBR) et l'écart-type local 5*5 calculé sur le canal panchromatique (ECT).

Inertie des axes discriminants

Axes	Valeurs propres	Inertie cumulée
1	0,5643	84,1
2	0,0801	96,0

Les 2 premiers axes expliquent 96 % de la variance totale, il n'est donc pas nécessaire de

*1 Voir bibliographie équipe ORSTOM

retenir le suivant. Nous noterons que le premier axe seul rend compte plus de 84 % de l'inertie du nuage.

Coefficients des variables centrées réduites dans l'équation linéaire des axes discriminants

Variables	Axe 1	Axe 2
XS1	22,40	0,10
XS2	2,45	6,43
XS3	25,18	5,51
Pan	-0,32	-0,18
IVV	1,74	1,45
IBR	-28,87	-6,78
ECT	-0,02	0,97

A la lecture de ce tableau, il apparaît que 3 canaux joue un rôle prépondérant pour discriminer la densité du bâti, le canal vert (XS1), le canal infra-rouge proche (XS3) et l'indice de brillance (XS2+XS3). On notera l'apport *quasi* nul du néo-canal "texture" (écart-type local sur le panchromatique calculé dans une fenêtre 5*5).

Il est intéressant de calculer la distance entre les 4 groupes afin de vérifier la bonne séparation des classes. La distance calculée est celle de *Mahalanobis*.

Matrice des distances entre centres de gravité des classes

Distance	classel	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Classe 1	0,00			
Classe 2	1,33	0,00		
Classe 3	1,67	0,88	0,00	
Classe 4	1,81	0,94	0,60	0,00

Les classes 3 et 4 sont les classes les plus proches, cela n'est pas sans implications comme nous pouvons déjà le constater dans la matrice de confusion calculée entre modalités pré-établies (notées Référence) et classes issues de l'analyse discriminante (notées Classe)

Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe). Les valeurs sont exprimées en pourcentage

Confusion	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Référence 1	30 %	5	1	1
Référence 2	9	16 %	2	2
Référence 3	0	3	7 %	5
Référence 4	0	4	3	10 %

Cette matrice nous indique en premier lieu que la classification effectuée par l'analyse discriminante surestime la densité évaluée sur le terrain et calculée sur plan. Nous obtenons un pourcentage des îlots de l'échantillon bien classés de **63%**. Ces résultats sont encourageants; l'étape suivante consiste donc à générer les 2 néo-canaux discriminants puis à affecter chacune des zones de l'image à l'une des 4 classes par agrégation autour du centre de la classe la plus proche (distance euclidienne).

La classification retenue est de type barycentrique. Nous avons donc classé les zones en fonction de leur moyenne radiométrique dans les 2 néo-canaux les plus discriminants pour évaluer la densité du bâti. Cette classification a été initialisée sur 4 classes (du non bâti au très dense) à partir des 87 îlots de l'échantillon d'initialisation.

. Validation

Le même filtrage majoritaire conditionnel que décrit précédemment a été appliqué à l'image des zones classées préalablement à l'évaluation de la fiabilité de la classification. Le résultat obtenu est illustré par la **Figure 8**.

Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe). Les valeurs sont exprimées en pourcentage

Confusion	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Référence 1	29 %	7	3	0
Référence 2	4	10 %	12	4
Référence 3	0	2	8 %	4
Référence 4	1	2	5	10 %

Le pourcentage d'îlots bien classés est donc : 57 % pour une classification en 4 postes, 71 % pour une classification en 3 postes (les classe 2 et 3 sont agglomérées)

La confusion la plus importante se situe entre la classe 3 et la référence 2. On notera la différence entre le pourcentage de zones bien classées issu de l'analyse discriminante (63%) et celui calculé à partir de l'échantillon de vérification (57%). Cela démontre l'importance de vérifier la classification sur un échantillon autre que celui qui a servi à l'initialiser.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Compte tenu des résultats obtenus, l'extraction automatique de la voirie ne doit être considéré que comme un **résultat intermédiaire** indispensable pour segmenter l'image en zones dans lesquelles il est alors possible de calculer une densité. La multiplicité, et donc la complexité résultante, des associations des divers matériaux constituant l'espace urbain incite à la prudence quant aux possibilités d'une amélioration sensible de la chaîne d'extraction. Une approche fondée sur la segmentation en zones homogènes telle que l'ont expérimentée NAGAO M. et Al reste envisageable, puisque la finalité est bien de segmenter l'image et non pas d'extraire le réseau de voirie intrinsèquement.

En terme de fiabilité, les résultats des classifications sont comparables à ceux enregistrés lors de l'expérimentation marseillaise avec une image **Thematic Mapper**; on remarquera que les confusions les plus importantes ont lieu entre des classes proches. Cela n'est pas vraiment étonnant : notre méthode consiste à effectuer un lissage **raisonné** par la moyenne à l'intérieur de zones, on perd alors la finesse spatiale de l'imagerie SPOT. Par contre, si l'on veut obtenir une typologie de l'espace urbain en se basant comme cela a été fait à Marseille sur une étude précise des distributions statistiques à l'intérieur des zones, on est en droit d'attendre des résultats à la fois une typologie différente et une meilleure discrimination des types de bâti. Lorsque l'on compare visuellement les deux classifications, on ne note pas de différences sensibles. La meilleure sera finalement celle qui permettra de diminuer le plus la variance des estimateurs démographiques puisque l'objectif de ces classifications réside dans la stratification de l'espace propre à optimiser un plan de sondage à finalité démographique.

Le logiciel **PLANETES**, de l'Unité de Télédétection de l'ORSTOM, développé par M. RAKOTO-RAVALONTSALAMA a été utilisé pour tous les traitements d'image satellite.

Le logiciel **SAVANE**, développé par M. SOURIS à l'Unité d'Infographie de L'ORSTOM, gère la base de données localisées de Quito.

Les illustrations ont été tirées par I. RANNOU de l'Unité de Traitement Photographique de l'ORSTOM.

Bibliographie succincte

BASSEVILLE M., 1979 - Détection de contours: méthodes et études comparatives, Annales des télécommunication, Tome 34, n°11,12, pp 559-579.

COSTER M., CHERMANT J.L., 1985 - Précis d'analyse d'image, pp 335-380, éd CNRS.

DESTIVAL I., 1987 - Recherche automatique des réseaux linéaires sur les images SPOT, Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, Bulletin n° 108.

JEANSOULIN R., 1982 - Reconnaissance automatique du parcellaire, Compte rendu du colloque Le système SPOT d'observation de la terre, pp 259-274, éd G Rochon, A Chabreuil.

MILGRAM M., COQUEREZ J.P., 1986 - Fermeture des contours par un opérateur local, traitement du signal, Vol 3, N° 6, pp 302-311.

NAGAO M., MATSUYAMA T., 1980 - A structure analysis of complexe aerial photograhs, 199 P, Plenum Press, New-York and London.

SALMERON E., 1986 - Mise en coïncidence automatique des contours extraits d'images aériennes et d'éléments cartographiques, Thèse de 3^{ème} cycle, Université Technologique de Compiègnes, 175 pp.

SERENDERO M.A., BERTHOD M., 1987 - Extraction des réseaux fins par un suivi directionnel de lignes de crêtes et de vallées, Colloque SPOT 1, 23-27 Novembre 1987, 8pp.

SERRA J., 1986 - Image analysis and mathematical morphologie, Academic Press.

Publications et notes de travail de l'équipe ORSTOM

(peuvent être consultés au Département S.D Û de l'ORSTOM)

Articles

DUREAU F. et GUILLAUME A., 1984. - La démographie depuis l'espace : un nouveau système d'observation?. Paris, STATECO n° 38, pp. 5-46.

DUREAU F., 1986. - A propos du traitement informatique de données localisées. Une expérience en cours : télédétection et observation des populations urbaines. Paris, ORSTOM, collection Colloques et séminaires, Numéro sur le traitement des données localisées, pp.263-286.

DUREAU F. et BARBARY O., 1987. - Pour une méthode de collecte démographique en ville intégrant la télédétection spatiale. A paraître dans la collection Informatique et sciences humaines, EHESS, 42p.

MICHEL A., DUREAU F., LORTIC B., SOURIS M., 1987. - Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution et évaluation des informations fournies par ces images. 1 : Etude statistique du descripteur "densité du bâti". Présentation des classifications 2. Mise en évidence des réseaux routiers sur une image SPOT panchromatique. Etude de faisabilité sur QUITO (Equateur). Paris, Service Technique de l'Urbanisme, Bilan sur la télédétection urbaine en France, Octobre 1987.

SOURIS M., 1986. - Systèmes d'information géographiques et bases de données. Paris, ORSTOM, collection Colloques et séminaires, Numéro sur le traitement des données localisées, pp. 29-87.

Communications à des colloques

DUREAU F. et GUILLAUME A., 1985. - La population dans l'espace. Télédétection et observation démographique des villes des pays en développement. Communication au XXe congrès général de l'Union Internationale pour l'étude scientifique de la population, Florence (Italie), 5-12 Juin 1985.

DUREAU F., LORTIC B., MICHEL A., SOURIS M., 1987. - Télédétection et système d'information géographique. Communication au Forum International de l'Instrumentation et de l'Information géographiques, Lyon (France), 10-13 Juin 1987, 15 p.

DUREAU F., LORTIC B., MICHEL A., SOURIS M., 1987. - Informatique, télédétection et observation des populations urbaines. Une recherche en cours à QUITO (EQUATEUR). Communication à la Primera Conferencia Latinoamericana sobre informatica en geografia, San José, Costa Rica, 5-9 Octobre 1987.

MICHEL A., EBERHARD J.M., LORTIC B., DUREAU F., 1987. - El uso de la teledeteccion para la observacion de las poblaciones urbanas. Investigacion en curso en QUITO (ECUADOR). Communication au II Simpósio Latinoamericano sobre sensores remotos, Columbia, Bogota, 16-20 Novembre 1987, 34 p.

MICHEL A., EBERHARD J.M., LORTIC B., DUREAU F., 1987. - L'utilisation de la télédétection pour l'observation des populations urbaines. Une recherche en cours à QUITO, (EQUATEUR). Communication au colloque SPOT, Paris, 23-27 Novembre 1987, 9p.

SOURIS M., 1987. - A geografic information system with relational architecture : principles and exemple of use of the TIGER system. Communication à la Primera Conferencia Latinoamericana sobre informatica en geografia, San José, Costa Rica, 5-9 Octobre 1987.

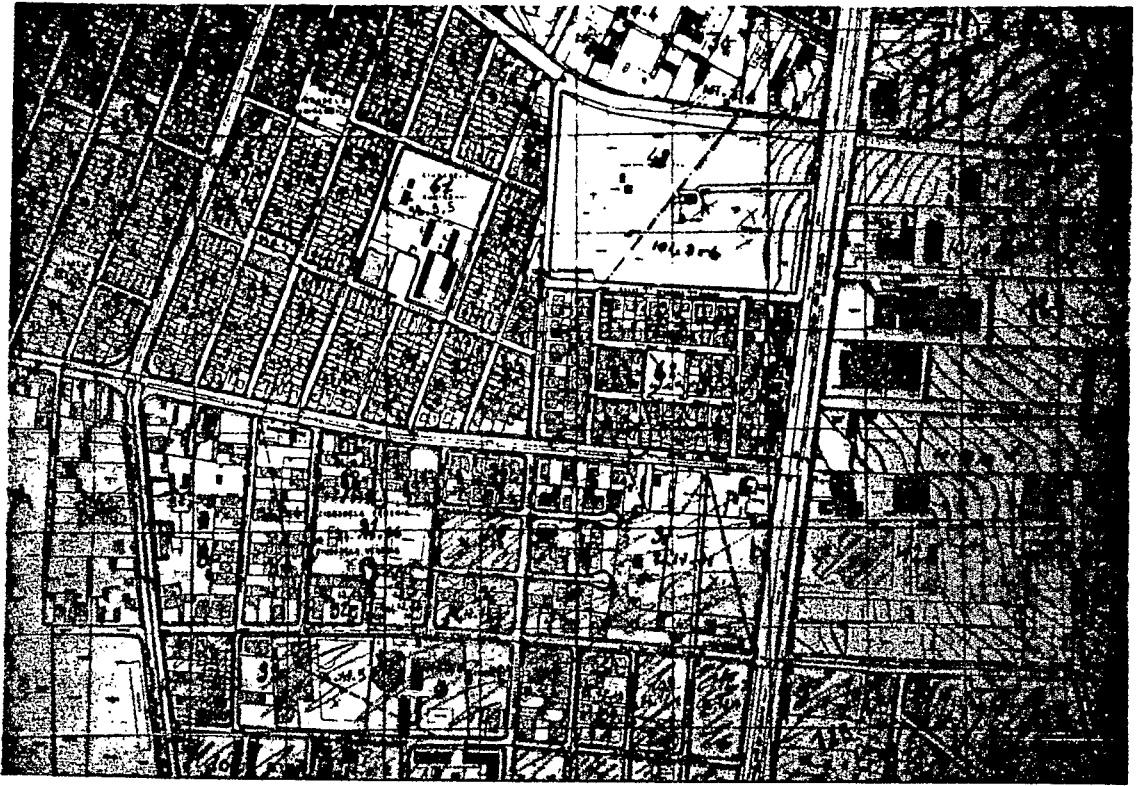


Figure 1: Assemblage de cartes au 1/2 000



Figure 2 : Image générée à partir des 4 cartes



Figure 3 : Composition colorée

Bleu : image de la carte numérisée
Vert : image panchromatique SPOT

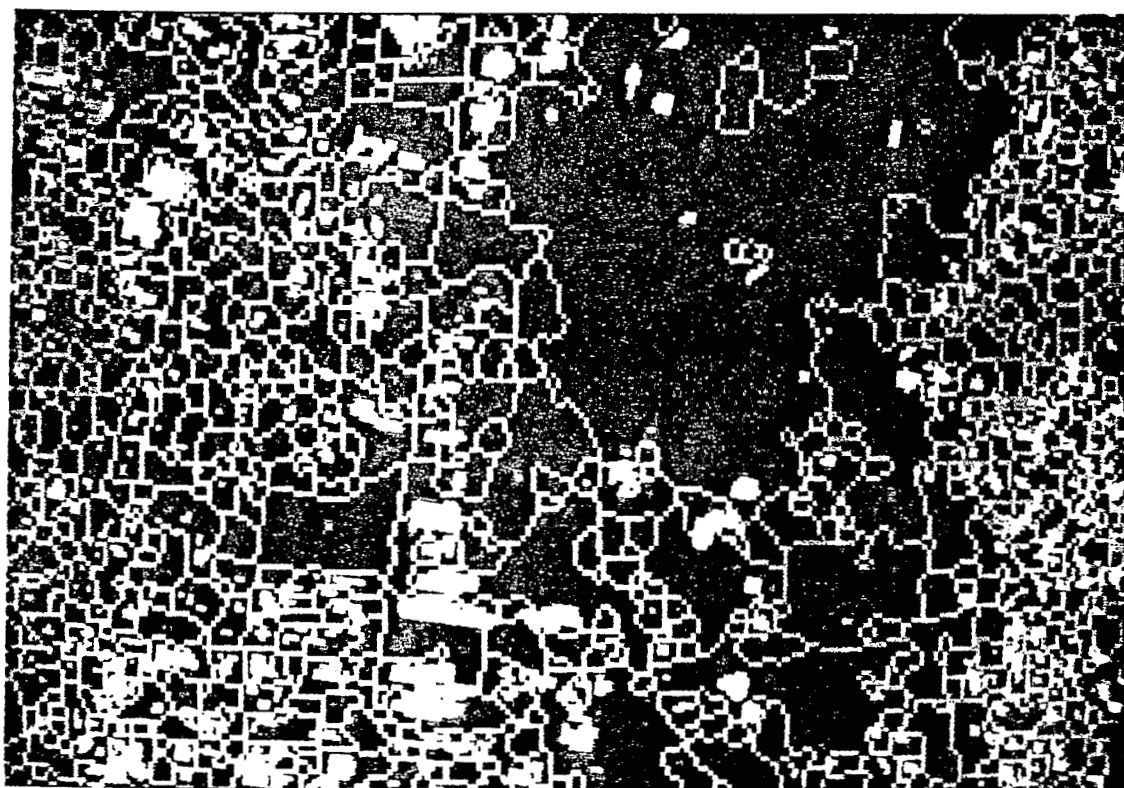


Figure 4 : Composition colorée

Vert : extraction automatique de la voirie
Gris : image panchromatique SPOT

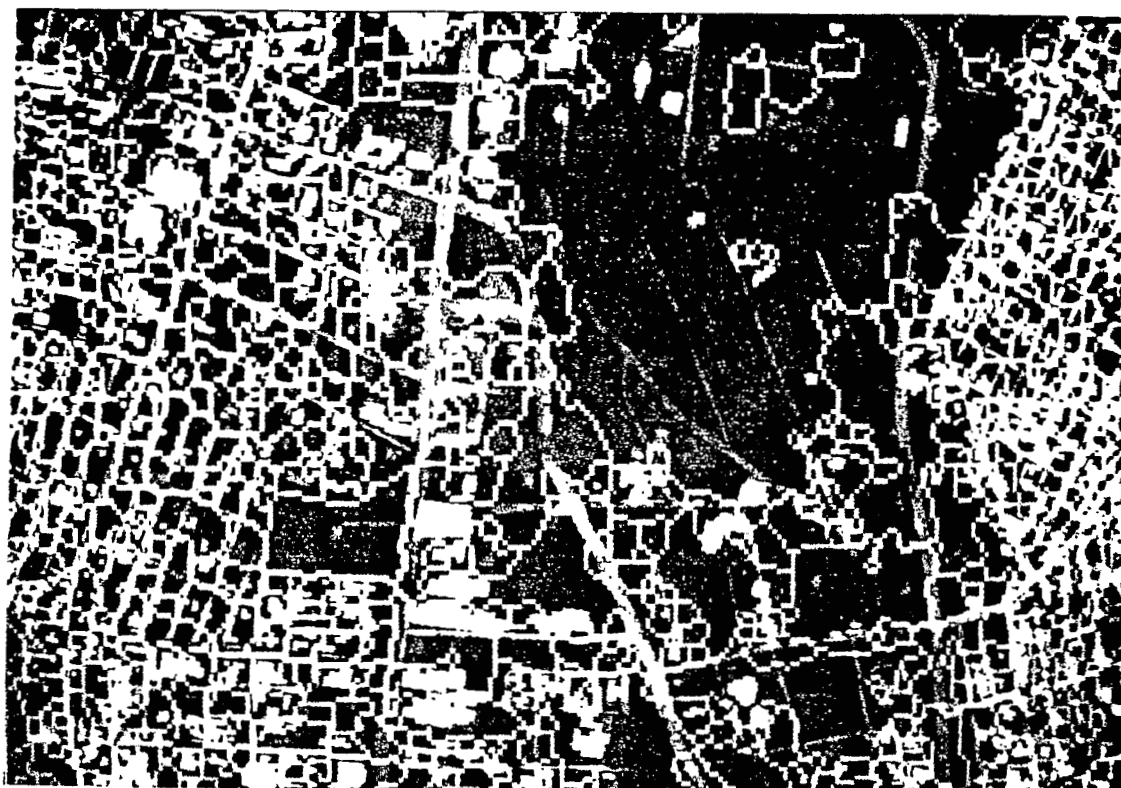


Figure 5

Bleu : réseau numérisé
 Vert : extraction de la voirie
 Gris : panchromatique SPOT

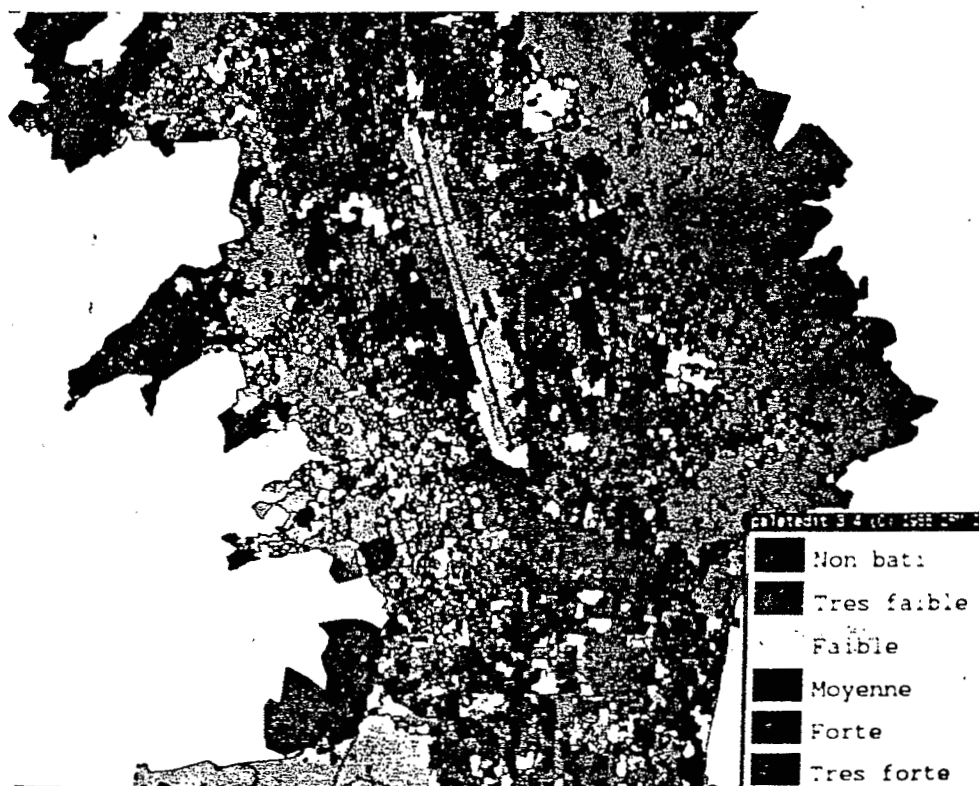
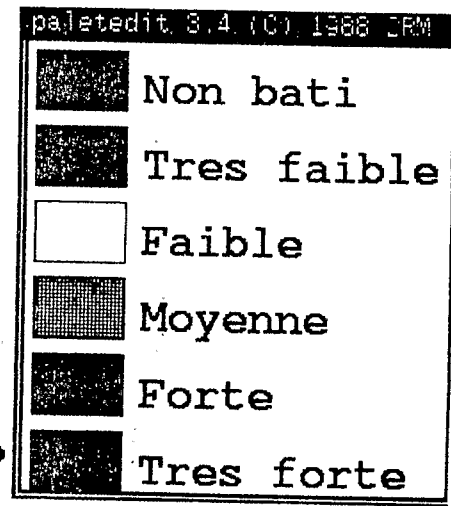


Figure 6 : Classification des zones en fonction de la densité de l'espace bâti



Figure 7 : Densité du bâti
régression polynômiale
de l'indice de végétation



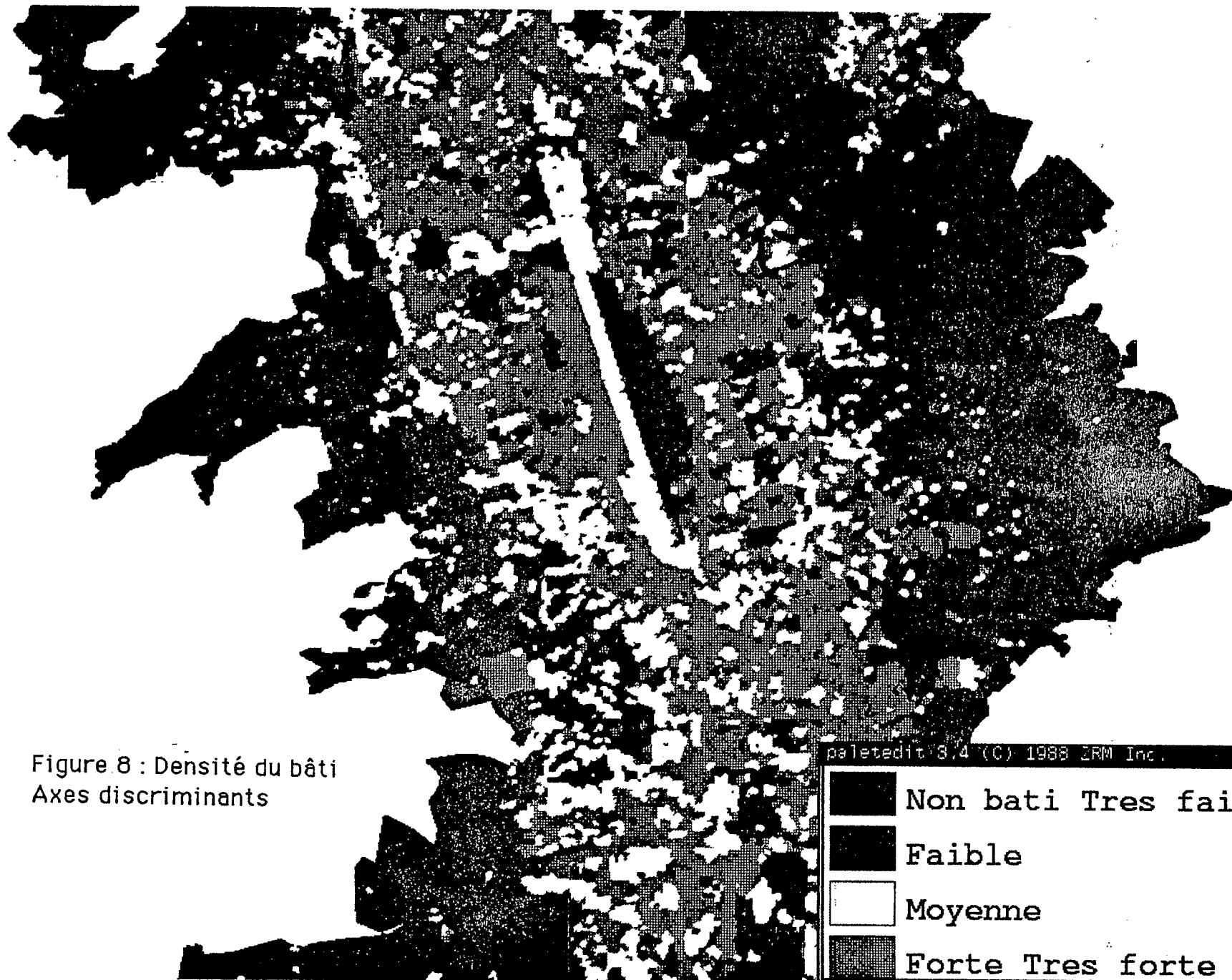


Figure 8 : Densité du bâti
Axes discriminants

paletedit 3.4 (C) 1988 ERM Inc.

Dark gray/black	Non bati Tres faible
Medium gray	Faible
White	Moyenne
Dense grid pattern	Forte Tres forte