

## STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN QUITENIEN DANS UNE PROBLEMATIQUE DEMOGRAPHIQUE. APPLICATION A QUITO (EQUATEUR)

---

Alain MICHEL, Bernard LORTIC, Françoise DUREAU, Olivier BARBARY

**Avertissement** : dans cette communication, qui reprend de larges extraits des communications présentées aux colloques ISTED et PIXIM 88 (voir bibliographie), nous exposerons plus particulièrement les méthodes et résultats obtenus en matière de télédétection, après avoir re-situé cette étude dans le contexte plus général du programme de recherche.

Les caractéristiques de l'urbanisation dans les pays en développement, les modes particuliers de résidence des habitants et la rareté des éléments de connaissance classiques (cartes, plans cadastraux, fichiers administratifs) rendent les populations des villes de ces pays particulièrement difficiles à observer. Pourtant, les rythmes de croissance démographique très élevés et les modifications rapides du tissu urbain nécessitent des observations répétées. Les méthodes classiques de collecte de données démographiques se révèlent difficiles à mettre en œuvre. Le coût de la collecte et les durées d'exploitation limitent la périodicité des recensements à un rythme d'environ 10 ans, insuffisant pour un suivi des populations citadines ; quant aux enquêtes par sondage, l'absence de base de sondage complète et à jour hypothèque généralement leur réalisation et leur fiabilité.

Face au manque de données démographiques récentes auquel sont confrontées les autorités de ces villes, il paraît nécessaire de développer de nouvelles méthodes adaptées à leur spécificité démographique. A cet effet, la télédétection spatiale, assurant une observation continue et relativement précise (THEMATIC MAPPER et SPOT) de l'occupation du sol, constitue une source de données particulièrement intéressante : comme l'ont montré les travaux réalisés sur photographies aériennes depuis les années cinquante, **on peut utiliser avec profit l'information exhaustive sur la morphologie urbaine pour recueillir rapidement, par sondage, des données relatives aux populations urbaines.**

L'objectif central du programme de recherche que nous menons à l'Orstom depuis 1985 est donc de mettre au point un système d'observation permanent des populations urbaines, en intégrant l'information apportée par les satellites à haute résolution sur la morphologie urbaine. A l'issue de deux années de développement méthodologique mené sur les villes de

Marseille et Quito, nous avons effectué en décembre 1987 une enquête démographique par sondage, sur un échantillon d'ilots tiré de l'image satellite SPOT.

## I. LA METHODE DE SONDAGE PRATIQUEE A QUITO : FONDEMENT ET DEFINITION

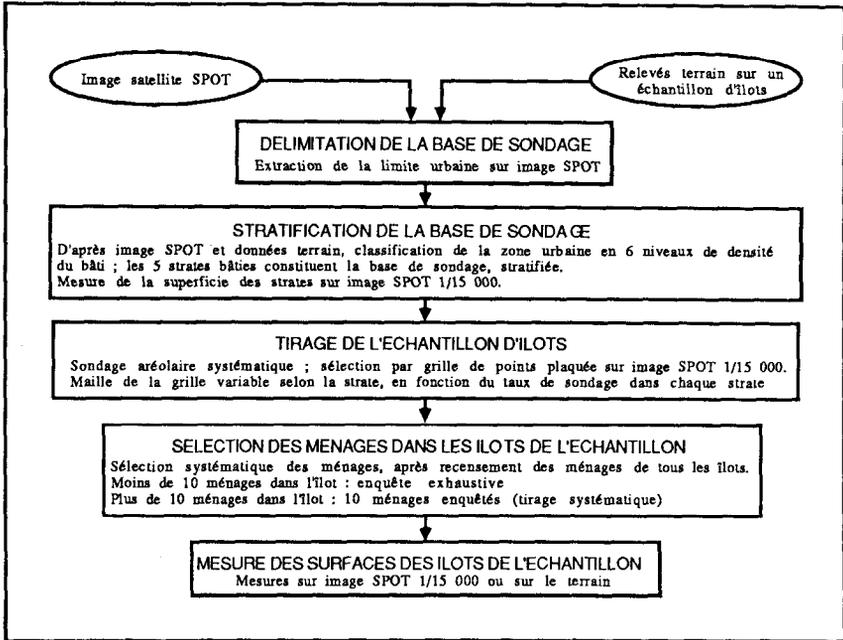
La définition du plan de sondage de l'enquête Démographie-migrations réalisée en décembre 1987 à Quito repose sur deux types de travaux réalisés depuis 1985 :

- l'expérience menée sur la ville de Marseille : cette ville disposant dès 1985 des informations de référence nécessaires à une première phase de développement méthodologique (image satellite Thematic Mapper, photographies aériennes à grande échelle, et recensement de la population exploitable au niveau de l'ilot), nous avons pu, non seulement développer, mais encore tester la validité de méthodes d'interprétation d'image satellite à haute résolution et de sondages spatiaux;
- les recherches effectuées sur le site de Quito : l'exploitation de deux enquêtes préliminaires a permis de préciser et compléter les résultats méthodologiques obtenus sur la ville de Marseille. L'enquête Morphologie urbaine (octobre-décembre 1986) a consisté à relever de manière précise l'occupation du sol de 199 ilots de Quito, afin d'initialiser et tester la fiabilité des traitements des images satellite ; l'exploitation des données démographiques recueillies sur un sous-échantillon de 55 ilots choisis parmi les 199 enquêtés sur le plan morphologique (enquête Bâti/population, avril 1987) est à l'origine de résultats complémentaires à ceux obtenus sur la ville de Marseille, en matière de sondages.

Ces deux phases de la recherche ont donné lieu à un grand nombre de résultats méthodologiques ; rappelons-en trois d'entre eux, fondamentaux, qui soulignent l'intérêt de pratiquer un sondage par grille sur une image satellite classée selon la densité du bâti:

- 1) Parmi les stratifications actuellement réalisables sur image satellite, la plus efficace est une stratification en six niveaux de densité du bâti dont le premier niveau permet d'isoler les espaces non construits, exclus de la base. Pour l'estimation des effectifs, le gain que permet la stratification en cinq niveaux de densité du bâti se situe autour de 50 % du coefficient de variation.
- 2) Le caractère systématique du sondage aréolaire (réalisé à l'aide d'une grille), en assurant une bonne répartition géographique de l'échantillon, améliore la précision des estimations. On évalue ce gain à 20 ou 30 % de la variance du sondage strictement aléatoire au même taux.
- 3) Les tests effectués mettent en évidence l'intérêt de pratiquer un sondage à deux degrés avec comme unités primaires les **pâtés de maisons** et comme unités secondaires les **ménages**.

Les différentes conclusions issues des expériences de Marseille et Quito trouvent leur première application pratique dans la définition de la méthode de sondage retenue pour l'enquête Démographie-migrations de Quito ; la figure ci-dessous résume le plan de sondage adopté, en présentant les différentes étapes correspondant à sa mise en oeuvre.



## II. DELIMITATION DE LA BASE DE SONDRAGE : UNE AIDE A LA DETERMINATION DE LA LIMITE URBAINE

L'objectif est ici de mettre au point une méthode simple **d'aide à la décision** pour définir la limite urbaine, à partir d'une **analyse numérique** de l'image SPOT.

### Choix des néo-canaux.

La lecture de la littérature ainsi que l'analyse visuelle des différents canaux et néo-canaux de SPOT conduite lors de la délimitation visuelle nous a incités à choisir l'indice de végétation et l'écart-type local calculé sur le canal panchromatique à l'intérieur d'une fenêtre 5\*5. La prise en compte simultanée de ces 2 facteurs permet de discriminer la zone urbaine caractérisée par une **activité chlorophyllienne détectable par satellite quasi-nulle** (sauf espaces verts, parcs et stades) et une **hétérogénéité locale forte** (peu de plages homogènes).

*Choix des seuils.*

L'établissement des seuils dans chaque néo-canal a été effectué visuellement l'un après l'autre, en prenant comme **principal critère la compacité** des zones ainsi obtenues. La délimitation visuelle n'a évidemment pas été consultée pendant cette phase de spécification. Nous avons ainsi défini 4 classes dans l'espace des 2 néo-canaux.

Indice de végétation		
	de 0 à 176	de 177 à 255
de 0 à 3 <b>Ecart-type local</b> de 4 à 255	minéral homogène	végétal homogène
	minéral hétérogène	végétal hétérogène

La limite urbaine est donc théoriquement confondue, ou du moins incluse, dans la classe minéral hétérogène. Nous avons ensuite lissé l'image résultante par convolution majoritaire dans une fenêtre 5\*5 pixels, afin de supprimer les zones de faible taille et de ne conserver que les grandes frontières entre classes .

**Résultats - Validation du traitement par comparaison avec la limite observée visuellement et vérifiée sur photographies aériennes.**

La limite de la classe minéral hétérogène est dans toute la partie Nord, très proche de la délimitation déterminée visuellement. Lorsque l'on érige des règles de délimitation plus complexes s'éloignant de la réalité physique et intégrant l'urbanisation future ou la répartition de la densité, des écarts importants comme ceux rencontrés dans le Sud peuvent apparaître. Cependant, **ce traitement simple permet de définir aisément une limite urbaine pertinente sur des critères physiques constants**, alors que le principal écueil d'une délimitation totalement visuelle sur tirages photographiques consiste à dériver progressivement des règles initialement fixées, en particulier lorsque plusieurs documents différents sont utilisés.

Ce traitement a donné des résultats positifs à partir d'une image de Quito. Si la méthode paraît facilement transportable, il demeure cependant que la fiabilité d'un tel traitement est très dépendante de l'environnement immédiat de la ville étudiée. Dans notre cas, l'environnement est favorable sur les flancs Est et Ouest (végétation dense arborée ou herbacée), plus délicat à traiter dans le Nord (tissu industriel peu dense et agriculture) et pose des difficultés inhérentes aux règles de décision fixées dans le Sud (urbanisation discontinue et éparse).

### III. SEGMENTATION DE L'IMAGE SPOT : EXTRACTION DU RESEAU DE VOIRIE

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<sup>1</sup>. 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 ce chapitre est 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.

La **morphologie mathématique**, en teinte de gris sur image en trame carrée, d'un développement 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.

*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**".

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).

---

<sup>1</sup>Voir Bibliographie équipe ORSTOM

### ***Extraction des vallées***

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 à l'aide d'un masque 3\*3 connexité 8. Cette transformation se décompose en 2 opérations de base effectuées l'une après l'autre :
- 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**.
- **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.

### ***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 conserver que la présence des éléments linéaires. Ces éléments de voirie sont codés 1 (élément de contour). L'avantage de ce traitement ( 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°) 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.

### ***Amélioration de l'extraction de la voirie***

#### *Fermeture des contours.*

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.

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.

#### ***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. Suivi d'un amincissement 8 directions, cette convolution à 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'image des pixels déconnectés d'un élément de réseau nous avons balayé l'image 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).

### **Evaluation de la fiabilité de l'extraction automatique de la voirie par comparaison avec une cartographie 1/2 000.**

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 à partir d'une cartographie 1/2 000, 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.

### **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 3 sont calculés à partir des coordonnées des amers dans chacune des deux images. L'angle de visée important du satellite (22° R) allié avec le relief chaotique de la ville génèrent une déformation locale de l'image satellite qu'il n'est pas possible de corriger entièrement à l'aide de ce seul type d'algorithme.

### **Evaluation de la méthode d'extraction automatique de la voirie**

Après avoir recalibré les deux images, nous avons appliqué à l'image satellite la chaîne de traitement décrite plus haut. Une combinaison colorée trois couleurs (bleu : réseau de voirie numérisé; vert : extraction automatique de la voirie; gris : panchromatique SPOT ) montre clairement que ce principe d'extraction de vallée sous-jacent à l'extraction de la voirie est inapproprié dans les parties de l'image où la voirie apparaît comme plus claire que le fond plus foncé constitué de végétation. L'image résultant de tous ces traitements simples n'est pas satisfaisante dans un strict objectif d'extraction de la voirie :

- tous les éléments de voirie ne sont pas extraits
- 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

En ce qui concerne le second point, 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. 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 le plus fidèlement.

Extraction automatique	Référence	Ilot	Réseau
	Ilot	67 %	11 %
	Réseau	17 %	5 %

Matrice de confusion extraction automatique de la voirie / numérisation du réseau

Fiabilité globale : 72 %

La matrice de confusion ci-dessus illustre les résultats d'un croisement entre l'image du réseau générée par numérisation des cartes et l'image résultant de l'extraction automatique de la voirie.

#### IV. STRATIFICATION DE LA BASE DE SONDAGE :

##### CLASSIFICATION DE L'IMAGE SATELLITE SUIVANT LA DENSITE 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.

La classification que nous présentons ici est issue du seuillage d'une régression polynomiale.

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

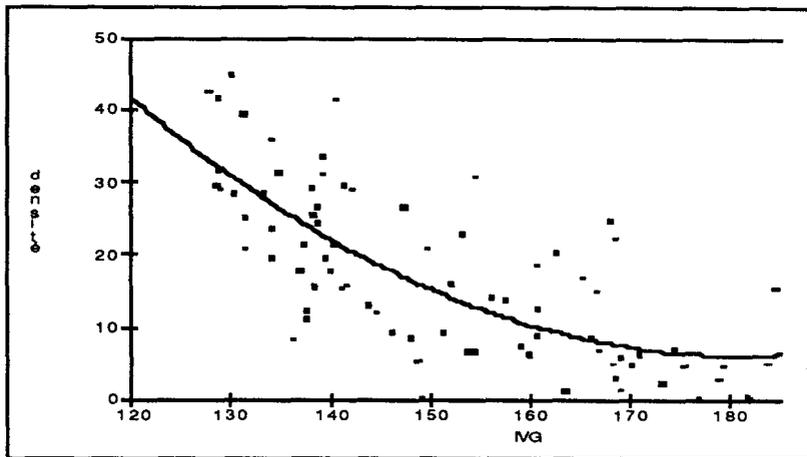
- un sous-échantillon d'initialisation (87 ilots),
- un sous-échantillon de vérification (86 ilots)

##### *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	-.751	7.8	4928	52.39

$$BATI = 0.01*IVV^2 - 3.47*IVV + 320$$



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.

**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. Les valeurs qui suivent représentent la fréquence croisée (en pourcentage) des îlots de l'échantillon de validation référencés dans la modalité "Référence" et classés dans la modalité "Classe".

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 %

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

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.

## CONCLUSIONS

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. Des prétraitements de type filtrage peuvent tout de même être envisagés .

En terme de fiabilité, les résultats des classifications sont comparables à ceux enregistrés lors de l'expérimentation marseillaise avec une image **Thematic Mapper**. Une information concernant l'infra-rouge moyen aurait certainement permis une amélioration sensible des résultats de la classification.

Cependant, l'objectif final est atteint, puisqu'une stratification de l'espace bâti issue de la classification de l'image SPOT amène un gain très sensible quant à la précision des indicateurs démographiques (entre 40 et 50 %).

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.

**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*, Bull. 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 photographs, 199 P, Plenum Press, New-York and London.
- 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.
- BARBARY O., 1988. - Sondages aréolaires pour l'estimation de données démographiques en milieu urbain. Essai de définition d'une méthode de collecte intégrant l'information satellitaire, application aux villes des pays en développement. Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 641 p.

**PRINCIPALES PUBLICATIONS DE L'ÉQUIPE ORSTOM**

- BARBARY O., 1988. - Sondages aréolaires pour l'estimation de données démographiques en milieu urbain. Essai de définition d'une méthode de collecte intégrant l'information satellitaire, application aux villes des pays en développement. Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 641 p.
- 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. 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 (Ital.), Juin 1985.
- 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.
- MICHEL A., DUREAU F., LORTIC B., SOURIS M., 1987. - Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution et évaluation de 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.
- 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.
- DUREAU F., BARBARY O., LORTIC B., MICHEL A., 1988. - Utiliser la télédétection spatiale pour produire rapidement des données démographiques en ville. L'exemple de Quito (EQUATEUR). Communication au colloque Gestion urbaine et développement, ISTEED, Lyon (FRANCE), 20-22 septembre 1988, 6p.
- 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.

- 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.
- MICHEL A., LORTIC B., BARBARY O., DUREAU F., SOURIS M., 1988. - Segmentation et classification d'une image satellite SPOT en milieu urbain. Application à la ville de Quito (Equateur). Communication au colloque PIXIM 88, Paris, 24-28 Octobre 1988, 17 p.
- MICHEL A., 1988. - Stratification de l'espace urbain à partir d'images satellite pour réaliser un sondage à objectif démographique. Mise au point et évaluation des méthodes d'analyse des images SPOT et THEMATIC MAPPER en milieu urbain. Thèse de Doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 2 Vol.