

CONVENTION CNES - ORSTOM

**L'UTILISATION DE L'IMAGERIE SPOT
POUR L'OBSERVATION DEMOGRAPHIQUE
EN MILIEU URBAIN**

RAPPORT FINAL - AVRIL 1988

Responsables scientifiques principaux
F. DUREAU et J.P. DUCHEMIN - Département SDU.
Chercheurs, Ingénieurs, Techniciens participant au programme
O. BARBARY, J.M. EBERHARD, B. LORTIC, A. MICHEL - Département SDU
A.AING, I. RANNOU - Unité de télédétection du L. I. A.

CONVENTION CNES - ORSTOM

**L'UTILISATION DE L'IMAGERIE SPOT
POUR L'OBSERVATION DEMOGRAPHIQUE
EN MILIEU URBAIN**

RAPPORT FINAL - AVRIL 1988

Responsables scientifiques principaux

F. DUREAU et J.P. DUCHEMIN - Département SDU.

Chercheurs, Ingénieurs, Techniciens participant au programme

O. BARBARY, J.M. EBERHARD, B. LORTIC, A. MICHEL - Département SDU

A. AING, I. RANNOU - Unité de télédétection du L. I. A.

M. SOURIS - Unité d'Infographie du L. I. A.

CONVENTION CNES /ORSTOM

UTILISATION DE L'IMAGERIE SPOT POUR L'OBSERVATION DEMOGRAPHIQUE EN MILIEU URBAIN

RAPPORT FINAL - MAI 1988

1. RAPPEL DES OBJECTIFS PRINCIPAUX DU PROGRAMME DE RECHERCHE	5
2. METHODOLOGIE ET MOYENS	7
2. 1. La situation actuelle et les différentes approches possibles	7
2. 2. Les différents aspects de l'imagerie SPOT	8
2. 3. Mesures complémentaires et méthodes d'interprétation	9
2. 4. Les moyens utilisés	11
3. RESULTATS	13
3. 1. Résultats obtenus	13
3. 2. Résultats attendus	15
4. ANALYSE DES SERVICES FOURNIS	19
4. 1. Qualité des produits	19
4. 2. Délais de mise à disposition	19
5. CONCLUSION	20
6. LISTE DES PUBLICATIONS ET NOTES DE TRAVAIL DE L'EQUIPE	21

ANNEXES

PRINCIPALES NOTES DE TRAVAIL SUR L'EXPLOITATION DES IMAGES SPOT DE QUITO	1
(5) MICHEL A., 1988, Stratification simple à partir des images traitées., Etude sur le site de Quito, Equateur.	3
(6) MICHEL A., 1988, Evaluation de la précision des mesures de surfaces des îlots, Etude sur le site de Quito, Equateur.	15
(1) DUREAU F., 1986. Plan d'expérience sur Quito.	25
(2) DUREAU F. et MICHEL A., 1987. Enquête Morphologie Quito (Octobre- Décembre 1986). Collecte et exploitation des données.	29
(3) EBERHARD J.M., 1987. Stratification et caractérisation des quartiers de Quito. Une recherche en cours : l'analyse numérique des textures de l'image et des structures urbaines (image SPOT du 26.11.86).	53
(4) MICHEL A., 1987. Influence des facteurs météorologiques sur la probabilité d'obtention d'une image satellite SPOT ou Thematic Mapper. Etude sur le site de Quito, Equateur.	59

ARTICLES ET COMMUNICATIONS

- (7) DUREAU F., LORTIC B., MICHEL A., SOURIS M., 1987
 - Télédétection et système d'information géographique.
 Communication à FI3G, Lyon (France), 10-13 Juin 1987, 15 p. 75
- (8) DUREAU F., LORTIC B., MICHEL A., SOURIS M., 1987.
 - Informatica , teledetección y observación de las poblaciones urbanas. Una investigación vigente en Quito (ECUADOR). Communication à la Primera Conferencia Latinoamericana sobre informatica en geografia , San José, Costa Rica , 5-9 Octobre 1987. 83
- (9) 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 soumise au colloque ISTED, Lyon, 1988. 115
- (10) 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. 117
- (11) MICHEL A., EBERHARD J.M., LORTIC B., DUREAU F., 1987.
 - El uso de la teledetección para la observación de las poblaciones urbanas. Investigación en curso en Quito (ECUADOR).
 Communication au II Simposio Latinoamericano sobre sensores remotos, Columbia, Bogota, 16-20 Novembre 1987, 34 p. 133
- (12) 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, 9 p. 169
- (13) 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 soumise au colloque PIXIM 88, Paris, 24-28 Octobre 1988, 17 p. 179

1. RAPPEL DES OBJECTIFS PRINCIPAUX DU PROGRAMME DE RECHERCHE

Le rythme et les modalités de la croissance urbaine des villes des pays en développement rendent les observations démographiques très délicates : face à cette complexité, les techniques classiques se révèlent difficiles à mettre en oeuvre. 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.

Face au manque de données démographiques récentes auquel sont confrontées les autorités durant les périodes intercensitaires, il paraît nécessaire de développer de nouvelles méthodes adaptées à la spécificité démographique de ces villes. A cet effet, la télédétection spatiale, assurant une observation continue et relativement précise de l'occupation du sol, constitue une source de données particulièrement intéressante : comme l'ont montré depuis les années cinquante les travaux réalisés sur photographies aériennes, 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 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 (SPOT et Thematic Mapper) sur la morphologie urbaine.*

La réalisation de l'objectif général du programme implique des travaux, en parallèle, dans trois directions :

- *l'interprétation des images satellite en milieu urbain* : définir quelles sont les informations relatives à la morphologie urbaine contenues dans ces images, et quels sont les traitements permettant d'extraire ces informations.

- *les relations bâti/population et les sondages spatiaux en démographie* : rechercher quels sont les critères morphologiques pertinents pour l'observation démographique, et quelle stratégie de sondage est la plus efficace pour collecter des données démographiques spatialisées en milieu urbain.

- *l'intégration des données de télédétection dans des bases de données localisées* : résoudre, sur le plan conceptuel et informatique, les problèmes posés par l'intégration de données satellitaires dans une base gérée par le système d'information géographique SAVANE, développé à l'Orstom.

Ces directions de recherche sont menées depuis 1985 par une équipe pluri-disciplinaire de l'Orstom. Cette équipe a commencé par des travaux préliminaires sur la ville de Marseille (FRANCE), qui possédait dès cette date les données nécessaires à la première phase de développement méthodologique : image satellite Thematic Mapper, photographies aériennes à grande échelle, et recensement de population exploitable au niveau de l'îlot. L'existence de ces informations de référence a permis non seulement de développer, mais aussi de tester la validité de méthodes d'interprétation d'image Thematic Mapper en ville, de sondages spatiaux et d'intégration de données de télédétection dans une base de données gérée par le système SAVANE.

Depuis Août 1986, une partie de l'équipe (une géographe-démographe, et un statisticien) est affectée à Quito au sein de l'Atlas Permanent Informatisé de Quito, pour mettre au point des méthodes de production de données morphologiques et démographiques appropriées au contexte quiténien et à l'environnement informatique de l'Atlas de Quito. Ces travaux, qui s'appuient en grande partie sur les résultats obtenus sur Marseille, ont pour base les images SPOT de Juin et Novembre 1986, et l'image Thematic Mapper de Septembre 1986 ; ils ont donné lieu à une première application en vraie grandeur de la méthodologie de collecte de données démographiques

utilisant la télédétection, à travers une enquête démographique par sondage aréolaire portant sur l'ensemble de la ville, en Novembre-Décembre 1987.

La codification et la saisie sur support informatique sont à présent achevées. Les traitements sont en cours; les résultats seront publiés en fin d'année 1988

2. METHODOLOGIE ET MOYENS

2.1. L'utilisation de SPOT en milieu urbain : la situation actuelle et les différentes approches possibles

Trois grands objectifs ressortent de la littérature consacrée au milieu urbain¹ :

- *Evaluer les potentialités de SPOT* : quel type d'information est-il possible d'extraire des données SPOT, en particulier pour cartographier l'utilisation/couverture du sol [BOUILLOT et Al, 1984], [NGUYEN P.T., 1984], pour dégager une typologie de l'espace urbain [MADEC et Al, 1984], [SOUDOPLATOFF S., 1984] ou encore comme source d'informations géographiques [BOQUET E., 1987].

- *Evaluer les capacités de ce satellite* pour détecter les changements d'occupation du sol [DEANGELIS R.M., 1984].

- *Etudier précisément les signatures spectrales* et leurs correspondances fonctionnelles [PEBAYLE J., 1986].

La plupart des auteurs s'accordent à affirmer que les données SPOT sont utilisables, visuellement, au même titre que des photographies aériennes à condition toutefois de ne pas descendre à l'échelle du bâtiment ; aussi, dans un premier temps l'interprétation visuelle des images, méthode bien connue et fiable, peut apporter plus d'information que ne le ferait un traitement sophistiqué [SOUDOPLATOFF S., 1984]. Il est donc raisonnable de dresser une typologie de l'espace urbain à l'intérieur de la commune [MADEC et Al, 1984] ou de constituer une classification fiable des unités d'une taille supérieure à 1,25 Ha pour le niveau II de la typologie de l'USGS² voire même ponctuellement pour les niveaux III et IV [DEANGELIS et Al, 1984].

RIMBERT S. (1982) introduit la notion de "mixels", pixels mixtes dont les signatures sont identifiables, et qui résultent, pour le type pavillonnaire par exemple, de l'association tuiles-jardin + rue + lotissement. Elle signale que ces signatures ne bénéficient pas de la stabilité, dans le temps, que l'on pourrait espérer (variation diachronique), ce qui lui permet d'aborder "l'étude de cycles et des processus" en fonction des variations saisonnières ou horaires.

Pour NGYUEN P.T. (1984), SPOT semble cependant pouvoir constituer un puissant outil de cartographie automatique. De même, "la possibilité de superposer des données diverses aux images et de gérer l'ensemble des informations géographiques disponibles ouvrent de nouvelles perspectives aux utilisateurs " [BOQUET E., 1987].

Si SPOT et TM sont des outils complémentaires [PEBAYLE J., 1986], il n'en reste pas moins que des paramètres de texture doivent être pris en compte dans les classifications afin de profiter pleinement du principal avantage de SPOT qui est sa bonne résolution spatiale et non pas d'en subir les inconvénients [DEANGELIS R.M., 1984], [BOQUET E., 1987].

L'année 1987 a vu un grand nombre d'équipes choisir de traiter des images SPOT dans le domaine de la télédétection en milieu urbain. Thématiquement, les études sont ciblées de façon plus précises:

- cartographie automatique des chantiers [PEDRON C., 1987]

¹ Les indications bibliographiques citées dans ce paragraphe sont intégralement référencées dans l'annexe 4 du rapport final ATP : "Le point sur la télédétection urbaine à travers la bibliographie française et anglo-saxonne", pp. 39-57.

² Typologie arborescente dont la précision et la complexité augmente avec le niveau

- calcul et optimisation du réseau de drainage [PEDRON C., 1987]
- calcul du taux de verdurisation et corrélation entre la densité d'espaces verts et le niveau socio-économique [DE KEERSMAECKER M.L., 1987].

Les efforts se portent aussi sur l'amélioration de l'image (filtre, prise en compte de la texture, etc...) afin de pouvoir interpréter les images satellite sur support photographique en s'inspirant des méthodes mises au point pour l'interprétation des photographies aériennes.

Fait important, l'utilisation d'un système de gestion de base de données localisées devient plus courant [BOQUET E., 1987], [DUREAU et Al., 1987]. En effet, outre les nombreux avantages qui découlent pour la seule télédétection en milieu urbain de l'utilisation de tels systèmes, les besoins des aménageurs nécessitent la production de documents (cartes ou données chiffrées) croisant des informations d'origines diverses (données satellite, socio-économiques, démographiques, règlements d'urbanisme, etc...). Afin d'intéresser les aménageurs à la télédétection, la mise au point de systèmes d'information (simples d'utilisation et facilement actualisables) capables d'atteindre ces objectifs, ainsi que le développement de méthodes de traitement d'image satellite associées, paraît être l'un des axes de recherche à privilégier.

2. 2. Les différents aspects de l'imagerie SPOT

L'utilisation opérationnelle d'images SPOT pour l'observation suivie d'une ville s'inscrit dans un faisceau de contraintes climatiques et thématiques pour l'acquisition d'une image : il est important de les rappeler avant d'envisager l'originalité et les inconvénients des images SPOT.

. Contraintes climatiques. Probabilités d'obtention d'une image SPOT (Ref. 4) ¹

Nous avons calculé différentes probabilités d'obtention d'une image SPOT de Quito correspondant à une nébulosité maximum donnée, et en ce qui concerne SPOT à un angle de visée latérale maximum. Pour une tolérance maximum de 2/8 de ciel couvert, la probabilité d'obtenir une image est maximum en Juillet:

- pour TM : 67 %
- pour SPOT : 42 % en visée verticale
- : 79% avec un angle de visée inférieur à 10°
- : 97% en Juillet et en Août avec un angle quelconque.

Les probabilités d'obtention d'une image SPOT et Thematic Mapper *sans aucune nébulosité* sont du même ordre si l'on accepte un angle de visée au plus égale à 10°.

. Originalité des images SPOT

Par rapport à son principal concurrent Thematic Mapper, le satellite SPOT offre plusieurs possibilités que nous n'avons d'ailleurs pas encore toutes exploitées.

- Stéréoscopie

Si nous avons profité des possibilités de rendu du relief en mettant cote à cote sous un stéréoscope à miroir deux tirages photographiques ayant des différentiels d'angles de prise de vue importants, nous n'avons pas tenté de générer un modèle numérique de terrain de façon automatique. Par ailleurs, les sociétés qui proposent un tel service pratiquent à l'heure actuelle des tarifs dissuasifs.

- Finesse spatiale

¹ Les références notées " Ref. " renvoient aux textes présentés en Annexe du présent rapport.

Particulièrement en milieu urbain, une taille de pixel de 10*10 mètres en panchromatique permet de réaliser des traitements difficilement concevables avec des résolutions plus faibles:

- étude de la texture,
- analyse de la structure,
- segmentation de l'image à partir de la voirie,
- prise en compte d'éléments de configuration de l'espace.

Compte tenu de la précision de la résolution spatiale dans les canaux multispectraux, les pâtés de maison sont décrits par un plus grand nombre de pixels que dans le cas d'une images TM. L'analyse statistique fine de la radiométrie multispectrale des îlots, à l'aide de quantiles, doit permettre d'obtenir une discrimination meilleure de l'espace bâti, aboutissant à une typologie intéressant davantage les urbanistes.

. Inconvénients

Même si la remarque n'est pas originale, nous regrettons *l'absence d'un canal infra-rouge moyen*, particulièrement performant pour discriminer les différents espaces minéraux.

2. 3. Mesures complémentaires et méthodes d'interprétation (Ref. 2)

Afin d'initialiser et valider l'interprétation des images SPOT devant servir de base à l'enquête démographique d'Octobre 1987, nous avons recueilli une information précise sur l'occupation du sol dans un échantillon d'îlots de Quito lors d'une enquête réalisée d'Octobre à Décembre 1986 (*enquête "Morphologie urbaine"*).

Notons également que nous utilisons deux sources d'informations complémentaires pour évaluer la validité de nos exploitations d'images satellite :

- *la couverture aérienne* de Quito réalisée en Novembre 1987 par l'Institut Géographique Militaire : vérification de la limite urbaine et des zones non construites à l'intérieur de la ville issues des images SPOT ;

- la série de *cartes au 1/1.000* (et leurs réductions au 1/2.000) réalisées par l'Institut Géographique Militaire en 1982-1984 : vérification des surfaces d'îlots mesurées sur images SPOT, étude de la voirie.

. Sélection de l'échantillon d'îlots de l'enquête (Ref. 12)

La technique d'échantillonnage de l'enquête Morphologie urbaine a été des plus simples ; nous avons opté pour un tirage systématique sans remise sur grille. Les noeuds de la grille plaquée sur les plans de Quito à l'échelle 1/10 000 déterminent les individus de l'échantillon : ce sont les îlots qui les contiennent. Ayant fixé le taux de sondage à 5 %, connaissant approximativement le nombre total d'îlots de Quito et la surface totale occupée par la ville, nous en avons déduit la maille de la grille : 750 mètres de côté.

Nous avons ainsi constitué un échantillon de *199 îlots*, par tirage systématique sur plan (*Photo 4*) . Cet échantillon a été scindé en deux; une moitié pour initialiser les classifications, l'autre pour les valider.

. Les documents d'enquête (Ref. 2)

Chaque îlot de l'échantillon est décrit par trois types de documents :

Chaque îlot de l'échantillon est décrit par trois types de documents :

- **Carte** : les enquêteurs établissent la cartographie précise de l'occupation du sol de l'îlot. Tous les bâtiments ainsi que tous les éléments non bâtis figurent sur ces plans.
- **Fiche de description des bâtiments** : chacun des édifices dessinés sur la carte est décrit sur cette fiche. Il est repéré par un numéro de 1 à N.
- **Photographies** : pour chaque îlot, des photographies ont été prises depuis un point surplombant l'îlot (étage élevé d'un immeuble ou relief), et au sol, en bordure et/ou à l'intérieur de l'îlot. Ces photographies sont destinées à préciser et contrôler l'information recueillie par les enquêteurs.

Ces fiches de terrain sont ensuite saisies afin de pouvoir mettre automatiquement en correspondance caractéristiques physiques et caractéristiques radiométriques des îlots.

. Méthodologie des classifications

L'expérience de Marseille, où nous avons utilisé un Système d'Information Géographique, nous a amené à développer des méthodes de classifications basées sur la distribution de la réflectance à l'intérieur des îlots (ce découpage était pré-défini par l'INSEE). A l'issue de cette expérimentation, nous avons conclu à la pertinence d'une telle démarche sur la base de classifications plus fiables et répondant visuellement plus à notre objectif de stratification de l'espace urbain que les résultats classiques obtenus en classant des pixels. (*Ref. 10.1 et 7*)

Ces classifications avaient pour but d'une part d'évaluer la densité de l'espace bâti en tenant compte de la moyenne de la radiométrie dans l'îlot, et d'autre part d'obtenir une typologie de l'espace bâti la plus proche possible de celles utilisées par les aménageurs en se basant sur les quantiles radiométriques. (*Rapport ATP*)

Ces classifications se fondent sur une connaissance précise et quantifiée des îlots de l'échantillons (initialisation et de validation).

. Méthodologie de l'analyse de texture et de structure (*Ref. 3*)

L'échantillon-test est composé de 65 imagettes carrées et de taille fixe (64 pixels), réparties sur l'ensemble de l'image SPOT panchromatique du 26 Novembre 1986.

Le choix des imagettes de l'échantillon a répondu essentiellement à trois critères :

- une répartition spatiale aussi large que possible, de façon à couvrir l'ensemble des réalités urbaines,
- une homogénéité visuelle de la zone,
- dans la mesure du possible, une correspondance avec les îlots de l'enquête Morphologie, pour la caractérisation géographique.

La texture a été étudiée par analyse en composantes principales puis classification des paramètres issus d'un calcul des matrices de cooccurrence. La structure a été quantifiée par quelques paramètres de la transformée de Fourier.

2. 4. Les moyens utilisés

. Moyens en personnel

Les chercheurs participant au programme de recherche sur "l'Utilisation de la télédétection pour l'observation des populations urbaines" sont cités en première page de ce rapport. Plusieurs membres de cette équipe ont plus particulièrement travaillé sur l'axe "télédétection urbaine" du

- A. MICHEL, allocataire de recherche MRES, urbaniste spécialisé en télédétection
- B. LORTIC, Unité de télédétection du L. I. A. , spécialiste en télédétection
- A. AING, I. RANNOU, Unité de télédétection du L. I. A., photographes.

L'enquête "Morphologie urbaine" a été réalisée à Quito par deux enquêteurs équatoriens du 1er Octobre au 9 Décembre 1986, sous la direction de F. DUREAU et A. MICHEL.

J.M. EBERHARD a participé de mai à juillet 1987 aux travaux sur l'image SPOT de Quito, dans le cadre d'un stage de D.E.A. à l'Atelier de Télédétection de Bondy.

. Moyens en matériel

Les traitements d'image satellite ont tous été réalisés à Bondy (logiciel PLANETES de l'ORSTOM), sur le matériel décrit ci-dessous :

UNITE D'INFOGRAPHIE	ATELIER DE TELEDETECTION
<p><i>Jusqu'au dernier trimestre 1987 :</i> Mini 6 (BULL) Table à digitaliser (BENSON 6301) Ecran graphique couleur (GIXI-Radiance 320) Table traçante (BENSON 1625)</p>	<p>Mini 6 (BULL) 2 dérouleurs de bande 1600 BPI 2 Péricolor 1000 Ecran graphique (TEKTRONIX 4014) Table traçante (BENSON 1332) Imprimante couleur (COLORPLOT) Caméra digitale</p>
<p><i>A partir du dernier trimestre 1987 :</i> Station de travail graphique SUN 3/110C, disque dur 140 Mo Table à digitaliser (BENSON 6301) Table traçante (BENSON 1625)</p>	<p>Stations de travail graphiques SUN 3/110C et 3/160C, disque dur 500 Mo 1 dérouleur de bande 1600/6250 BPI Table traçante (BENSON 1332) Recopie d'écran</p>

La saisie et le traitement des données collectées à Quito ont été effectués sur un IBM AT dont disposent les chercheurs de l'équipe basés à Quito (F. DUREAU et O. BARBARY). Les traitements photographiques ont été réalisés à l'Atelier de Traitement Photochimique de Bondy par I. Rannou et A. Aing

. Moyens financiers

Outre les financements ORSTOM (1986 = 134.800 F ; 1987 = 149.200 F ; 1988 = 90.000 F) dont bénéficie le projet, ont été obtenus :

- ATP CNES/CNRS Télédétection Spatiale : 92.000 F.
- un complément de financement par le Comité de Pilotage de la Télédétection en Coopération (Ministère de l'Industrie et de la Recherche et Ministère des Relations Extérieures - Coopération et Développement) : 172.500 F .
- la fourniture à un tarif préférentiel de 4 scènes SPOT sur la ville de Quito : demande PEPS reprise par le CNES. La ville de Quito se trouvant à cheval sur deux scènes SPOT, le CNES finance les

vues verticales en panchromatique et multispectral ; les vues obliques demandées dans le projet PEPS pour travailler en stéréoscopie sont financées par l'ATP et le Comité de Pilotage de la Télédétection en Coopération.

3. RESULTATS

3. 1. Résultats obtenus

Plusieurs directions de recherche ont guidé nos premières exploitations des images SPOT de Quito : délimitation visuelle et aide à la délimitation de la ville, évaluation de la précision des mesures de surface des îlots de l'échantillon, segmentation automatique de l'image en se basant sur l'extraction de la voirie, classification des zones obtenues par segmentation, analyse numérique des textures et structures des quartiers et, analyse visuelle multidates.

. Détermination de la limite urbaine (Ref 5)

La première opération que nous avons réalisée concerne le tracé de la limite externe de la ville à partir de documents photographiques issus de l'imagerie SPOT.

Nous avons eu à notre disposition une couverture aérienne photographique, et cette opportunité a été mise à profit pour estimer la fiabilité de la limite déterminée à partir des documents satellitaires. La comparaison des deux limites met en évidence la fiabilité du travail effectué sur les images satellite.

L'objectif principal de la démarche suivante est 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. Cette méthode doit pouvoir être applicable sur tirages photographiques. elle a donc été fondée sur seuillage des valeurs radiométriques de l'indice de végétation et de l'écart-type local calculé sur le canal panchromatique. Comme l'illustre la *Photo 3*, la limite de la classe 3 (minéral hétérogène) est très proche de la limite déterminée visuellement.

. Evaluation de la précision des mesures de surface (Ref 6)

Evaluer la précision des mesures de surface des îlots enquêtés est important, car c'est un paramètre qui influe fortement sur la fiabilité de l'extrapolation des données démographiques à l'ensemble de la base de sondage. Nous avons donc comparé la surface de 30 îlots délimités sur écran, 30 autres sur tirage photographique du panchromatique à l'échelle 1/15 000 et les 30 derniers mesurés sur le terrain, avec leur surface mesurée au planimètre sur une carte à grande échelle. Les résultats sont les suivants :

Origine	écran	Enquête au sol	Tirage photo du panchromatique
tendance globale :	103 %	99 %	92 %
précision :	17 %	7 %	11 %

La précision des surfaces mesurées sur le terrain et sur tirage est comparable.

La précision pourrait être sensiblement meilleurs sur écran, car l'objectif initial de détermination des îlots correspondait alors uniquement à initialiser puis à valider les traitements de télédétection, non à calculer des surfaces, ce qui n'implique pas le même type de précautions quant à la méthode de travail.

. Mise en évidence des réseaux de voirie - Segmentation de l'image (Ref. 13 et 10.2)

Pour faire apparaître les phénomènes urbains qui nous intéressent (la densité du bâti par exemple), nous avons constaté l'avantage, en site urbain, du traitement d'image satellite dans des îlots par rapport à un traitement classique par pixel. Il s'agit donc ici de tester la fiabilité d'une extraction automatique de la voirie (*Photo 1*) devant permettre la création de zones, une zone étant l'unité spatiale incluse à l'intérieur des contours de la voirie adjacente. Les zones ainsi déterminées ont été labellisées. Une évaluation de la fiabilité de cette méthode par superposition de l'extraction de voirie obtenue automatiquement et de cartes à l'échelle 1/2 000 est en cours (*Photo 2*).

. Classification supervisée des zones en fonction de la densité de l'espace bâti (Ref. 13)

Une régression polynomiale entre la densité de bâti estimée sur échantillon et la moyenne radiométrique par îlot, a permis de générer un néo-canal "densité".

Deux types de classifications supervisées ont été générés :

- un seuillage d'une régression polynomiale en 6 classes de densité de l'espace bâti ; la fiabilité de cette classification est :

47 % en 6 classes (*Photo 5*)
72 % en 3 classes .

- une classification de type barycentrique en 4 classes de densité à partir de 2 néo-canaux résultant d'une analyse discriminante; le pourcentage d'îlots bien classés est :

57 % pour une classification en 4 postes,
71 % pour une classification en 3 postes

En terme de fiabilité, les résultats des classifications sont comparables à ceux enregistrés lors de l'expérimentation marseillaise avec une image *Thematic Mapper*. 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 à la fois une typologie différente et une meilleure discrimination des types de bâti.

. Analyse numérique des textures et structures des quartiers (Ref. 3)

Pour ce quatrième type d'exploitation des images SPOT de Quito, la question était la suivante : comment, numériquement, caractériser et stratifier les quartiers de Quito en fonction de leurs textures et structures.

- *Etude de la texture* : les matrices de cooccurrence en niveaux de gris.

La classification de type nuées dynamiques effectuée sur les paramètres de cooccurrences a permis de dégager quatre grands groupes de texture qui rassemblent des quartiers à paysage

- *Analyse de la structure* : la Transformée de Fourier (*Photo 7 et 8*).

Avec un outil aussi simple que la fréquence spatiale majoritaire, nous avons réussi à dégager quatre grandes catégories de quartiers (du milieu rural non structuré, jusqu'aux quartiers très fortement structurés), et établir une hiérarchie des structures de quartiers par double classement sur les réseaux secondaires.

Le croisement des classifications obtenues par ces deux méthodes a permis de fonder une typologie intéressante de l'espace urbain.

. **Détection des changements intervenus entre 2 dates (Ref. 12)**

Nous avons effectué un essai de concordance des deux images panchromatiques (Juin : 22^e R et Novembre : 8^e L) à l'aide d'un algorithme fondé sur un polynôme de déformation de degré 5 avec une centaine d'amers relevés manuellement. Malgré les problèmes posés par la différence d'incidence, le résultat est suffisamment satisfaisant pour mettre clairement en évidence un certain nombre de modifications de petite taille concernant le bâti (en rouge sur la *Photo 6*).

3. 2. Résultats attendus

. **Typologie de l'espace urbain** telle que l'on peut l'obtenir en se basant sur l'analyse statistique fine de la radiométrie à l'intérieur des zones issues de la segmentation de l'image (quantiles radiométriques).

. **Comparaison SPOT / Thematic Mapper** . Cette comparaison sera faite sur la base des classifications "densité du bâti" et "typologie de l'espace urbain", en mettant l'accent sur la fiabilité mesurée, la différence des typologies obtenues et sur la complémentarité supposée des deux systèmes.

. **Classifications multidates, multi capteurs** . La réalisation de ce travail dépendra des difficultés que nous rencontrerons pour superposer les différentes images, compte tenu de la taille des images (2000*4000 pixels de 10 m pour couvrir l'ensemble de la ville) et des différences entre les angles de prise de vue.

Photo 1 - Partie Nord
Extraction automatique de la voirie
d'après l'image P. +Xs3 du 3/6/86

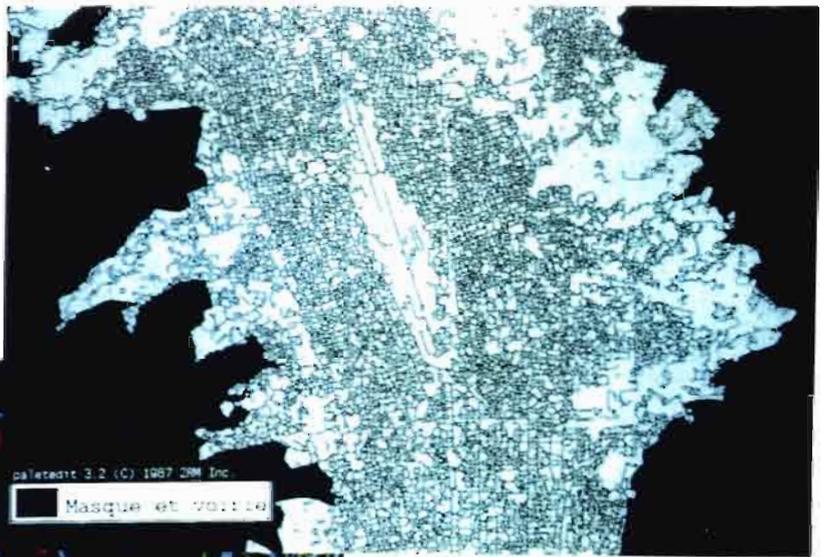


Photo 2 -
Vert : extraction automatique
Rouge : Panchromatique 3/6/86
Bleu : voirie sur le plan 1/ 1 000

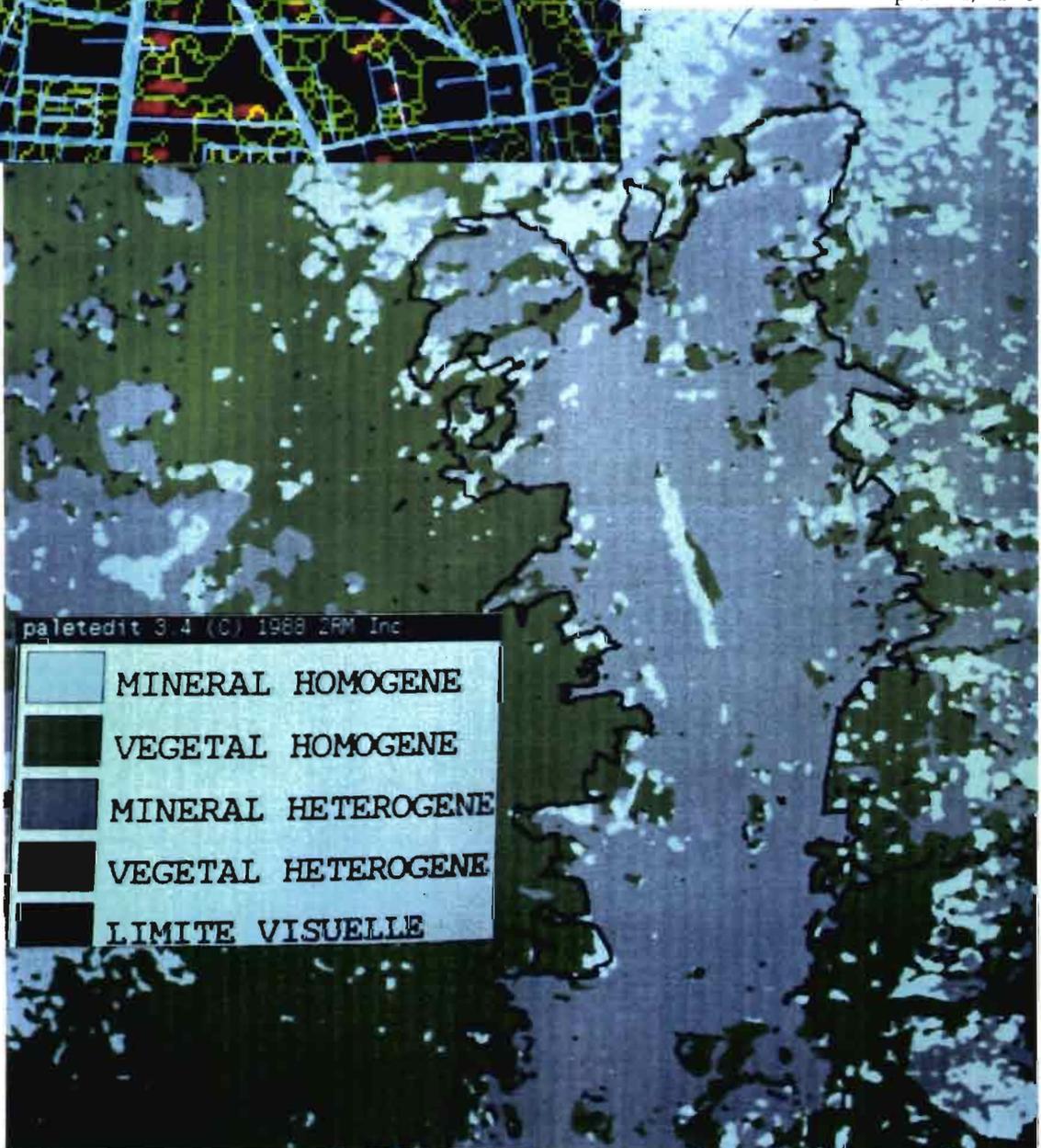


Photo 3 - Classification hypercube et limite urbaine
issue de l'interprétation visuelle d'images SPOT



Photo 4 - Partie Nord
Tirage systématique de
l'échantillon d'îlots



Photo 5 - Classification par régression polynomiale de l'indice de végétation

Photo 6 -
Composition colorée
deux dates
Cyan : P. Juin
Rouge: P. Novembre

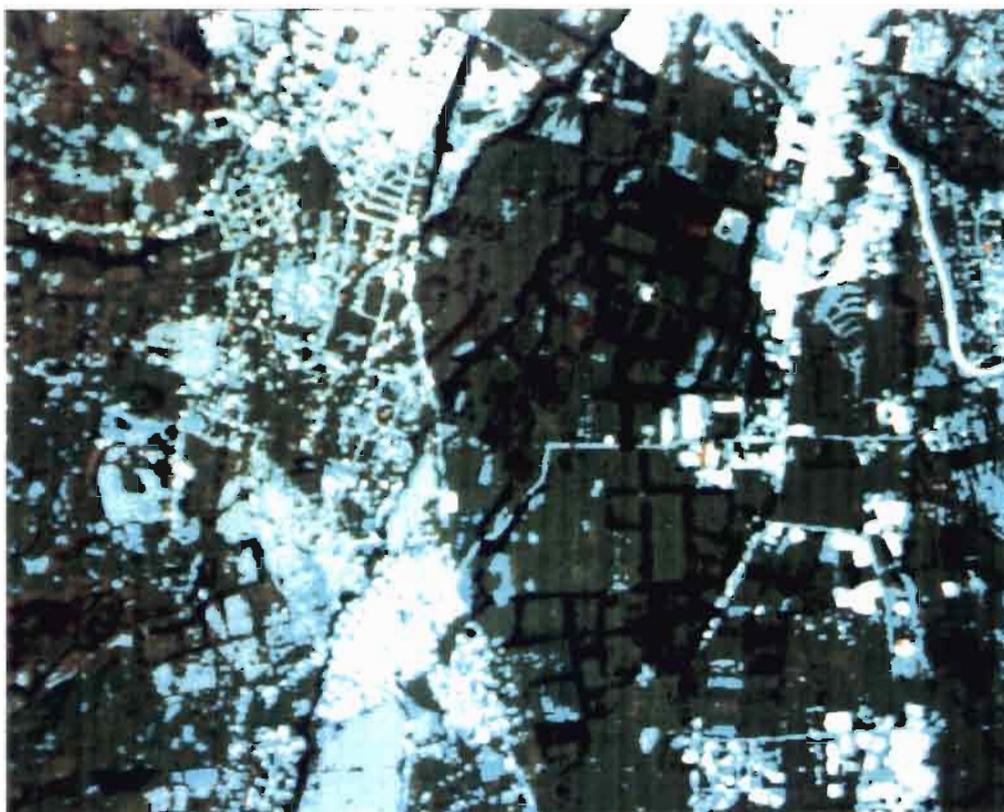


Photo 7 - Détail : "Comité Del Pueblo"
(Panchromatique) et son spectre
de Fourier

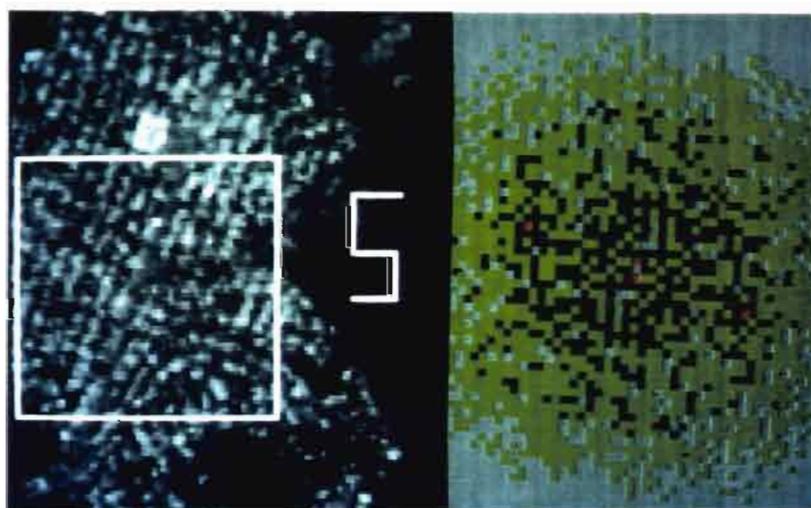
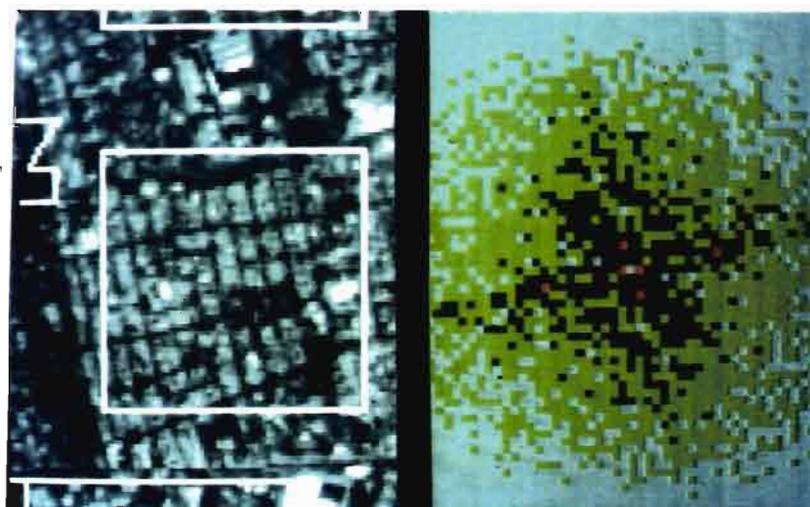


Photo 8 - Détail : quartier de "vivienda"
d'état (Panchromatique) et son spectre
de Fourier



4. ANALYSE DES SERVICES FOURNIS

4. 1. Qualité des produits

En fin de programmation d'acquisition, nous avons eu à notre disposition les scènes SPOT de niveau *IB* suivantes :

Juin 1986 :	panchromatique et multispectral, parties Nord et Sud (22°R)
Août 1986 :	panchromatique et multispectral, partie Nord (Vertical)
Novembre 1986 :	panchromatique, parties Nord et Sud (8,7°L)
	multispectral. partie Nord uniquement(8,7°L)

Les images SPOT obtenues sont de très bonne qualité radiométrique, elles présentent une bonne dynamique (le panchromatique seuillé à 3% se situe entre 5 et 90). Cette dynamique est semblable sur toute les images qui ne présentent que très faiblement l'effet "pyjama". Nous n'avons pas décelé de différence entre barrettes dans les canaux du multispectral. Les incertitudes sur la qualité de la cartographie dont nous disposons à Quito ne nous ont pas permis de réaliser une rectification géométrique.

4. 2. Délais de mise à disposition

Comme le montre le tableau ci-dessous, la livraison des données commandées a été particulièrement longue : de Décembre à fin Mai 1987 pour des scènes enregistrées de Juin à Novembre 1986. La concomitance entre le dernier enregistrement SPOT (Novembre 1986) et les relevés-terrain résulte plus de la chance que d'une programmation très maîtrisée : ce n'est que deux mois après la fin de l'enquête Morphologie urbaine que nous avons été avertis par SPOT IMAGE de l'existence de ces images.

Image	Date de réception des bandes à Bondy
9/8/86. Panchromatique. Nord	Fin Décembre 1986
9/8/86. Multispectral. Nord	27 Mai 1987
26/11/86. Panchromatique. Nord	15 Février 1987
26/11/86. Panchromatique. Sud	15 Février 1987

Cette première expérience montre les difficultés à mettre en oeuvre un plan de collecte des données incluant l'enregistrement d'une image SPOT ; il est vrai que nous sommes à l'étranger, une zone que les conditions météorologiques rendent difficile à observer, mais ce seront justement les conditions d'application de la méthode de collecte démographique que nous développons.

5. CONCLUSION

L'ensemble des résultats obtenus jusqu'ici dans le cadre de notre programme confirme la pertinence des sondages aréolaires stratifiés sur image satellite pour des enquêtes démographiques en milieu urbain. La première application en vraie grandeur de cette méthodologie de collecte de données démographiques utilisant la télédétection spatiale a été réalisée fin 1987 à Quito, où nous avons effectué une enquête démographique sur un échantillon d'îlots tiré de l'image SPOT de la ville ; cette expérience démontre la praticabilité de la méthode, qui pourrait être utilisée dans de nombreuses autres villes.

Sur le plan technique, l'imagerie SPOT utilisée répond tout à fait aux exigences de l'utilisation que nous en faisons ; nous n'émettons qu'une seule réserve, sur la qualité des produits photographiques de SPOT IMAGE. Pour notre part, nous avons préféré utiliser des films réalisés par VIZIR à partir des bandes magnétiques.

Du point de vue de la stratification de l'espace urbain en fonction de la densité de bâti, l'évaluation des classifications issues des images montre que les résultats obtenus avec SPOT et Thematic Mapper sont sensiblement équivalents ; l'originalité de SPOT tient au canal panchromatique de résolution 10 mètres qui non seulement apporte une information intéressante pour l'étude de la texture et de la structure, une bonne évaluation de la surface des îlots urbains, mais aussi permet de se repérer aisément sur le terrain pour se rendre sur les îlots appartenant à l'échantillon tiré sur image.

A l'issue de cette première expérience d'utilisation de SPOT, il nous semble que les possibilités d'amélioration du système SPOT ont plus trait au domaine commercial qu'aux caractéristiques techniques du produit fourni, de qualité tout à fait bonne. Pour le type d'application à laquelle nous nous intéressons, deux éléments devraient faire l'objet d'améliorations :

- Le délai de livraison des images commandées : pour que le plan de sondage soit appliqué correctement, il importe que la base de sondage soit à jour, donc que l'image soit très récente.
- Le coût des images : le milieu urbain présente une particularité, la faiblesse de la superficie occupée, par rapport aux 60 x 60 km d'une image SPOT. L'achat d'une scène complète ou même de plusieurs scènes (à Quito, nous avons dû acquérir 720 km² d'image pour travailler sur environ 150 km²) est d'un coût trop important pour la plupart des utilisateurs potentiels. Pour rendre accessibles les images SPOT, il conviendrait de proposer des tarifs correspondant à des portions d'images centrées sur la ville.

Enfin, pour des utilisateurs non spécialisés en télédétection, ou tout simplement ne souhaitant pas investir de temps en développement méthodologique, il est très important de leur rendre financièrement accessibles les films SPOT ; à l'heure actuelle, le tarif des films est prohibitif pour nombre d'utilisateurs. L'expérience de deux années à Quito, au contact des services de gestion de la ville et des bureaux d'étude ou de recherche, montre clairement que c'est par l'usage des tirages photographiques, principalement du canal panchromatique, que se diffuse l'usage de la télédétection spatiale.

6. LISTE DES PUBLICATIONS ET NOTES DE TRAVAIL DE L'EQUIPE

peuvent être consultés au Département S.D.U de l'ORSTOM Bondy, au service de documentation du L. I. A. de l'ORSTOM Bondy, ou à la Mission ORSTOM de Quito

. 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, 42 p.

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'Etude 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.

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 soumise au colloque ISTED, Lyon, 1988.

- 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 Simposio 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, 9 p.
- 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 soumise au colloque PIXIM 88, Paris, 24-28 Octobre 1988, 17 p.
- 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.
- . Notes de travail non publiées**
- Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1986. - Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport intermédiaire - Avril 1986. Paris, 190 p.
- Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1987. - Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport final - Août 1987. Paris, 53 p.+538 p.
- BARBARY O., 1986. - Apport d'une stratification morphologique des districts INSEE de recensement dans l'estimation par sondage des effectifs de population à Marseille. Quito, 47 p.
- BARBARY O., 1988. - Mise au point de plans de sondage pour l'estimation de caractères démographiques à Marseille. Evaluation des précisions permises par l'emploi de diverses techniques de sélection, de stratification et d'estimation. Quito, 184 p.
- DUREAU F., 1986. - Marseille : tirage de l'échantillon de travail. Quito, 9 p.
- DUREAU F. et MICHEL A., 1986. - Quito : enquête morphologie urbaine. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). Quito, 19 p.
- DUREAU F., 1987. - Quito : enquête bâti/population. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). Quito, 27 p.
- DUREAU F., 1987. - Quito. Encuesta demografia/migraciones. Instruccion para los encuestadores. Quito, 25 p.
- EBERHARD J.M., 1987 - Télédétection urbaine : éléments de caractérisation géographique des quartiers de Quito à l'aide d'une image SPOT. Mémoire de DEA, EHESS, 98 p.
- MICHEL A., 1986 et version actualisée 1987. - Le point sur la télédétection urbaine en 1986 à travers la bibliographie française et anglo-saxonne sur le sujet. Recueil des fiches de dépouillement des articles et ouvrages. ORSTOM, 49 p.
- MICHEL A., 1987. - Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution : étude statistique du descripteur "densité du bâti", présentation des classifications. (Image TM Marseille 1983). Paris, 99 p.
- MICHEL A., 1987. - Influence des facteurs météorologiques sur la probabilité d'obtention d'une image satellite SPOT ou Thematic Mapper. Etude sur le site de Quito, Quito 14 p.

ANNEXES

PRINCIPALES NOTES DE TRAVAIL SUR L'EXPLOITATION
DES IMAGES SPOT DE QUITO

3.3) Stratification simple à partir des images traitées.

Introduction

L'objectif est de délimiter puis de stratifier la base de sondage. Nous exposons ici des méthodes simples, rapides et peu coûteuses qui peuvent être mises en oeuvre à partir de quelques documents issus d'images satellites.

3.3.1) Détermination visuelle de la limite urbaine

3.3.1.1) Les documents utilisés

La première opération que nous avons réalisée concerne le tracé de la limite externe de la ville. Plusieurs documents photographiques réalisés à l'Atelier de Télédétection de Bondy ont servi pour parvenir à la délimitation finale :

- deux images panchromatiques :
 - Juin échelle 1/30 000 (2 tirages noir et blanc différemment contrastés afin de tenir compte de la dynamique entre les différents espaces végétaux et urbanisés).
 - Août échelle 1/50 000 (2 tirages noir et blanc différemment contrastés)
- un indice de végétation (XS3-XS2)/(XS3+XS2) échelle 1/50 000 (2 tirages noir et blanc différemment contrastés)
- un écart-type local (fenêtre 5*5) réalisé sur l'image panchromatique, copie couleur d'écran, échelle approximative 1/60 000
- 1 indice de brillance (XS3+XS2), copie couleur d'écran , échelle approximative 1/60 000.

3.3.1.2) Mise en oeuvre et règles de décision

Compte tenu de l'avancée des fronts d'urbanisation, nous n'avons pas cherché à retrouver sur les images la limite définie par le Municipio de Quito il y a quelques années . Par ailleurs, nous devons faire la preuve de la faisabilité d'une telle démarche, première étape déterminante pour établir la base de sondage.

Quelques règles simples ont été discutées, puis retenues afin de définir de façon la plus précise possible le concept de "limite urbaine" applicable dans le cas d'une stratification à objectif démographique. Nous avons décidé que la limite serait tracée là où se terminait **une zone continue d'espace bâti** en suivant si possible une limite (naturelle ou artificielle) visible sur l'ensemble des documents et sur le terrain. Une telle définition, volontairement très large doit permettre d'inclure suffisamment d'espace pour pouvoir prendre en considération l'extension de la ville qui s'est effectuée entre la date d'enregistrement de l'image SPOT (Juin 1986) et la date de l'enquête démographique. Les lotissements prévus repérables uniquement grâce à leur réseau de voirie ébauché ont logiquement été inclus à l'intérieur de notre limite. Un espace au bâti très peu dense et éparse devait être

délimité en se basant sur des limites visibles (routes, rangées d'arbres, québradas, et...) et non pas le long de la dernière maison afin de ne pas induire une densité (ponctuelle ou linéaire) artificiellement élevée.

Pour la même raison, les indentations profondes à l'intérieur de la ville devait être limitées et n'être prises en considération que lorsque cela permettait de détourner une zone importante d'espace non bâti.

Les différentes limites obtenues indépendamment par deux photo-interprètes¹ ont été confrontées. Leurs tracés respectifs n'offrent pas de différences fondamentales. Une limite de "synthèse" a donc été retenue. La discrimination de la limite externe s'est faite pour l'essentiel sur l'image panchromatique brute, mais aussi à partir de l'image de l'indice de végétation et de l'écart-type local. Enfin, nous sommes allés conforter la limite ainsi obtenue par une enquête sur le terrain, qui nous a de plus permis de lever l'ambiguïté concernant un espace recouvert de nuages sur l'image satellite.

3.3.1.3) Validation

Nous avons eu à notre disposition une couverture aérienne photographique noir et blanc de Novembre 1987 à l'échelle approximative 1/40 000. Cette opportunité a été mise à profit pour estimer la fiabilité de la limite déterminée sur les documents satellitaires. La même démarche que précédemment, respectant les mêmes règles de décision a donc été appliquée, et une "limite urbaine" a été dessinée, par les mêmes interpréteurs, sur ces photographies. La comparaison des deux limites met en évidence la fiabilité du travail effectué sur les images satellite. La seule véritable erreur d'interprétation est imputable aux carrières qui présentent sur le panchromatique et dans une moindre mesure sur la composition colorée une apparence d'espace bâti.

Sur photographies aériennes, la tendance est marquée à dessiner plus strictement la limite, les bâtiments se découpant très clairement et sans ambiguïté.

Un résultat important est donc que des non spécialistes des images satellite peuvent définir une limite aussi fiable à partir de documents satellitaires comme le panchromatique SPOT qu'à partir des photographies aériennes auxquelles ils demeurent plus habitués.

3.3.2) Détermination automatique de la limite urbaine à l'aide de de l'indice de végétation et de l'écart-type local calculé sur le canal panchromatique.

L'objectif principal de cette démarche est 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. Cette méthode doit pouvoir être applicable sur tirages photographiques. Elle a donc été fondée sur le seuillage de valeurs radiométriques (niveaux de gris) dans

¹F. DUREAU et A. MICHEL

des néo-canaux appropriés (classification hypercube). Afin de traiter l'image dans des délais raisonnables, nous avons préalablement échantillonné l'image originale entourant largement Quito (1912*3868 pixels de 10 m) en ne conservant qu'un pixel sur 9.

3.3.2.1) 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 incité 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). Ces deux néo-canaux ont été réétablis suivant 2 valeurs d'écart-types autour de la moyenne.

C'est tout à fait volontairement que nous n'avons pas cherché à élaborer un indice plus complexe (et donc plus performant ?) résultant par exemple d'une analyse discriminante, afin de conserver la possibilité de réaliser ce travail à partir de tirages photographiques de l'image.

3.3.2.2) 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.

	I n d i c e de 0 à 176	v é g é t a t i o n de 177 à 255
de 0 à 3 Ecart-type	minéral homogène	végétal homogène
local de 4 à 255	minéral hétérogène	végétal hétérogène

La limite urbaine est donc théoriquement confondue ou du moins incluse dans la classe 3 (minéral hétérogène) (voir **Figure 1**). après classement, nous avons 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 (**Figure 2**).

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

Nous avons croisé les classes obtenues à l'issue de la classification avec

la limite urbain/rural en 2 classes qui nous sert de référence. On obtient donc 8 classes qui illustrent (Figure 3) et valident notre traitement de détermination automatique de l'aire urbaine. Le Tableau 1, résume quantitativement les résultats. Les nombres expriment le pourcentage de pixels d'une classe (en colonne) inclus ou non à l'intérieur de la limite de la ville définie visuellement (en ligne). Il se lit comme suit : sur les 49% (*resp* 56%) de pixels "végétal homogène" que comporte l'image entière classée (*resp* classée et lissée), 44 % (*resp* 50%) sont situés hors de la limite urbaine et les 5% restant étant localisés à l'intérieur de la limite. Les nombres en italiques se réfèrent à la classification lissée

Tableau 1 - Croisement de la classification et de la limite obtenue visuellement

	NON URBAIN			URBAIN
	Végétal Homogène	Végétal Hétérogène	Minéral Homogène	Minéral Hétérogène
INCLUS	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Original	5%	3%	3%	13%
Lissé	6%	2%	1%	15%
EXCLUS	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Classe 8
Original	44%	8%	13%	11%
Lissé	50%	4%	12%	11%
TOTAL	49%	11%	16%	24%
	56%	6%	13%	26%

. Commentaires

Les nombres seuls ne suffisent pas à démontrer la bonne fiabilité de ce traitement, car la notion de voisinage et de compacité doit aussi intervenir, ce traitement n'étant considéré que comme une aide à la détermination de la limite urbaine.

L'analyse de toutes les classes résultant du croisement entre classification et référence explique les raisons de certains pourcentages à priori défavorables ou moins significatifs.

Classe 4 - Minéral hétérogène inclus dans la ville (13% 15% de la surface totale)-

C'est la classe qui sert à la délimitation de l'espace urbain; les zones qui la composent forment une grande zone compacte sans indentations excessives.

Classe 8 - Minéral hétérogène hors de la ville (11% 11% de la surface totale)-

Très logiquement, cette classe englobe les villes de la périphérie.

Cependant celles-ci ne présentent pas de frontière avec Quito, seuls quelques petites zones éparses dans le Nord peuvent ponctuellement créer une ambiguïté quant à la délimitation précise de la limite urbaine.

Cette classe inclut aussi les nuages situés sur les flancs du Pichincha.

Classe 3 - Minéral homogène inclus dans la ville (3% 1% de la surface totale)-

A l'intérieur de cette classe se trouvent l'aéroport, les concentrations de grands bâtiments industriels, et les parkings. La prise en compte de zones appartenant à cette classe ne pose pas de problème car elles sont totalement incluses à l'intérieur de la limite urbaine et occupent une surface faible.

Classe 7 - Minéral homogène hors de la ville (13% 12% de la surface totale)-

Quelques petites zones contiguës à la limite urbaine et appartenant à cette classe se situent essentiellement dans le Nord. Elles recouvrent des espaces de sols nus ou de champs labourés.

Pour les zones appartenant à l'une de ces 2 classes, la règle de délimitation consiste donc à ne considérer comme zone urbaine que les zones entièrement incluses dans la classe 3

Classe 1 - Végétal homogène inclus dans la ville (5% 6% de la surface totale) -

Le pourcentage important de cette classe s'explique par le choix qui a été fait lors de la délimitation visuelle de la ville. Il avait été décidé de prendre en compte une limite englobant toute continuité urbaine. C'est précisément le cas dans le Sud de Quito, où l'urbanisation est longtemps présente le long de la route pan-américaine et de la "Vincindores de Pichincha" (Figure 4). Cependant, afin de ne pas créer de toute pièce une densité de bâti ponctuellement forte, il a été convenu d'inclure cette urbanisation filiforme à l'intérieur du découpage de l'îlot par la voirie adjacente. Or la voirie secondaire délimitant l'îlot se situe loin de cette urbanisation, ce qui a pour effet d'inclure à l'intérieur de la limite déterminée visuellement une très large surface d'espace à vocation agricole. Le traitement simple que nous avons réalisé, ne peut bien évidemment pas tenir compte de ces règles de délimitation.

Plus ponctuellement, cette classe recouvre aussi les espaces verts à l'intérieur de la ville, ainsi que des parties de forêt situés en bordure de la ville qui avait été incluses dans la limite de référence pour cause de "mitage urbain".

Classe 1 - Végétal homogène hors de la ville (44% 50% de la surface totale) -

Les zones de cette classe représentent la majorité des zones contiguës à la limite urbaine, ce qui permet une délimitation de la ville fidèle à la délimitation visuelle et sans ambiguïté.

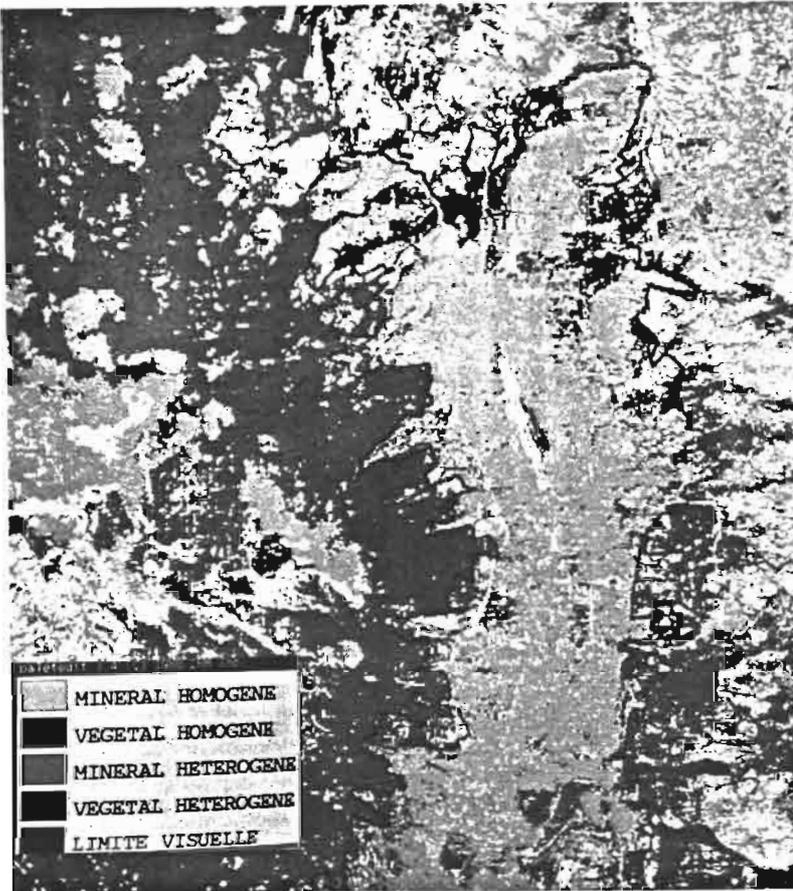


Figure 1 : Hypercube 4 classes et limite visuelle
Pixel de 30 metres

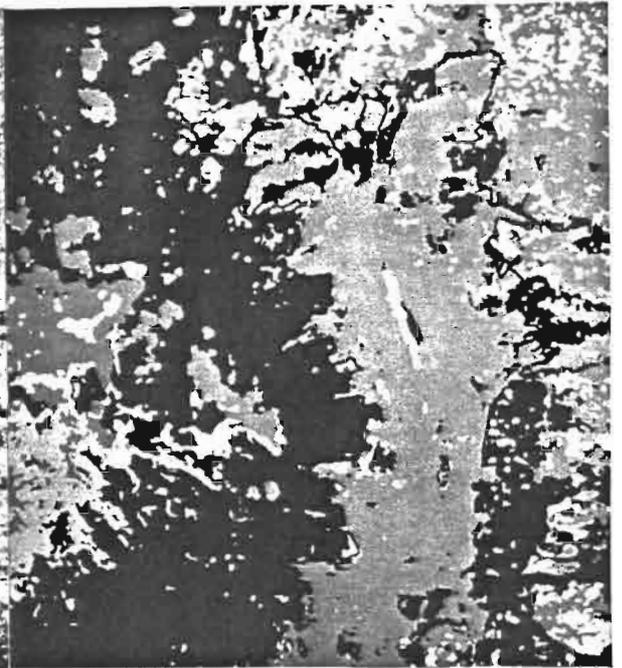


Figure 2 : Hypercube 4 classes lisse
et limite visuelle
Pixel de 30 metres

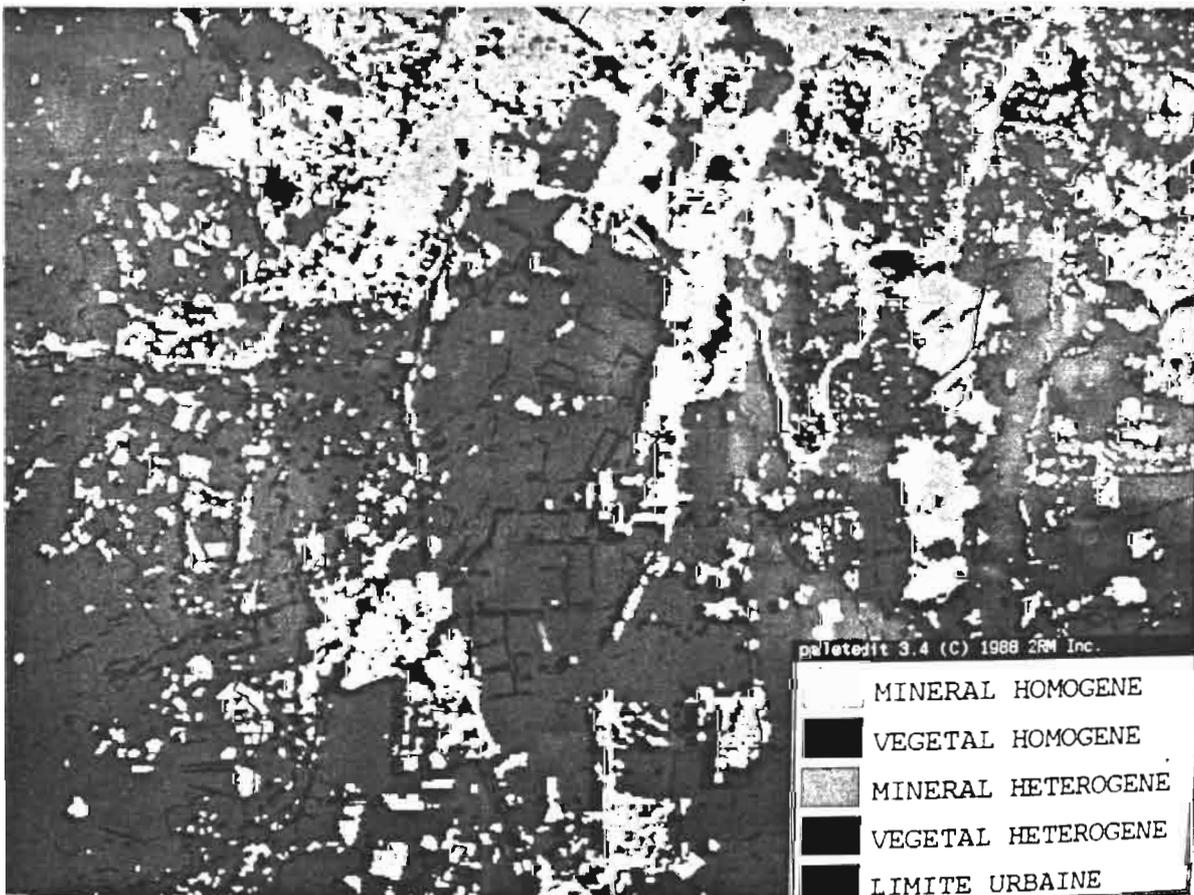


Figure 4 : Hypercube 4 classes et limite visuelle, pixel de 10 mètres



paletedit 3.4 (C) 1988 2RM Inc.

	MINERAL HOMO<LIM
	VEGETAL HOMO<LIM
	MINERAL HETE<LIM
	VEGETAL HETE<LIM
	MINERAL HOMO>LIM
	VEGETAL HOMO>LIM
	MINERAL HETE>LIM
	VEGETAL HETE>LIM

Figure 3 : Croisement de l'hypercube 4 classes avec la limite urbaine

Classe 6 - Végétal hétérogène hors de la ville (8% 4% de la surface totale) -

Classe 2 - Végétal hétérogène inclus dans la ville (3% 2% de la surface totale) -

Ce sont deux classes très marginales peu compactes et présentant des zones de très faibles surfaces qui signalent généralement un espace frontalier entre minéral et végétal ou entre végétal arboré et végétal herbacé. La classe 2 révèle aussi dans le Sud la présence de jardins potagers et signale de ce fait, la présence d'une urbanisation de type péri-urbain. On notera que le lissage majoritaire a provoqué la diminution d'une moitié de son effectif hors limites et d'un tiers à l'intérieur de la ville. Dans la moitié Nord de Quito, les zones plus compactes appartenant à cette classe sont toutes totalement incluses dans la ville (golf).

3.3.2.4) Conclusion.

Comme l'illustre la **Figure 2**, la limite de la classe 3 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 constant, alors que le principal écueil d'une délimitation totalement visuel 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 est 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, plus délicat à traiter dans le Nord et pose des difficultés inhérentes aux règles de décision fixées dans le Sud.

3.3.3) Stratification visuelle à partir d'une classification "densité du bâti" calculée par pixel.

. Mise en oeuvre de la classification des pixels de l'image satellite.

Le zonage à l'intérieur de l'espace urbain a été réalisé à partir d'une copie d'écran représentant une classification de la densité du bâti. Cette classification de type barycentrique en 6 postes a été supervisée en fonction des statistiques descriptives calculées sur l'échantillon de 199 îlots précisément décrits et mesurés. Les canaux (XS1) et néo-canaux (Ecart-type local sur panchromatique, Indice de végétation, et Indice de brillance) utilisés pour opérer cette classification ont été choisis en fonction de leur aptitude à rendre compte de la densité du bâti. Les délais d'élaboration de cette classification ont été très courts, l'enquête

devant impérativement commencer avant l'hiver, ce qui explique le peu d'étude réalisée. On s'est donc contenté de reproduire le type de classification expérimenté sur le site de Marseille, en sachant qu'il est toujours possible de tester d'autres classifications en post-stratifiant.

. Evaluation de la classification.

Pour des motifs équivalents, la classification a été initialisée et évaluée sur un même échantillon. Cela est bien évidemment contraire à une stricte rigueur scientifique, mais l'absence d'étude précise sur la détermination des canaux et néo-canaux les plus aptes à discriminer la densité de l'espace bâti nous a légitimement conduit à initialiser la classification sur le plus grand nombre possible d'individus afin de réduire autant que possible les classements ambigus de pixels. Ce choix s'est donc, dès le départ effectué au détriment de la validation de la classification. Cependant, il est nécessaire d'évaluer cette classification, en particulier pour connaître les confusions entre classes les plus importantes. La matrice de confusion qui suit a été établie (en effectif), en croisant la modalité de densité du bâti de référence avec la classe d'affectation.

Matrice de confusion						
Confusion	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Référence 1	2	2	2	0	0	0
Référence 2	8	29	16	5	2	0
Référence 3	1	3	10	20	15	0
Référence 4	1	1	2	5	14	0
Référence 5	1	1	2	3	17	2
Référence 6	0	1	0	0	1	3

La fiabilité de cette classification est :

39% en 6 classes

60% en 3 classes

On remarque qu'un décalage important subsiste entre classe et modalité de référence. La classification a tendance à surestimer la densité. A priori, ce décalage n'est pas gênant, pour les besoins de la stratification. Il est en effet important que cette classification respecte un ordre de densité, même si celui-ci est décalé par rapport à une référence. Ces quelques exemples montrent l'intérêt des néo-canaux pour établir facilement des classifications simples de la ville, pertinentes pour notre objectif de stratification de l'espace urbain en vue d'une enquête démographique.

.Elaboration de la stratification, premiers résultats.

L'interprétation de cette classification de pixels, a nécessité un important travail de zonage, non seulement en fonction de la valeur des pixels, mais surtout en fonction des associations de valeurs (de la texture) de l'image classée. En effet, il est aberrant de concevoir un indicateur de

densité par pixel, et l'on doit tenir compte du voisinage *à fortiori* s'il s'agit d'effectuer un zonage dans l'optique d'une stratification de l'espace. Les plages homogènes de faibles surface n'ont donc pas été détournées. Ce zonage, pour lequel nous avons conservé les 6 postes initiaux a été effectué indépendamment par deux interprètes, puis reporté, après confrontation, sur le tirage panchromatique au 1/30.000 préalablement délimité. Les limites entre strates empruntent des frontières naturelles (québradas), ou artificielles (rues) de façon à ne pas couper les unités primaires de l'échantillon qui sont les pâtés de maisons .

Les résultats qui suivent estiment, mieux qu'une matrice de confusion, la qualité de la stratification effectuée à partir de l'image satellite. Ces tableaux sont extraits des travaux de O. BARBARY, qui a testé les différentes stratifications disponibles (sur la base de l'évaluation de la densité de l'espace bâti) et les a comparées les unes aux autres à l'aide du coefficient de variations de quelques variables démographiques. Ces calculs ont été effectués sur un sous-échantillon de l'échantillon "morphologie" comportant 50 îlots.

Tableau 2 - Liste des variables démographiques utilisées -

Variables	Définition
EFFECTRES	Population résidente
NBMENAGE	Nombre de ménages
NBMEN1	Nombre de ménages d'une personne
NBMEN7	Nombre de ménages de sept personnes et plus
NBMENP1	Nombre de ménages de plus d'une personne
NBMENM7	Nombre de ménages de moins de sept personnes
EFFM5A	Population âgée de moins de cinq ans
EFFMIG	Population des migrants
EFFMIGM5	Population des migrants ayant moins de cinq ans de résidence à Quito

Trois types de stratifications ont été évalués :

- stratification DENSBATI : stratification "de référence" issue de l'exploitation de l'enquête "morphologie".

- stratifications DENSBATIM et DENSBATIME : stratifications issues de la classification de l'image SPOT. Alors que la stratification DENSBATIM est directement issue de la stratification (brute), la stratification DENSBATIME est réajustée : on vérifie que l'unité enquêtée n'est pas atypique de sa strate d'affectation, dans ce cas l'affectation est alors modifiée.

Deux arguments militent pour cette correction, d'une part la totalité de l'îlot n'est pas systématiquement enquêtée, et d'autre part l'échantillon est très restreint (en effectif) et l'on ne peut donc pas se permettre de prendre en compte des îlots dont les caractéristiques ne correspondent pas à leur strate d'affectation.

Nous avons choisi de comparer ces trois stratifications DENSBATI, DENSBATIM, DENSBATIME en considérant

- un plan de sondage à probabilité proportionnelle à la surface totale des unités, (et non pas à la surface bâtie)
- l'allocation optimale de l'échantillon aux strates.(et non pas l'allocation proportionnelle).

Ces choix découlent des conclusions de O.BARBARY.

.Tableau 3 : Coefficients de variation des estimations des variables démographiques avec différentes stratifications.(Programme VARECH sous DBASE III)

VARIABLES	Non stratifié	Stratifié DENSBATI	Stratifié DENSBATIM	Stratifié DENSBATIME
EFFECTRES	25,42	12,30	12,69	16,40
NBMENAGES	26,26	12,19	12,57	16,44
NBMENPI	26,25	12,33	12,56	16,63
NBMENM7	27,14	12,40	12,83	16,83
EFFP5A	26,45	12,77	13,17	16,92
EFFNMIG	25,02	13,60	13,85	17,36
CEFFMIGM5	26,42	12,92	13,31	17,08

Quelque soit la variable démographique considérée, la stratification de l'espace établie à partir de l'image satellite (DENSBATIME) induit un gain d'environ 50% du coefficient de variation, soit une diminution de la variance d'un facteur d'environ 4,5 par rapport à un espace non stratifié

D'autre part, la stratification DENSBATIME apporte des gains très comparables à ceux de la stratification "de référence" DENSBATI. Comme le souligne O.BARBARY, "la différence entre les deux stratifications n'excède pas 1,5% du coefficient de variation non stratifié".

3.1.6) Evaluation de la précision des mesures de surfaces des îlots.

Introduction.

Evaluer la précision des mesures de surface des îlots enquêtés est important, car c'est un paramètre qui influe fortement sur la fiabilité de l'extrapolation des données démographiques à l'ensemble de la base de sondage. Les trois méthodes utilisées pour mesurer la surface :

- comptage automatique de pixels par programme informatique,
- millimétrage sur tirage photographique de l'image satellite,
- mesure sur le terrain,

vont être successivement évaluées par rapport à ce que l'on considère comme la référence :

- mesure au planimètre sur une cartographie à l'échelle 1/2000 (cartographie établie par l'IGM en 1982-84 pour la Mairie de Quito).

3.1.6.1) Sélection des îlots de l'échantillon.

Un échantillon de 90 îlots a été sélectionné de façon raisonnée parmi les îlots-échantillons précédemment caractérisés lors de l'enquête "morphologie", ou de l'enquête "démographie-migration". Il se décompose comme suit :

- 30 îlots appartenant à l'échantillon de l'enquête morpho.
- 30 îlots appartenant à l'échantillon de l'enquête "démographie-migration" repérés sur tirage photographique à l'échelle 1/15 000 de l'image SPOT de Juin
- - 30 îlots appartenant à l'échantillon de l'enquête "démographie-migration" non repérés sur tirage photographique et mesurés sur le terrain

Afin de tester l'influence de la taille et de la pente sur la précision des mesures de surface, un échantillon a été tiré de façon aléatoire à l'intérieur d'un tableau croisant la surface en 3 classes de taille (**petite, moyenne, grande**) et la pente en 3 modalités (**Plat, pente orientée Est, pente orientée Ouest**). Ce procédé permet d'évaluer l'influence d'une part, de la pente sur des mesures effectuées sur le terrain et d'autre part, de l'orientation de la îlot pour prendre en compte l'angle de visée important du satellite (19° Ouest).

De plus, en procédant de cette manière, nous conservons à l'intérieur du sous-échantillon, la représentativité des différentes modalités de tailles et de pentes de notre univers. Les calculs de précision recouvrent donc un sous-échantillon de mêmes caractéristiques dans chacun des sous-groupes.

3.2.6.2) Les différentes méthodes de mesure de la surface

. Méthode de mesure sur écran

Les îlots de l'enquête "morphologie" ont servi à initialiser et à valider les traitements de télédétection, ils ont donc été délimités sur une image panchromatique (Juin 1986, 19° W) sur écran . Nous avons donc généré

une image de ces îlots test (Figure 1) en décrivant leur contour sur l'image panchromatique à l'aide du curseur. L'estimation de la surface s'effectue donc simplement à partir d'un histogramme de l'image des îlots, chacun étant affecté d'une valeur différente. La précision de ce calcul est bien évidemment tributaire de la résolution spatiale de SPOT dans la bande panchromatique (pixel de 100 m^2).

Bien que l'image puisse être localement agrandie d'un facteur 2, 4 ou 8, les possibilités de biais dans la délimitation des îlots sont nombreuses.

Les îlots ne sont pas obligatoirement délimités par une voirie et même dans ce cas favorable, celle-ci n'apparaît pas toujours de façon nette sur l'image. Cependant, la cause principale d'une mauvaise délimitation résulte du fait que ces îlots ont été repérés sur la cartographie INEC à l'échelle 1/10 000 qui ne présente d'un point de vue géométrique que peu de ressemblance avec la réalité dès lors que l'on s'aventure hors de l'axe central Nord-Sud. En effet, le report sur l'image des limites cartographiées d'un îlot fait appel en grande partie à une reconnaissance visuelle des formes induites par le réseau de voirie. Le tracé imprécis de ce réseau sur la carte rend le repérage des îlots pour le moins ardu. De plus, l'épaisseur du contour (1 pixel de 10 mètres de côté) est incluse dans l'îlot et par voie de conséquence prise en compte dans l'évaluation de la surface ce qui constitue une source de biais non négligeable pour les petits îlots, en particulier lorsque la valeur radiométrique de la voirie ne tranche pas sur son environnement immédiat. On ignore alors si la voirie a été incluse ou non dans l'îlot.

. Méthode de mesure sur tirage photographique

Environ la moitié des îlots de l'enquête "démographie-migration" ont été repérés sur un tirage photographique du panchromatique de la même date à l'échelle 1/15 000 (Figure 2). Lorsque l'îlot est repéré avec précision et délimitée sans ambiguïté, nous avons mesuré la surface par superposition d'un plastique transparent millimétré, sinon un enquêteur est envoyé sur le terrain.

On notera un inconvénient et un avantage par rapport à la méthode précédente :

- il n'est pas possible de faire varier la dynamique de l'image en fonction du milieu sur lequel on travaille
- le repérage et la délimitation sont plus aisés et surtout visuellement moins fatiguants

Les causes d'erreur sont semblables à celles rencontrées sur écran. De plus compte tenu de l'échelle du tirage photographique (1/15 000) un mm^2 sur le tirage photo équivaut théoriquement à 225 m^2 sur le terrain; il est cependant "segmentable" contrairement au comptage sur écran qui ne considère que les pixels entiers. Cependant, l'échelle de ce document n'est pas exactement 1/15 000, mais plus précisément 1/15 362 après comparaison de longueurs mesurées suivant un axe plan Nord-Sud sur carte et sur tirage photographique, soit une équivalence effective 1 mm^2 sur tirage égale 236 m^2 sur le terrain.

. Méthode de mesure sur le terrain

Une fois sur place, l'enquêteur reporte avec précision sur un croquis les angles et les longueurs de chaque segment droit délimitant la îlot ainsi que leur pente (Figure 3).

Les longueurs sont mesurées au décimètre sur terrain en pente et au pas sur terrain plat, la longueur du pas ayant été préalablement étalonnée par comparaison avec les mesures effectuées au décimètre, les angles sont mesurés à la boussole à chaque extrémité d'un segment, ce qui autorise une vérification, en prenant comme référence le Nord géographique. La pente de chaque segment est mesurée au clinomètre.

La surface est ensuite calculée par programme informatique à l'aide du logiciel MacDraft™ sur Apple MacIntosh. Il suffit de dessiner à l'échelle choisie les contours de la îlots en respectant les longueurs préalablement corrigées en fonction de la pente, et les angles prescrits (Figure 4).

Les causes les plus fréquentes d'erreur sont essentiellement imputables à l'oubli du report d'une dizaine, voire d'une centaine de mètres sur le croquis. Dans ce cas, la zone ne ferme évidemment pas et l'îlot est alors "revisité".

. Méthode de mesure de la surface de référence

Les surfaces sont mesurées au planimètre électronique sur une carte à l'échelle 1/2 000 (Figure 5). Cette cartographie est de bonne qualité. L'opération de mesure est répétée plusieurs fois, une moyenne des surfaces non aberrantes est retenue.

Cette mesure peut être considérée comme fiable, les causes d'erreurs étant minorées par la multiplicité des mesures. Seule le repérage ou la délimitation de l'îlot peuvent occasionner des erreurs qu'il est alors facile d'éliminer, en cas d'incohérence des mesures.

3.2.6.3) Résultats comparatifs des 3 sources d'information

.Remarque liminaire

Les mesures ayant été effectuées comme indiqué précédemment, on confronte les résultats obtenus avec les mesures de référence. Les écarts trop importants justifient une comparaison plus approfondie des limites portées sur les différents documents. Dans notre cas, plusieurs îlots ont dû être redélimités plus précisément en prenant comme référence les contours définis sur les documents remplis sur le terrain.

La variable que nous étudions correspond à la **différence relative** constatée entre la surface mesurée et la mesure de référence pour chacune des 90 îlots de cet échantillon :

$$\Delta S = (S_e - S_m) / S_r$$

avec S_m : surface mesurée

et S_r : surface de référence

Afin de comparer quantitativement la fiabilité des 3 méthodes de mesure, nous avons retenu 3 critères qui caractérisent et synthétisent simplement les résultats obtenus :

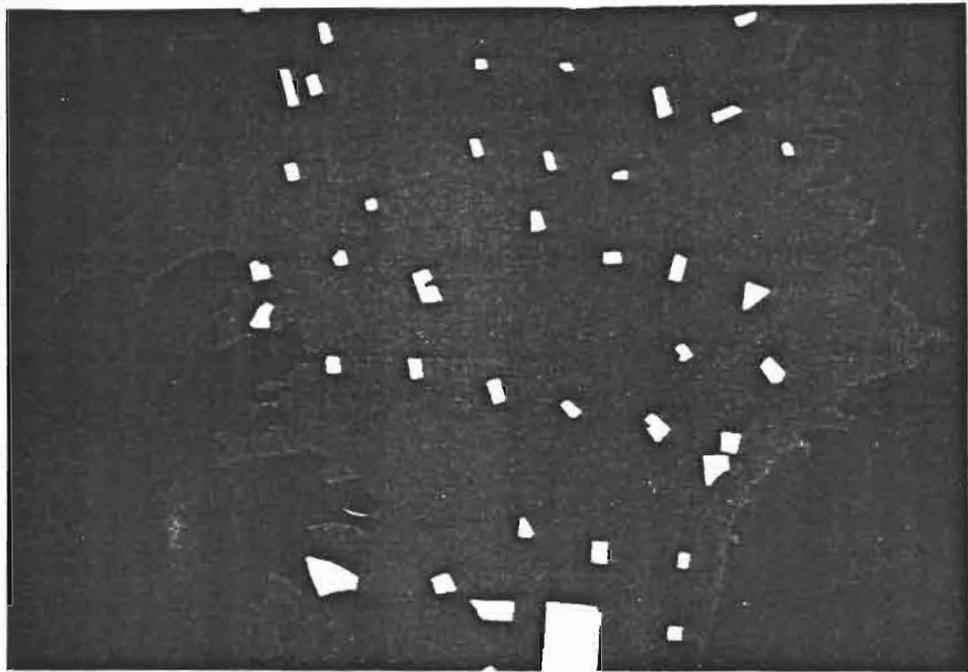


Figure 1 : Ilots de l'échantillon - Image centrale.



Figure 2 : Extrait de l'image panchromatique SPOT Juin 86 Echelle 1/15 000

Figure 3 : Croquis enquêteur
realise sur le terrain

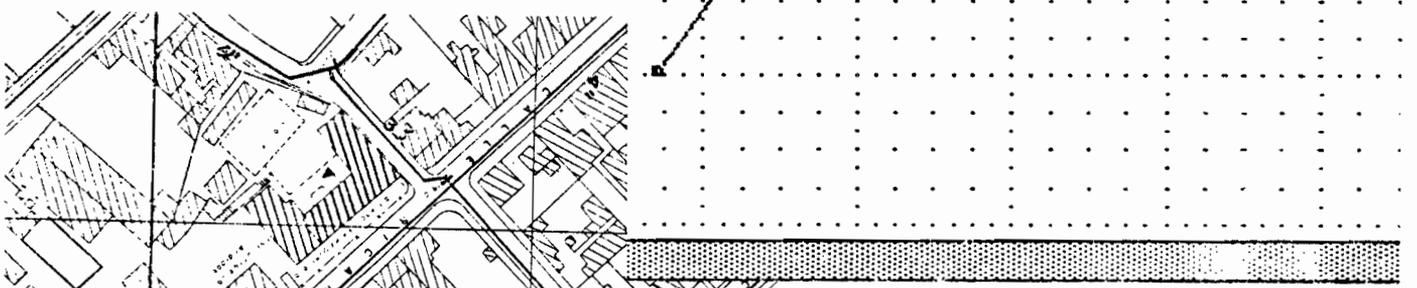
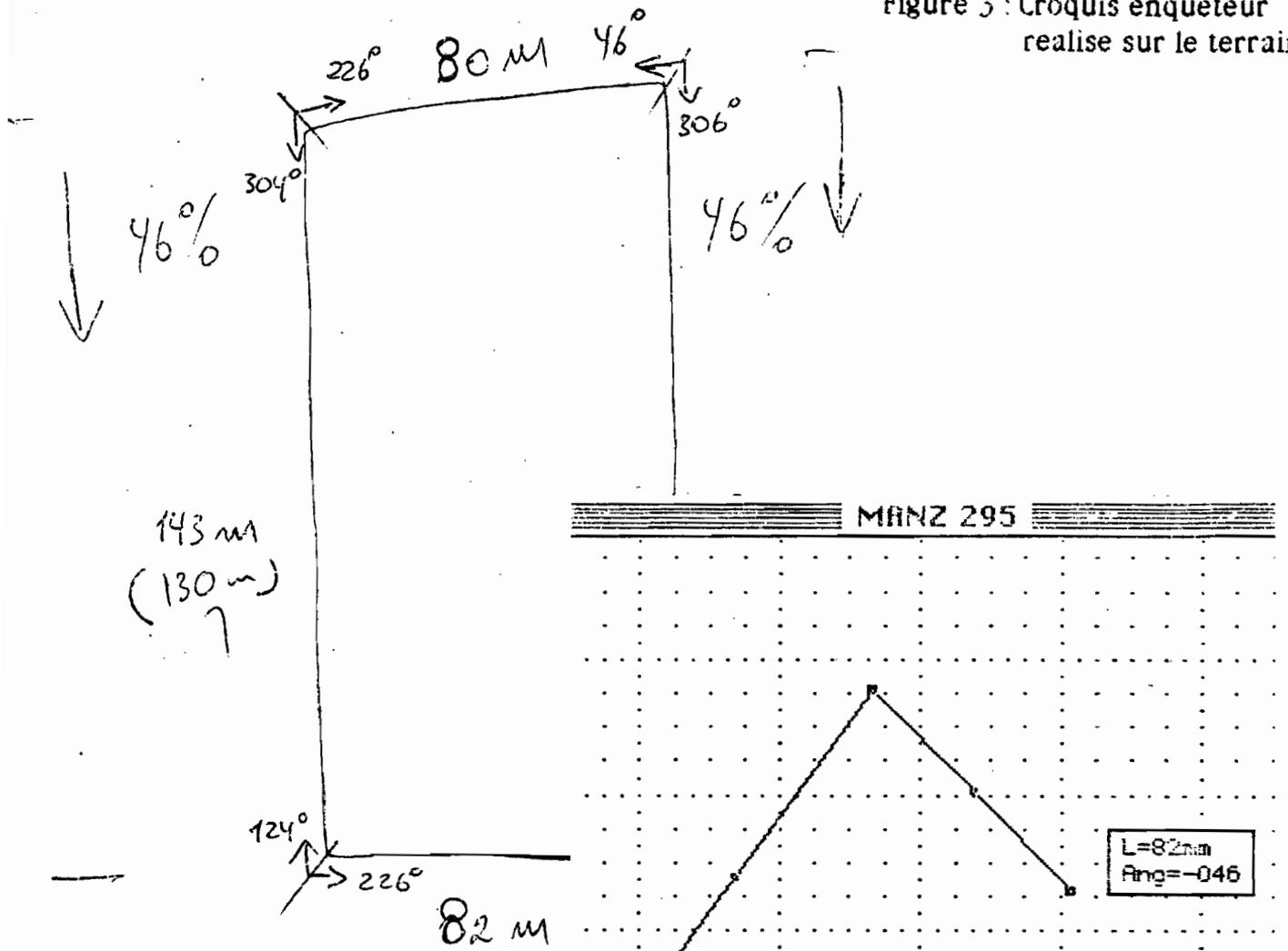


Figure 4 : Report du croquis sur Macintosh
Logiciel MacDraft

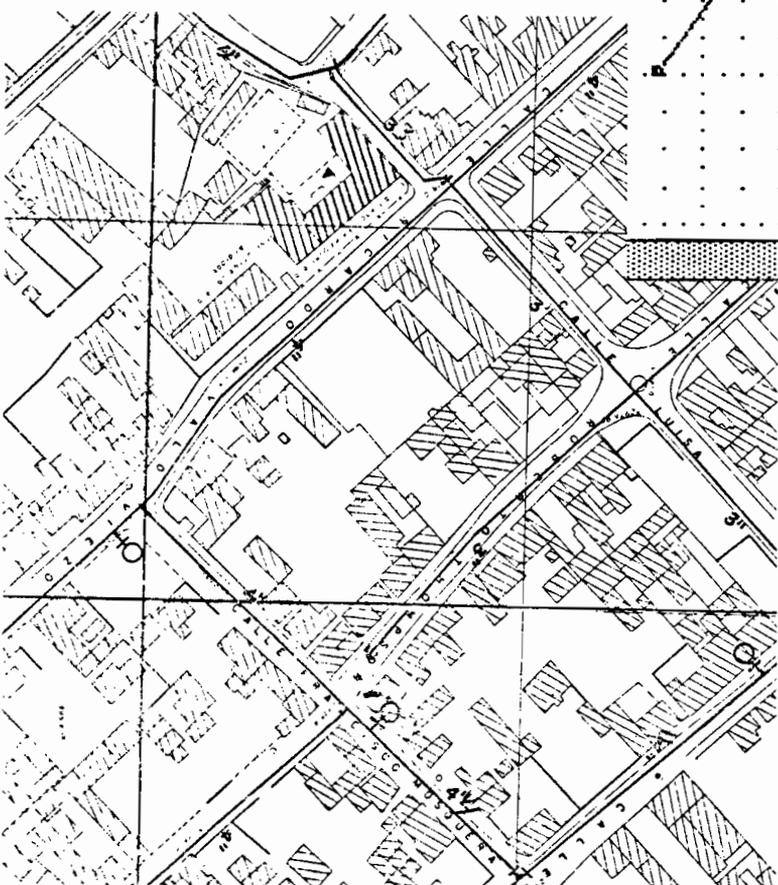


Figure 5 : Extrait d'une carte 1/2 000

- le quotient de la somme des surfaces mesurées par la somme des surfaces de référence (noté QUOTIENT), soit une tendance générale,
- la moyenne des valeurs absolues des différences relatives (notée MOYENNE), soit une estimation de la précision,
- l'écart-type des différences relatives (noté ECART-TYPE), soit une estimation de la fiabilité de la précision.

Origine	QUOTIENT	MOYENNE	ECART-TYPE
Mesures terrain	0.99%	8%	5.8
Mesures photo	0.92%	11%	7.3
Mesures image	1.03%	17%	10.7

Premiers résultats :

- les surfaces sont globalement sous-estimées par les mesures effectuées sur tirage photographique, sur-estimées sur écran, fidèles sur le terrain.
- les mesures sur écran sont moins précises (17%) que les deux autres méthodes qui obtiennent une précision comparable (8 et 11%)

. Influence de la taille des îlots sur la précision de la mesure de surface.

Origine	QUOTIENT	MOYENNE	ECART-TYPE
Mesures terrain			
Taille petite	1.01%	7%	5.9
Taille moyenne	1.03%	9%	6
Taille grande	0.94%	7%	3.2
Mesures photo			
Taille petite	0.86%	15%	7.4
Taille moyenne	0.96%	8%	6.0
Taille grande	0.92%	7%	4.3
Mesures image			
Taille petite	1.14%	19%	11.9
Taille moyenne	1.07%	16%	9.5
Taille grande	0.93%	14%	11.4

Commentaires.

Les surfaces sont globalement sous-estimées, pour les îlots de forte taille quelque soit la méthode employée, et sur-estimées pour les îlots de petite taille sur écran.

Les estimations de surfaces sont plus imprécises sur des îlots de faible taille, sauf pour les mesures terrain où ce sont les îlots de taille moyenne qui sont le plus affectées par cette imprécision. *A priori*, cela n'a rien

d'étonnant, l'influence de la délimitation d'un îlot sur la mesure de sa surface se faisant plus ressentir lorsque sa taille est faible. Par contre ce phénomène n'a aucune raison de jouer si l'on considère la mesure sur le terrain, seule la complexité du découpage de l'îlot pouvant alors entrer en jeu.

La fiabilité de la précision est comparable pour les mesures effectuées sur tirage et sur le terrain, quelque soit la taille de l'îlot. Par contre, cette fiabilité diminue sensiblement en ce qui concerne les mesures réalisées sur écran. La difficulté de délimiter correctement les îlots sur écran semble donc ne pas dépendre de la taille de la îlot.

Influence de la pente sur la précision de la mesure de surface.

Tableau 3			
Origine	QUOTIENT	MOYENNE	ECART-TYPE
Mesures terrain			
Plat	1.01%	9%	6.7
Pente	0.99	8%	4.1%
Mesures photo et écran			
Plat	1.00%	12.9%	6.6
Pente Ouest	0.92	17%	10.3
Pente Est	0.97%	14%	13.1

Commentaires.

Globalement, la pente affecte peu les mesures de surface effectuées sur le terrain (99% sur terrain en pente et 1,01% sur terrain plat), la précision des mesures est *quasi-identique*, et la fiabilité de la précision, du même ordre.

Par contre sur le document satellite (image sur écran ou tirage photographique), très logiquement les surfaces situées sur un flanc Ouest sont *sous-estimées* (conjugaison de la pente et de l'angle de visée), les surfaces situées sur un flanc Est "*redressées*" (influence opposée de la pente et de l'angle de visée) et les surfaces situées sur un espace plan *sur-estimées*. Ceci, bien entendu, en tenant compte de la sous-estimation systématique des mesures sur tirage photographique.

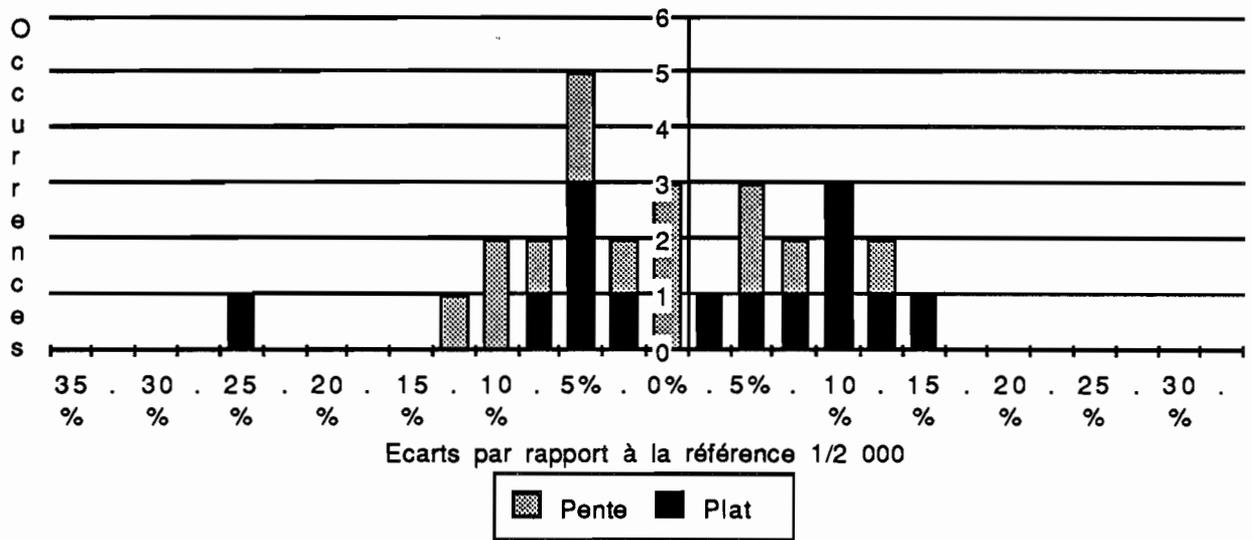
La précision de la mesure à partir des documents satellitaires est optimum sur terrain plat.

Les graphiques qui suivent illustrent ces phénomènes de façon plus précise. Il s'agit d'histogrammes des fréquences absolues des différences relatives constatées en tenant compte de la pente. Les fréquences des différentes modalités de pente sont superposées les unes sur les autres. Ces écarts (en pourcentage) sont classiquement négatifs à gauche de l'axe des ordonnées (effectif) et positifs à droite. Ils permettent aussi de se rendre compte de l'hétérogénéité des écarts entre les différentes méthodes de calcul utilisées. L'axe des abscisses (*différences*

relatives) est gradué de 2,5 en 2,5%.

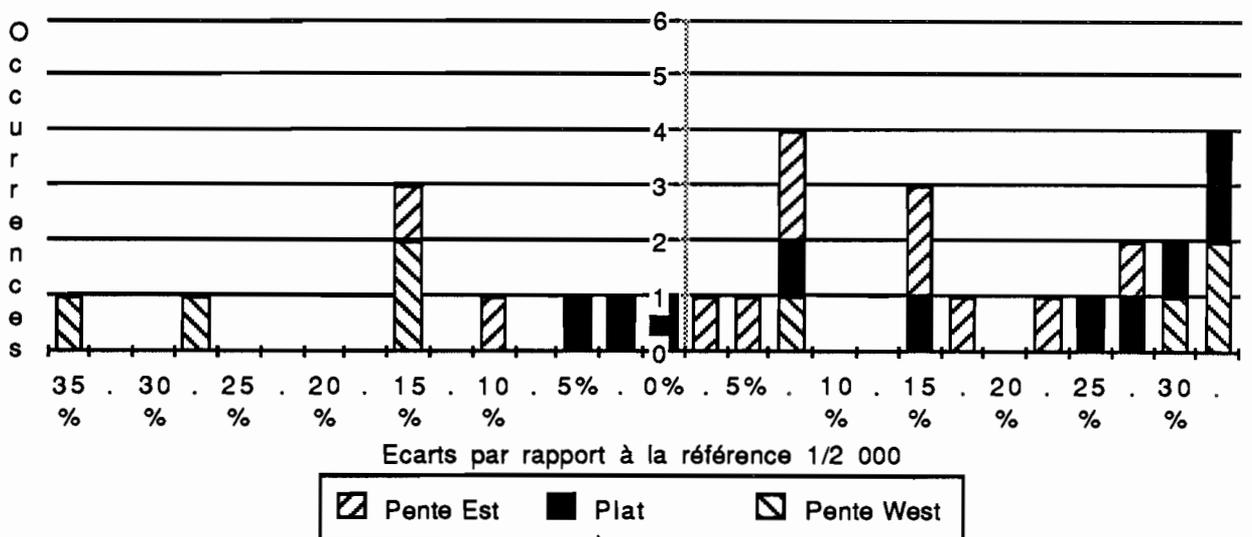
Graphique 1- Mesures terrain -

Fréquences des écarts relatifs
Mesures sur le terrain



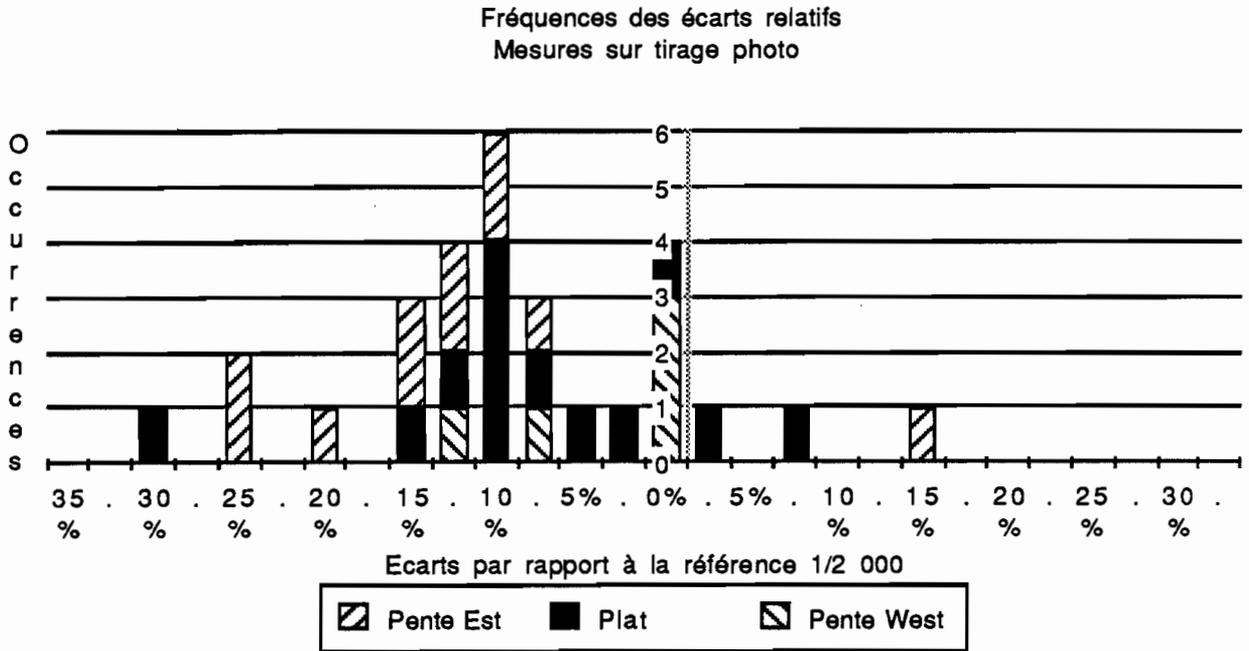
Les surfaces mesurées sur le terrain apparaissent comme remarquablement centrées autour de 0%, variant de -15% à 15%. Les mesures sur pente sont légèrement plus nombreuses à avoir été sous-estimées.

Fréquences des écarts relatifs
Mesures sur écran



La distribution des différences relatives constatées sur les mesures prises à l'écran ne présente pas une distribution particulière. Les

surfaces des îlots exposés sur un flanc Ouest demeurent les moins précises, aussi bien sur-évaluées que sous-évaluées.



Le centrage des données autour de -10% montre très nettement que les surfaces, toutes modalités de pente confondues ont été sous-estimées par cette méthode de calcul. Il s'agit ici d'un biais **systematique**; il est alors légitime de multiplier la surface ainsi obtenue par un coefficient de valeur 1.09 (1/0,92) pour tenir compte de cette sous-estimation.

La séparation entre îlots exposés Est (en majorité à gauche de -10%) et îlots exposés Ouest (en majorité à droite de -10%) est sur ce graphique plus flagrante que sur le graphique précédent.

Conclusions.

Mesures sur tirage photographique et sur le terrain pour les îlots à délimitation impossible sur image sont les deux méthodes qui seront retenues pour l'extrapolation des données démographiques. D'après nos évaluations, on est en droit d'attendre une précision d'environ 10 % sur l'ensemble de ces mesures. Par ailleurs, la mesure des surfaces des différentes strates de densité du bâti estimée par traitement d'image a été effectuée par millimétrage sur un tirage photographique à l'échelle 1/15 000. Seule une légère sous-estimation des surfaces, essentiellement non bâties, situées sur le flanc Est du Pichincha peut-être à déplorer; elle peut être aisément corrigée en intégrant les pourcentages obtenus à l'issue de nos calculs.

On notera avec intérêt, que c'est la mesure la plus facilement praticable dans les pays en développement (mesure sur le terrain) qui apparait comme la plus fiable.

Si les mesures de surfaces calculées sur ordinateur apparaissent comme moins sûres, une explication en forme de justification peut toutefois être avancée. L'objectif correspondait alors uniquement à initialiser puis à

valider les traitements de télédétection, non à calculer des surfaces, ce qui n'implique pas le même type de précautions quant à la méthode de travail. Dans ce cas, il importe essentiellement que tous les types de milieu urbain soient représentés. C'est pourquoi lorsque ces îlots ont été délimités, nous avons surtout accordé de l'importance à les localiser précisément. Dans le cas, pas si exceptionnel, où une délimitation précise était impossible, mais où la texture et les réponses spectrales étaient homogènes sur une grande surface autour de l'îlot test, nous avons quand même décidé de délimiter de façon *quasi* arbitraire un polygone afin de tenir compte de ce type de milieu urbain (comité del pueblo) ou péri-urbain, pour initialiser et le valider les classifications. Si l'objectif avait été de mesurer précisément les surfaces, nous aurions alors suivi la même démarche qu'en ce qui concerne la mesure sur tirage photographique, et nous n'aurions retenu que les îlots dont nous étions certains à la fois de la localisation et de la délimitation.

Annexe 21 du Rapport final ATP CNES/CNRS

PLAN D'EXPERIENCE SUR QUITO

F. DUREAU, Décembre 1986

A Quito, il s'agit d'appliquer les méthodes développées sur le "cas d'école" que constitue Marseille, où nous disposons, à des dates très voisines, de l'information démographique, morphologique et satellitaire : nous procédons sur la capitale de l'Equateur à la première application en vraie grandeur du système de production de données démographiques mis au point sur Marseille.

Cette application s'inscrit dans le projet Atlas Informatisé de Quito, auquel participent la Municipalité de Quito, l'I.G.M. (Institut Géographique Militaire), l'I.P.G.H. (Institut Panaméricain de Géographie et d'Histoire) et l'ORSTOM ; l'annexe 20 rappelle les termes de référence de ce projet.

Les principales étapes du travail, décrites dans la Figure 1, correspondent à celles qui auraient lieu, dans une phase opérationnelle, pour toute application de la méthode :

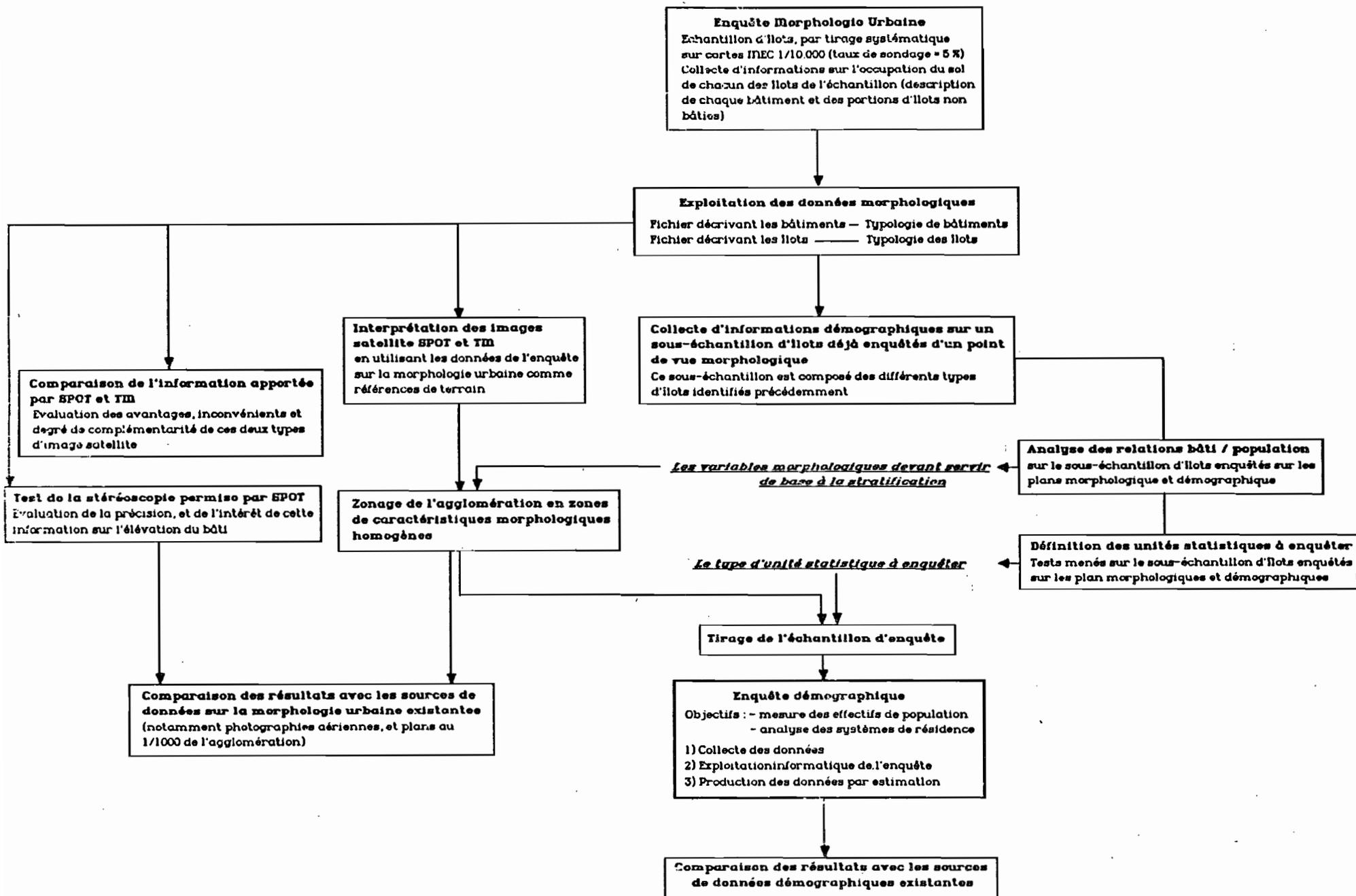
- *Enquête sur la morphologie urbaine*, où sont collectées des informations précises sur l'occupation du sol dans un échantillon d'îlots de Quito, afin d'initialiser l'*interprétation des images satellite*
- *Analyse des relations bâti/population*, sur un sous-échantillon des îlots enquêtés du point de vue morphologique (1)
- *Stratification* sur image satellite et *tirage de l'échantillon* d'enquête
- *Enquête démographique* : mesure des effectifs de population et analyse des systèmes de résidence
- *Exploitation de l'enquête*, production des données démographiques par estimation

Jusqu'à la production de données démographiques de l'enquête finale, nous n'utilisons que les documents de base susceptibles d'exister dans toute ville des pays en développement : image satellite, et plans de ville non actualisés. Les autres types d'information existant à Quito mais généralement pas dans d'autres villes ne seront consultés qu'à la fin de l'expérimentation, afin d'examiner la pertinence de nos résultats.

Ce contrôle ne pourra d'ailleurs pas être très précis, étant donné le décalage de temps entre la dernière couverture aérienne (1984) et le dernier recensement (1982), et nos propres observations (1986-1987). Néanmoins, nous pourrions ainsi contrôler, certes de façon assez grossière :

- l'interprétation des images satellite, en utilisant comme référence les photographies aériennes,
- les estimations d'effectifs démographiques, par rapport à des projections sous forme de "fourchettes" des chiffres du recensement de 1982

(1) En cas de renouvellement d'une collecte de données démographiques sur un même lieu, cette étape peut ne pas être indispensable.



Dans la conception générale de l'organisation du programme de recherche, nous avons choisi de réaliser sur le site de Marseille les développements méthodologiques. Néanmoins, quelques points de méthode non abordés à Marseille font l'objet de travaux spécifiques à Quito :

- *la définition des unités spatiales à enquêter* : à Marseille, du fait que nous utilisons des données du recensement pour calculer la variance des estimations, nous sommes dans l'obligation de travailler sur les districts de recensement définis par l'INSEE, c'est à dire un découpage spatial résultant de critères administratifs, démographiques et physiques. La prise en considération de ces différents paramètres aboutit à un découpage spatial en unités de taille très variable, et ne correspondant pas systématiquement à l'ilot urbain au sens physique du terme, c'est à dire le pâté de maisons.

A Quito, n'étant pas soumis à un découpage spatial imposé, nous pouvons *tester plusieurs types d'unité statistique* et rechercher ainsi celles qui, tout en restant praticables, offrent le moins de risques d'erreur pour la collecte des données et la meilleure précision des estimations démographiques. Ce test sera mené sur le sous-échantillon d'ilots où l'on dispose de l'information démographique et morphologique.

- *La stéréoscopie sur image satellite en milieu urbain* : le satellite SPOT, du fait des variations possibles de l'angle de visée, permet la vision stéréoscopique. Nous testerons sur Quito l'intérêt de cette nouvelle information en télédétection spatiale, son degré de précision pour l'appréhension des hauteurs de bâti.

- *Comparaison de l'information apportée par SPOT et par TM* : disposant de ces deux types d'image à des dates très voisines, respectivement août et septembre 1986, nous pouvons évaluer les avantages et inconvénients de chacune de ces sources d'information et leur degré de complémentarité.

Annexe 22 du Rapport-final ATP CNES/CNRS

ENQUETE MORPHOLOGIE QUITO (Octobre-Décembre 1986) : COLLECTE ET EXPLOITATION DES DONNEES

Françoise DUREAU et Alain MICHEL, Juillet 1987

La plupart des informations concernant cette enquête (méthodes de collecte et d'exploitation des données) sont fournies par le manuel d'instructions aux enquêteurs et le manuel de codification, reproduits à la fin de cette annexe ; nous nous limiterons donc ici à quelques brefs compléments d'information.

1. OBJECTIFS DE L'ENQUETE

La collecte de données sur la morphologie urbaine répond à deux objectifs.

L'objectif principal de cette première enquête réalisée à Quito est de *recueillir une information précise sur l'occupation du sol dans un certain nombre d'îlots de Quito afin d'initialiser l'interprétation des images satellite* devant servir de base de sondage à l'enquête démographique d'Octobre 1987 (voir le plan d'expérimentation à Quito en annexe 21).

L'image SPOT la plus récente qui soit à notre disposition, a été enregistrée le 26 Novembre 1986 et l'image Thematic Mapper que nous avons acquise est du 15 Septembre 1986 : cette concomitance (1) de l'enquête terrain et des enregistrements par les satellites nous place dans de bonnes conditions pour l'exploitation des documents satellitaires.

Un second type d'exploitation rend nécessaire cette enquête morphologie : les données morphologiques constituent une des deux informations nécessaires *pour pouvoir préciser la stratégie de sondage à mettre en oeuvre pour l'enquête démographique finale* à Quito. En effet, ces données morphologiques, exploitées conjointement avec les données démographiques recueillies au cours d'une seconde enquête (enquête "habitat-population", décrite dans l'annexe 24), permettront de répondre aux questions suivantes :

- quels sont les descripteurs de la morphologie urbaine les plus pertinents pour l'observation démographique à Quito?
- quelles sont l'unité spatiale de collecte et la stratégie de sondage pertinentes pour une enquête démographique à Quito?

(1) Il faut toutefois signaler que cette concomitance entre enregistrement SPOT et relevés-terrain résulte plus de la chance que d'une programmation très maîtrisée : ce n'est que deux mois après la fin de l'enquête que nous avons été avertis par SPOT IMAGE de l'existence de ces images. Cette première expérience montre les difficultés à mettre en oeuvre un plan de collecte des données incluant l'enregistrement d'une image Spot ; il est vrai que nous sommes à l'étranger, sur une zone que les conditions météorologiques rendent difficile à observer, mais ce seront justement les conditions d'application de la méthode de collecte démographique que nous cherchons à développer.

2. SELECTION DE L'ECHANTILLON

Pour la sélection de l'échantillon de l'enquête morphologie comme pour toute l'expérimentation menée à Quito, nous n'utilisons que les documents de base susceptibles d'exister dans toute ville d'un pays en développement. C'est donc sur un plan de Quito non actualisé que nous avons réalisé la sélection de l'échantillon : les plans au 1/10.000 établis par l'INEC en 1982 pour le recensement général de la population.

La technique d'échantillonnage a été des plus simples ; nous avons opté pour un *tirage systématique sur grille plaquée sur les plans INEC*. Ayant fixé le taux de sondage à 5 % (résultat issu des travaux en sondages spatiaux réalisés par O. BARBARY sur Marseille), connaissant approximativement le nombre total d'îlots de Quito et la surface totale occupée par la ville, nous en avons déduit la taille moyenne d'un îlot (au sens "paté de maisons") à Quito et la taille de la maille de la grille : 750 mètres de côté.

Nous avons donc tracé sur calque un carroyage de 7,5 cm de côté que nous avons superposé au plans INEC au 1/10.000. Pour chaque intersection de la grille, on incluait dans l'échantillon l'îlot qui contenait cette intersection.

Dans le cas où une intersection de la grille tombait sur une rue, une règle systématique était appliquée pour déterminer un îlot voisin à inclure dans l'échantillon ; si nous n'avions pas procédé ainsi, le taux de sondage aurait été inférieur à 5 %.

Par ce mode de tirage, la probabilité pour un îlot d'appartenir à l'échantillon est proportionnelle à sa surface ; de ce fait, certains très grands îlots ont été tirés plusieurs fois (ils contenaient plusieurs intersections de la grille). Nous avons pratiqué un tirage "sans remise", en reportant les intersections appartenant à un même îlot sur des manzanas voisines.

Nous avons ainsi constitué un échantillon de 195 îlots, par tirage systématique sur carte.

Les cartes de l'INEC datant de 1982, elles ne couvrent pas les extensions de la ville de 1982 à 1986 ; il a donc fallu compléter notre échantillon tiré systématiquement sur document cartographique par quelques îlots de la périphérie dont le type morphologique n'était pas représenté dans l'échantillon initial. Cet ajout de 4 îlots s'est fait en fin d'enquête, une fois bien connues par l'équipe les caractéristiques morphologiques de l'échantillon enquêté et celles des extensions récentes de Quito.

Au total, notre échantillon compte donc 199 îlots.

3. ELABORATION DES DOCUMENTS D'ENQUETE

Comme l'indique le manuel d'instructions aux enquêteurs, chaque îlot de l'échantillon est décrit par trois types de documents :

- **Carte** : sur le fond de plan INEC agrandi au 1/500 (1), sur lequel ne figure au départ de l'enquête que les limites de chaque îlot à enquêter, les enquêteurs établissent la cartographie de l'occupation du sol de l'îlot. Tous les bâtiments ainsi que tous les éléments non bâtis doivent figurer sur ces plans.

- **Fiche de description des bâtiments** : chacun des édifices dessinés sur la carte est décrit sur cette fiche. Il est repéré par un numéro de 1 à n.

- **Photographies** : pour chaque îlot, les chercheurs de l'Orstom font des photographies depuis un point surplombant l'îlot (étage élevé d'un immeuble ou relief), et au sol, en bordure et/ou à l'intérieur de l'îlot. Ces photographies sont destinées à préciser et contrôler l'information recueillie par les enquêteurs.

La connaissance du bâti et du non bâti acquise lors de diverses sorties sur le terrain effectuées à Quito nous a permis de modifier en l'adaptant la fiche d'enquête conçue et expérimentée à Marseille ; les conseils de collègues de l'équipe Atlas connaissant bien la ville nous ont aidé à préciser les termes à employer pour caractériser les différents matériaux de construction utilisés à Quito et à adapter les fiches en fonction des possibilités et des conditions d'enquête propres à ce site. Une relecture de ces fiches a ensuite été faite par un architecte équatorien.

Nous avons testé avec les enquêteurs équatoriens recrutés pour l'enquête le caractère opérationnel de ces fiches à l'occasion d'une première sortie commune sur le terrain. La méthode de collecte a été décrite avec précision dans le **manuel d'instructions aux enquêteurs**, afin qu'ils puissent s'y référer en cas d'ambiguïté.

4. COLLECTE DES DONNEES

La procédure de collecte des données étant décrite précisément dans les points 3 et 4 du manuel d'instructions aux enquêteurs, nous ne donnerons ici que quelques précisions sur les temps et conditions de collecte.

Temps de collecte

La collecte des données (remplissage des questionnaires et établissement des schémas sur les plans au 1/500) a été réalisée par deux enquêteurs entre le 1er Octobre et le 9 Décembre 1986 ; la moyenne d'un îlot par demi-journée, estimée au début de l'enquête d'après notre expérience marseillaise, s'est donc vérifiée.

Quant aux photographies prises depuis des immeubles ou des points hauts de la ville, elles ont nécessité environ 20 matinées de travail à deux personnes ; 10/12 îlots par demi-journée semble le maximum qui puisse être fait, compte tenu des temps de déplacement et de discussion pour avoir accès aux sommets des immeubles.

Conditions de collecte

Les enquêteurs n'ont pas eu de difficulté à collecter l'information : ce type d'enquête ne réclame que peu de participation de la population, puisqu'elle ne nécessite que l'autorisation d'accéder aux terrasses des maisons ou immeubles. Pour tous les îlots, cette autorisation a pu être obtenue sans problème majeur, quelque soit le type de quartier de Quito.

(1) Etant donné le rapport d'agrandissement nécessaire pour passer de l'échelle disponible pour les cartes INEC (1/3500) à l'échelle du 1/500, et l'existence de surcharges rendant ces cartes impropres à leur usage direct pour cette enquête, nous avons dû établir ces fonds de plan manuellement : il s'est agi de tracer au pantographe les limites de tous les îlots de l'échantillon au 1/500. Ce travail a nécessité environ 50 heures de travail.

5. CODIFICATION, SAISIE, CONTROLES DE COHERENCE ET RECODAGE

Codification

La codification a été réalisée par F. DUREAU selon les principes décrits dans le manuel de codification reproduit en fin d'annexe. Elle a été établie à partir de toutes les données collectées au cours de l'enquête : questionnaires, plans au 1/500, photographies. Ces photographies se sont révélées fondamentales pour préciser l'information collectée par les enquêteurs : ce sont des documents qu'il faut s'efforcer de recueillir lors de toute collecte de données-terrain en milieu urbain. Outre leur rôle de contrôle du travail des enquêteurs, ils apportent l'information qualitative complémentaire des données quantitatives des questionnaires simplifiés que nous utilisons.

Le principe général de la fiche de codification est le suivant : constituer deux fichiers, l'un décrivant les bâtiments, l'autre les "manzanas" (c'est à dire pâtés de maisons). Le fichier des bâtiments ne décrit pas les bâtiments un par un, mais par groupes de bâtiments d'une manzana qui présentent des caractéristiques semblables ou très voisines ; ce sont ces groupes que nous appelons "genres".

Cette procédure répond à plusieurs besoins :

- pouvoir classer d'une part les bâtiments, d'autre part les manzanas : les manzanas de Quito ne sont pas toutes homogènes. Il nous importe de voir l'influence respective des caractéristiques du bâtiment, de la manzana, et de la localisation dans la ville sur les caractéristiques socio-démographiques des résidents.
- le fichier des bâtiments pris individuellement aurait été trop volumineux pour être traité sur l'IBM AT du programme ; d'où la nécessité d'effectuer un premier regroupement au sein de chaque manzana lors de la codification. En procédant de la sorte, nous obtenons 2134 genres de bâtiments, ce qui est déjà très lourd pour des classifications sur IBM AT.

Saisie

Les fiches de codification ont été saisies sous DBASEIII, sur l'IBM AT, en une dizaine d'heures à deux personnes.

A l'issue de cette phase de saisie, nous disposons de deux fichiers :

QMANZANA : fichier descriptif des 199 manzanas enquêtées (recto de la fiche de codification)

champs 1-3 : identification manzana

champ 4 : identification enquêteur

champs 5-7 : mesure de surface

champs 8-10 : typologies (sources exogènes, estimations enquêteur et codificateur)

champs 11 - 42 : description de l'espace bâti

QBATIMEN : fichier descriptif des 2134 genres de bâtiments (verso de la fiche de codification)

champ 1 : identification manzana

champ 2 : identification du genre dans la manzana

champ 3 : nombre de bâtiments du genre dans la manzana

champ 4 à 13 : caractérisation du genre

Contrôles de cohérence : redressement des mesures de bâtiments

L'analyse des tableaux de fréquence et histogrammes nous ont permis de corriger quelques erreurs de codification ou de saisie. Le point principal sur lequel ont portés les corrections a été la surface des bâtiments ; ce point étant crucial pour l'exploitation que nous faisons de cette enquête, nous exposons donc brièvement ci-après la technique de redressement adoptée.

Redressement des mesures de bâtiments

Il avait été demandé aux deux enquêteurs de mesurer les dimensions au sol des bâtiments en comptant leurs pas, après avoir étalonné ceux-ci en effectuant leurs premières mesures avec un décamètre.

La comparaison des histogrammes des surfaces des bâtiments de chacun des enquêteurs, sur un échantillon de bâtiments censés avoir sensiblement les mêmes dimensions, nous a montré que l'un des deux enquêteurs avait sous-estimé les surfaces d'environ 20 % par rapport à l'autre enquêteur (ce dernier ayant une bonne appréciation des mesures).

Nous avons donc corrigé le fichier des bâtiments en **augmentant de 20 % toutes les surfaces mesurées par l'enquêteur n° 1.**

Les surfaces des bâtiments ont ensuite été réparties en 10 modalités, selon les bornes de classe ci-dessous :

SEUILLAGE DES SURFACES DE BATIMENTS			
Classe 1	1 - 14 m2	Classe 6	125 - 184 m2
Classe 2	15 - 29 m2	Classe 7	185 - 224 m2
Classe 3	30 - 49 m2	Classe 8	225 - 499 m2
Classe 4	50 - 79 m2	Classe 9	500 - 999 m2
Classe 5	80 - 124 m2	Classe 10	1000 - 14999 m2

Recodages

Au vu des histogrammes, deux autres variables ont été seuillées :

SEUILLAGE DU NOMBRE D'ETAGES (Rdc inclus)			
Classe 1	1 étage	Classe 5	5 étages
Classe 2	2 étages	Classe 6	6 à 9 étages
Classe 3	3 étages	Classe 7	10 à 15 étages
Classe 4	4 étages		

SEUILLAGE DU NOMBRE DE PANS DU TOIT			
Classe 0	0 pans	Classe 3	3 pans
Classe 1	1 pan	Classe 4	4 pans
Classe 2	2 pans	Classe 5	5 pans et plus

Document n°1
Annexe 22

QUITO - Enquête morphologie urbaine
Octobre / Décembre 1986

INSTRUCTIONS AUX ENQUETEURS

Orstom - IPGH

SOMMAIRE

	Page
1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES	3
1. 1. Le programme de recherche	3
1. 2. L'enquête morphologie urbaine	4
2. TECHNIQUE D'ENQUETE	5
3. ORGANISATION DU TRAVAIL	6
4. COLLECTE DE L'INFORMATION	7
4. 1. Principes de base	7
4. 2. Description des bâtiments	8
4. 3. Description des éléments non bâtis	13
5. EXEMPLE D'ILOT A ENQUETER	16
NOTES PERSONNELLES	19

1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

1.1. Le programme de recherche

L'objectif du programme de recherche est de mettre au point un système d'observation permanent des populations urbaines, en intégrant l'information satellitaire sur la morphologie urbaine : suivi des effectifs et caractéristiques générales des populations, et mise en oeuvre de sondages spatiaux stratifiés sur des images satellites SPOT ou THEMATIC MAPPER, pour des investigations approfondies sur le comportement des citadins.

Deux idées sont à la base de ce programme :

- Seul un système basé sur la technique des sondages peut remplir les conditions de souplesse et rapidité nécessaires dans les villes à croissance rapide
- Une meilleure connaissance de l'espace urbain constitue un facteur important d'amélioration d'un système d'enquête démographique par sondage : pour l'établissement d'une base de sondage correcte et à jour, composée d'îlots clairement définis, pour l'optimisation du sondage par stratification sur la morphologie urbaine, et pour l'obtention de résultats localisés, selon un découpage significatif de la ville enquêtée.

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, par sondage, des données relatives aux populations urbaines. Les travaux réalisés (par VERNIERE notamment) sur photographies aériennes ont montré que l'application de ce principe permet un allègement de l'échantillon d'enquête (donc, pour un même coût global et un même niveau de précision, une possibilité d'approfondir l'observation) et une spatialisation des résultats.

La réalisation de l'objectif général du programme implique des travaux, en parallèle, dans quatre directions :

- L'interprétation des images satellite à haute résolution en milieu urbain
- Les relations bâti/population et les sondages spatiaux en démographie
- L'intégration des données de télédétection dans des bases de données

localisées

-La télédétection comme système autonome d'observation démographique

Nous avons débuté nos travaux en 1985 sur la ville de Marseille (FRANCE), qui possédait dès cette date toutes les données nécessaires à une première phase de développement méthodologique.

Sur la ville de Quito, trois types d'enquête devront être réalisées :

- Enquête morphologie urbaine
- Enquête morphologie/démographie
- Enquête démographie : effectifs de population et systèmes résidentiels

1. 2. L'enquête morphologie urbaine

La première enquête que nous réalisons à Quito dans le cadre de ce programme de recherche a pour objectif de collecter des informations précises sur l'occupation du sol, c'est à dire la morphologie urbaine, de la ville de Quito.

L'observation au sol de la morphologie urbaine sur un échantillon d'îlots de Quito est indispensable pour interpréter les images satellite : ce n'est qu'en confrontant les données de terrain relevées au cours de l'enquête morphologie, et les données radiométriques enregistrées par les satellites, que l'on pourra interpréter correctement les images satellites de Quito. La connaissance de la morphologie urbaine sur l'échantillon d'îlots sert à établir les "clefs d'interprétation" qui seront appliquées aux images satellites sur l'ensemble de la zone urbanisée de Quito.

L'échantillon à enquêter du point de vue morphologie urbaine est constitué de 189 îlots, tirés sur les cartes INEC de 1982 au 1/10000, à l'aide d'une grille de 750 mètres de côté. L'information sur l'occupation du sol doit être recueillie précisément et exhaustivement sur ces 189 îlots, durant les mois d'Octobre, Novembre et Décembre 1986.

2. TECHNIQUE D'ENQUETE

Chaque îlot de l'échantillon est décrit par trois types de documents :

- **Carte** : sur le fond de plan INEC agrandi au 1/1000, sur lequel ne figurent au départ de l'enquête que les limites de chaque îlot à enquêter, les enquêteurs établiront la cartographie de l'occupation du sol de l'îlot. Tous les bâtiments ainsi que tous les éléments non bâtis devront figurer sur ces plans.
- **Fiche de description des bâtiments** : chacun des édifices dessinés sur la carte est décrit sur cette fiche. Il est repéré par un numéro de 1 à n.
- **Photographies** : pour chaque îlot, les chercheurs de l'Orstom feront des photographies depuis un point surplombant l'îlot (étage élevé d'un immeuble ou relief), et au sol, en bordure et/ou à l'intérieur de l'îlot.

Pour chaque îlot de l'échantillon, il doit y avoir concordance complète de l'information contenue dans ces trois documents, à partir desquels seront codés les descripteurs de la morphologie urbaine, sur une fiche de synthèse qui servira aux traitements informatiques.

3. ORGANISATION DU TRAVAIL

Tous les lundi matin, chaque enquêteur se verra attribuer la liste d'îlots à enquêter dans la semaine : il s'agit d'une liste bien précise d'îlots appartenant à l'échantillon. La liste sera établie en fonction des principes suivants :

- un îlot, en moyenne, nécessite une demi-journée (4 heures) de travail pour être enquêté correctement.
- les îlots seront regroupés géographiquement, afin de minimiser les temps de déplacement.

Pour chacun des îlots de la liste hebdomadaire, l'enquêteur recevra une carte au 1/1000, ainsi que des fiches de description.

Des modifications du tissu urbain ayant pu se produire depuis 1982 (date d'établissement de la cartographie INEC), un chercheur accompagnera l'enquêteur pour vérifier la délimitation de tous les îlots que ce dernier doit enquêter durant la semaine.

Afin de rechercher collectivement des solutions aux problèmes rencontrés au cours de la collecte d'informations et de vérifier la cohérence des cartes et fiches de description par rapport aux photographies, deux rendez-vous sont fixés chaque semaine : le mercredi et le vendredi en fin d'après midi.

En cas d'incomplétude ou d'incohérence des cartes et fiches de description, il sera demandé aux enquêteurs de retourner sur le terrain pour corriger ou compléter l'information.

4. COLLECTE DE L'INFORMATION

4. 1. Principes de base

La première opération consiste à **rechercher une vision d'ensemble de l'îlot, depuis un point surplombant l'îlot** : étage élevé d'un immeuble voisin de l'îlot, ou relief. Ainsi, l'enquêteur pourra procéder plus aisément à :

- la cartographie des éléments bâtis et non bâtis composant l'îlot
- la numérotation de ces éléments
- au remplissage des questions relatives aux toits des bâtiments

D'autre part, certains éléments de l'occupation du sol ne sont visibles qu'en surplombant l'îlot, et non depuis les rues jouxtant l'îlot : cette première phase d'observation depuis un point élevé est donc particulièrement importante.

Dans un second temps, l'enquêteur procédera au remplissage des fiches de description, et complétera le plan d'après ce qui est **visible depuis les rues bordant l'îlot, et les cours ou passages intérieurs, s'ils sont accessibles.**

Enfin, si certaines réponses demeurent impossibles à obtenir par une vision directe, l'enquêteur questionnera les résidents de l'îlot pour obtenir l'information.

4. 2. Description des bâtiments

Pour chaque manzana, l'enquêteur remplit une ou plusieurs fiches de description des bâtiments, selon le nombre de ceux-ci ; chacun des bâtiments est dessiné sur le plan de l'îlot, et décrit dans une colonne de la fiche descriptive.

Définition du bâtiment

On appelle bâtiment toute construction en élévation, en cours ou achevée, à usage d'habitation ou non, qui comporte (ou comportera quand elle sera totalement achevée) au moins un toit supporté par des poteaux.

On inclue donc dans cette catégorie les hangars ou les garages couverts non fermés par des murs, les passages couverts entre bâtiments, les grandes citernes ou silos.

Les bâtiments en construction sont inclus à partir du moment où les fondations sont recouvertes d'un matériau de construction.

Limites du bâtiment

Les limites de chaque bâtiment doivent figurer sur le plan. Dans le cas où il s'agit de constructions jointives, il peut être délicat de déterminer les limites. On adoptera les conventions suivantes :

- a) Tissu urbain continu (type centre historique de Quito) : chaque immeuble est individualisé. L'observation des toitures peut permettre de lever les ambiguïtés sur les limites d'immeubles.
- b) Immeuble élevé avec garage attenant (1 seul niveau) : on distingue deux bâtiments, l'immeuble et le garage, qui ont des caractéristiques architecturales bien différentes.
- c) Villa composée de blocs de constructions de différents niveaux : on ne compte qu'un seul bâtiment pour l'ensemble (y compris le garage), si ces blocs appartiennent visiblement à une même unité d'habitation.
- d) Immeuble élevé composé de différents blocs de constructions de différents niveaux présentant une unité architecturale : on ne compte qu'un seul bâtiment.

Numéro du bâtiment

Tout bâtiment situé dans l'îlot est identifié par un numéro de 1 à n. A chaque îlot, la numérotation redémarre à 1 ; au sein d'un même îlot, deux bâtiments ne doivent pas porter le même numéro. Sur la carte, ce numéro est indiqué au centre du bâtiment ; sur la fiche, il est noté en haut de chacune des colonnes.

Stade de construction

Il s'agit de distinguer :

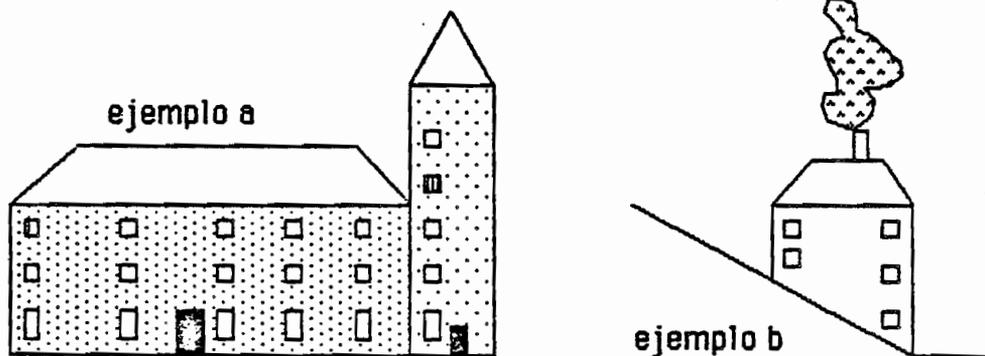
- En construction : bâtiment en chantier (à partir du moment où les fondations sont recouvertes d'un matériau de construction) non encore habitable (par exemple, toiture non terminée, vitres non posées...etc)
- Terminé : bâtiment habitable, dont l'étanchéité est assurée (toit, portes et fenêtres), même si les finitions intérieures (peinture, carrelage...etc) ne sont pas faites.

Un bâtiment habitable dans les étages inférieurs, dont le dernier niveau est constitué d'une dalle de béton avec des poteaux en béton, ou des fers à béton qui dépassent, est considéré comme "terminé".

Nombre d'étages

Nombre d'étages que comporte le bâtiment, y compris le rez de chaussée, et non compris les penthouses.

Si, en terrain plat, un même bâtiment complexe comporte différents nombres d'étages selon les parties du bâtiment, indiquer le nombre minimal et le nombre maximal (exemple a : 3/5, pour décrire un bâtiment comptant 3 étages dans une partie, et 5 dans l'autre).

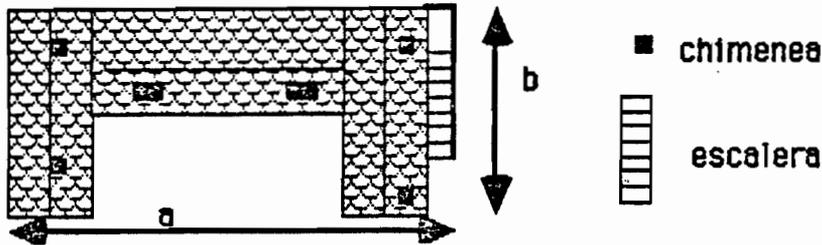


Si en raison d'une forte pente, un bâtiment compte 2 étages sur un des côtés et 3 étages sur un autre, en contrebas, indiquer le nombre d'étages minimal et maximal (2/3 dans l'exemple b), et ne pas oublier de noter la pente du sol sur le plan d'ilot.

Dimensions au sol

Les côtés a et b désignent les côtés du plus petit rectangle incluant le bâtiment (y compris les escaliers extérieurs menant aux étages du bâtiment).

Ces côtés a et b sont indiqués sur le plan de la façon suivante :

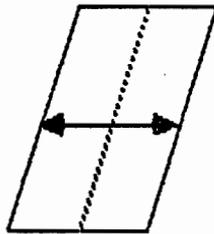
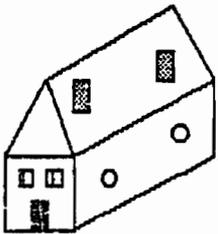


Sur la fiche de description des bâtiments, les mesures des côtés sont exprimées en mètres.

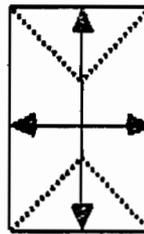
Nombre de pans du toit

Toit plat : Nombre de pans = 0. Ne rien indiquer sur le plan.

Toit avec pente(s) : Indiquer le nombre de pans sur la fiche, et le sens de la pente pour chacun des pans sur le croquis de l'îlot par une flèche dirigée vers le bas de la pente.



Toit à 2 pans



Toit à 4 pans

Matériau prédominant du toit

Il s'agit du matériau qui occupe la plus grande surface sur le toit.

Dans le cas où le toit est composé de plusieurs matériaux occupant des surfaces sensiblement égales, indiquer ces différents matériaux sur la fiche, et les délimiter sur le plan.

En dehors des matériaux les plus courants cités sur la fiche, pour lesquels il suffit de mettre une croix dans la case correspondante, on peut rencontrer à Quito d'autres types de matériaux pour les toitures : shingle, verre, carrelage ...etc. Dans ce cas, il faut indiquer en clair la dénomination du matériau, si elle est connue, ou, sinon, décrire précisément ce matériau sur la fiche "observations complémentaires".

Couleur prédominante du toit

Indiquer la couleur occupant la plus grande surface sur le toit du bâtiment, en faisant attention d'être cohérent avec le matériau prédominant : c'est la couleur du(des) matériau(x) prédominant(s) que l'on doit indiquer.

Forme du matériau du toit

Sur la fiche, dans la colonne relative au bâtiment, faire un croquis, en coupe, du matériau prédominant du toit.

Exemples de formes possibles selon les matériaux :

Dalle de béton, carrelage, paille : _____

Eternit :  ou _____

Tuiles :  ou _____

Nombre de cheminées

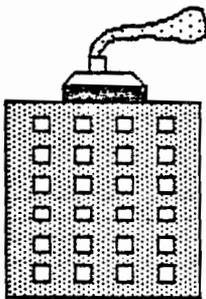
Indiquer le nombre de cheminées présentes sur le toit du bâtiment.

Présence de poteaux

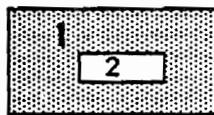
Nous retrouvons ici le cas des bâtiments habitables dans les étages inférieurs et dont le dernier étage est constitué d'une dalle en béton, d'où émergent des fers à béton ou des poteaux en bétons.

Présence de penthouse

S'il y a une penthouse (c'est à dire un petit bâtiment sur la terrasse supérieure d'un immeuble) sur un bâtiment, la dessiner sur le plan, lui attribuer un numéro et reporter celui-ci à la fois sur le plan et dans la colonne du bâtiment sur lequel elle est située (en face de la ligne "présence de penthouse") et la décrire dans une autre colonne de la fiche, comme si c'était un bâtiment indépendant.



Edificio de 6 pisos con un penthouse



Croquis sobre el plano

Nombre de citernes

Indiquer le nombre de citernes couvertes présentes sur le toit du bâtiment : on désigne sous le terme de "citernes" les réservoirs d'eau qui servent à alimenter en eau le bâtiment en cas de coupure ou insuffisance du réseau public de distribution d'eau potable.

Présence de végétation

Indiquer s'il y a "aucune", "peu", "beaucoup" de végétation :

- sur les balcons saillants : balcons dépassant du mur extérieur du bâtiment
- sur la terrasse du toit

Autres observations sur les bâtiments

Dans cette rubrique, préciser rapidement une information incomplète dans les rubriques prévues par le questionnaire, ou indiquer la présence éventuelle d'éléments non répertoriés (capteurs solaires sur le toit par exemple). Si nécessaire, utiliser la fiche "observations complémentaires", en spécifiant bien le numéro du bâtiment dont il s'agit.

4. 3. Description du non bâti

Définition

On appelle "non-bâti" toute la surface de l'îlot où il n'y a pas de bâtiment.

Chaque zone homogène (du point de vue de l'occupation du sol) constitue un "élément non bâti".

La somme des surfaces occupées par des bâtiments, et des surfaces occupées par des éléments non-bâti, doit correspondre à la surface totale de l'îlot (ce dernier incluant les rues qui bordent l'îlot jusqu'à la moitié de la chaussée).

Pente du sol

Indiquer sur le plan de l'îlot la pente du sol par une flèche :

- Pente faible ou nulle —————→
- Pente moyenne —————→→
- Pente forte —————→→→

Identification

Chaque élément non bâti et homogène de l'îlot doit être dessiné sur le plan : l'enquêteur lui attribue une lettre de A à Z (lettres majuscules), qui indique le type de non bâti. Sur le plan de l'îlot, cette lettre doit être inscrite au centre de la zone occupée par cet élément non bâti.

Sur la nomenclature (page 14), sont répertoriés 20 types de non bâti : si un élément correspond à un de ces types, l'enquêteur utilisera toujours ce codage. Pour toute autre catégorie de non bâti, il utilisera une autre lettre (U à Z), et indiquera sa signification sur la fiche "Observations complémentaires"

Si plusieurs éléments non bâtis d'un îlot sont du même type, la lettre qui correspond à ce type sera répétée dans chacune des zones occupées par ces éléments.

Végétation

Délimiter et identifier la végétation à l'intérieur de l'îlot, ainsi que sur la voirie qui le borde. Ne pas oublier la végétation sur les trottoirs (pelouse, arbres..)

Ne délimiter les arbres un par un que s'ils sont réellement isolés.

Si il y a une rangée d'arbres ou un groupe d'arbres, ne considérer la rangée ou le groupe que comme un seul élément non bâti (lettre G)

Si l'espèce est connue, l'indiquer sur la fiche "Observations complémentaire".

Voirie

On appelle voirie : les rues y compris les trottoirs et le terre-plein, les parkings, les cours, les passages intérieurs (sans toit) de l'îlot, les allées, les escaliers au sol.

QUITO - Morphologie- Oct./Dec. 1986

Description du non bâti

Indiquer sur le plan la pente du sol et la présence de quebrada

E
A
U

- A - rivière
- B - canal
- C - réservoir d'eau, bassin (sans toit)
- D - piscine

V
E
G
E
T
A
T
I
O
N

- E - pelouse
- F - fleurs
- G - arbres (noter l'espèce)
- H - arbustes sans fleurs
- I - arbustes avec fleurs
- J - potager
- K - pâturage
- L - champ cultivé

V
O
I
R
I
E

- M - bitume
- N - pavés ou dalles en béton
- O - pierres
- P - terre ou sable

V
O
I
T
U
R
E
S

- Q - avec des voitures en circulation
- R - avec des voitures en stationnement
- S - sans voitures

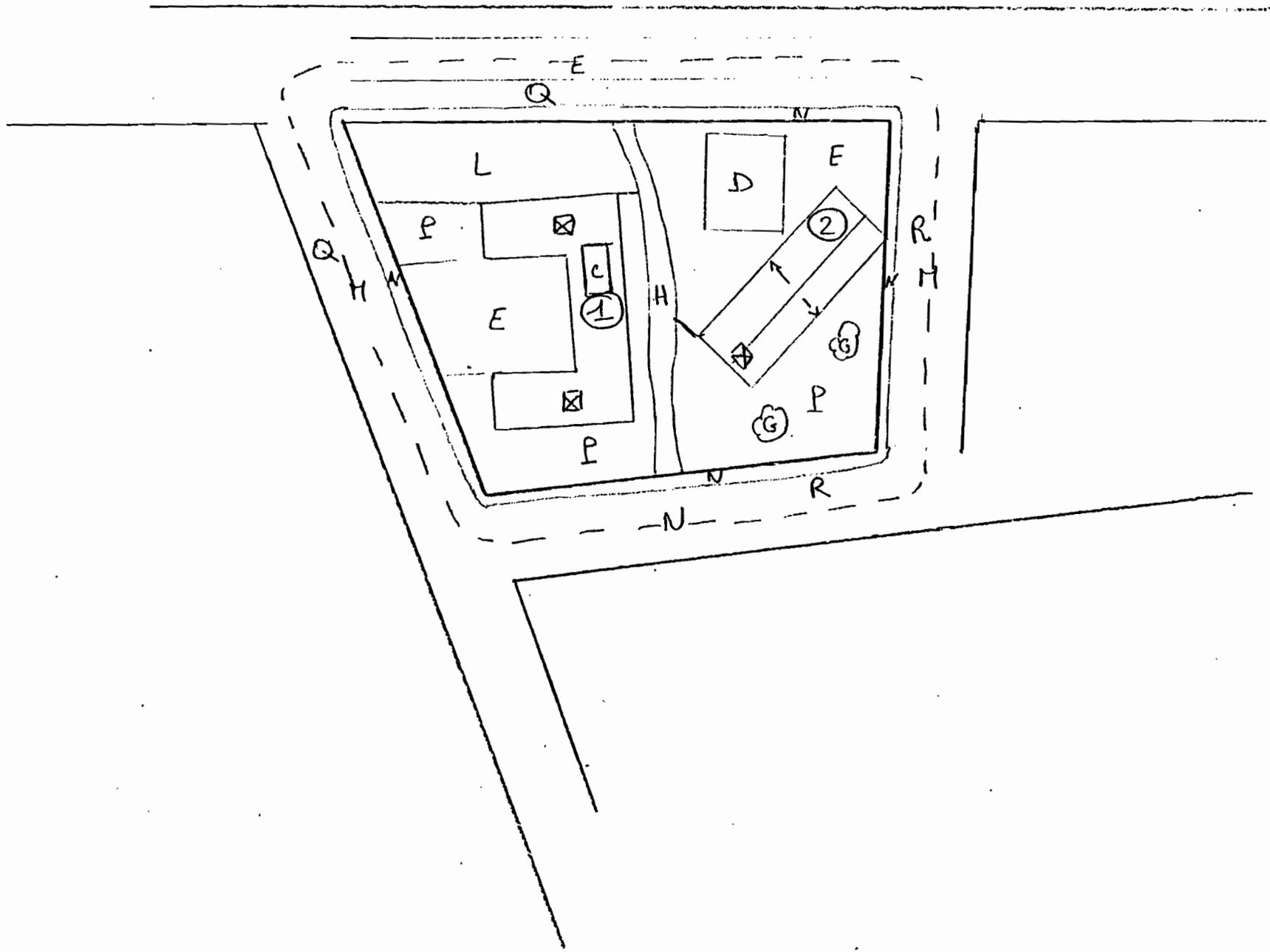
AUTRES

- T - mur de cloture

Pour toute autre catégorie de non bâti (par ex., carrelage..etc.) utiliser une lettre de U à Z, et noter sa signification sur la fiche "autres observations".

Si il y a beaucoup de matériaux entreposés sur le sol, distinguer la zone qui est couverte par ces matériaux de la zone qui n'est pas couverte, chacune de ces zones correspondant à un élément non bâti.

Utiliser une lettre de U à Z encore non utilisée pour les matériaux, et indiquer la signification de cette lettre sur la fiche "Observations complémentaires."



QUITO-Morphologie-Oct./Dec 1986

Numero d'îlot :		DESCRIPTION DES BATIMENTS				
Date:	Heure:					
Numero du batiment correspondant au repère porté sur le plan						
D	<u>Bâtiment:</u> Terminé	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	En construction	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<u>Nombre d'étages (y compris RDC)</u>	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Dimensions au sol :</u> Côté a	-----	-----	-----	-----	-----
	Côté b	-----	-----	-----	-----	-----
	(Indiquer ces côtés sur le plan)					
	<u>Nombre de pans du toit (0 si plat)</u>	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Materiau prédominant du toit</u>					
	Dalle de béton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Eternit ou similaires	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Zinc ou similaires	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Tuiles vernies	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Tuiles sans vernis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Paille ou similaires	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Autres (shingle, carrelage..)	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Couleur prédominante du toit</u>					
	(Blanc, Marron foncé, Marron clair, Gris, Brique, Noir, Rouge ou Vert)	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Forme du matériau du toit</u>					
	(Faire un croquis en coupe)					
	<u>Autres éléments sur le toit</u>					
	Nombre de cheminées	-----	-----	-----	-----	-----
	Presence de poteaux en béton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Presence de penthouse (à décrire)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nombre de tanques	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Presence de végétation</u>					
	Sur les balcons saillants	-----	-----	-----	-----	-----
	Sur le toit	-----	-----	-----	-----	-----
	<i>Autres observations sur le batiment</i>	-----	-----	-----	-----	-----

D
I
M
E
N
S
I
O
N
ST
O
I
TA
U
T
R
E
S

QUITO-Morphologie-Oct./Dec 1986

Numero d'îlot: 48

OBSERVATIONS COMPLEMENTAIRES

Date: 1/10/86 Heure: 15h

Description du type d'îlot (notamment le standing de l'habitat): Résidentiel haut standing

Détails sur la description des bâtiments ou du non bâti de l'îlot :

Annexe 26 du Rapport final ATP CNES/CNRS

STRATIFICATION ET CARACTERISATION DES QUARTIERS DE QUITO
Une recherche en cours : l'analyse numérique des textures de
l'image et des structures urbaines (image SPOT du 26/11/86) (*)

Jean Michel EBERHARD, Juillet 1987

Dans le cadre d'une recherche de DEA, nous cherchons à caractériser et stratifier les quartiers de Quito.

Deux axes essentiels guident cette étude : l'analyse de la texture de l'image, l'approche de la structure urbaine.

Cette recherche étant actuellement en cours, il n'est pas question d'exposer ici des résultats, mais de présenter la démarche adoptée pour cette expérience menée sur l'image SPOT, panchromatique, du 26/11/1986 ; le chronogramme présenté page suivante rappelle les différentes étapes du test.

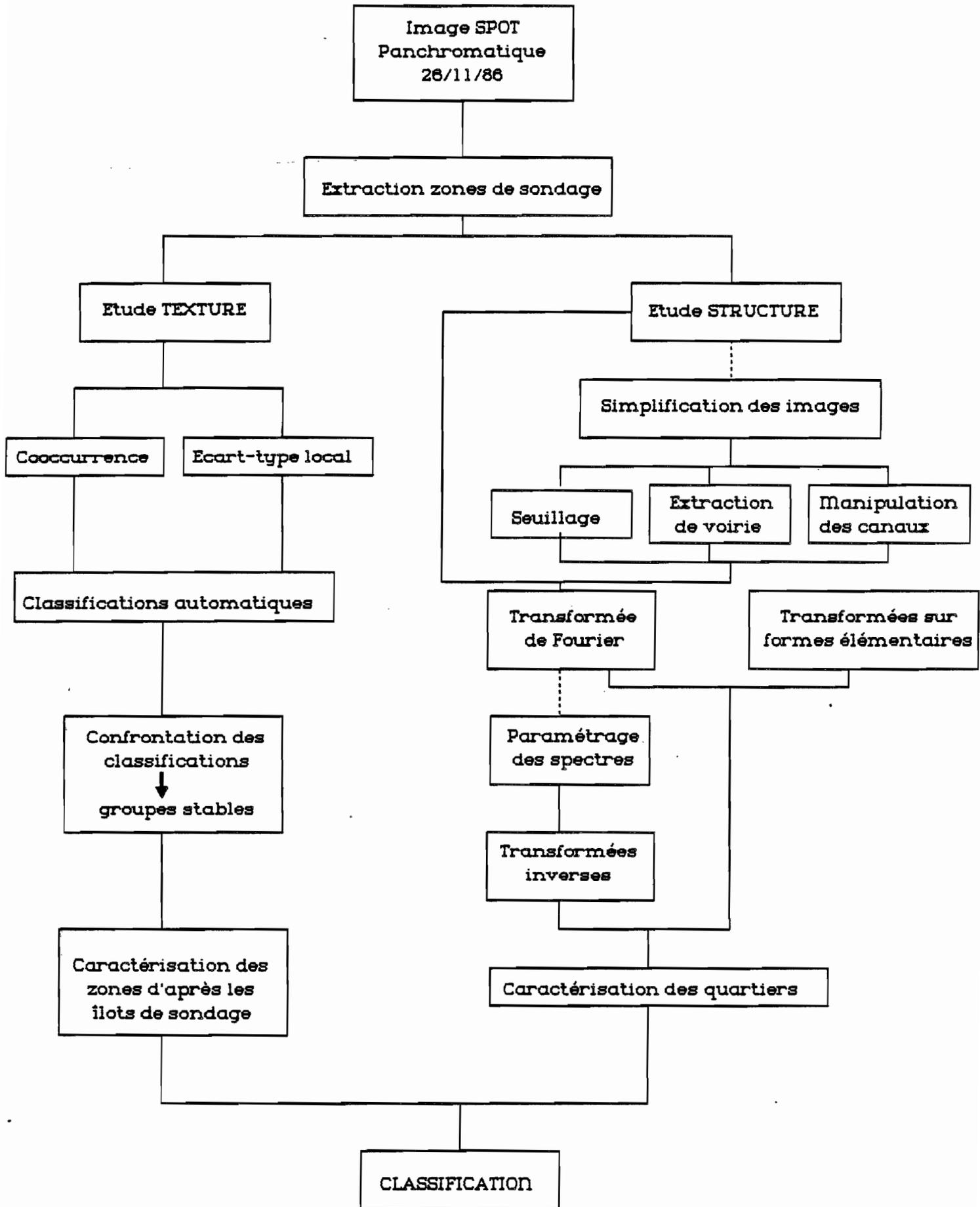
1. Choix de l'échantillon-test

Les îlots enquêtés lors de l'enquête morphologie réalisée fin 1986 à Quito (voir description de l'enquête en annexe 22) nous ont conduit au choix des imagettes échantillon extraites de l'image SPOT générale.

58 imagettes carrées et de taille fixe ont été délimitées directement sur l'image d'après leur aspect homogène et leur représentativité des différents types de quartiers de la ville. Leur forme carrée et leur dimension (64 pixels de côté) sont dictées par la nécessité de simplifier les calculs de certains algorithmes (Transformée de Fourier), et par l'obligation de satisfaire un compromis : disposer d'une quantité d'informations suffisantes, tout en respectant l'homogénéité des quartiers, en termes de structure et de texture perçus visuellement. Des zones de 640 m de côté nous sont apparues comme offrant les meilleurs conditions.

La méthode retenue est celle des **matrices de cooccurrence**, dont le programme informatique a été développé à l'ATOB par A. MICHEL pour ses recherches sur Marseille. La méthode, qui traite les différences de réflectance entre pixels voisins, produit des couples de valeurs regroupés en un nuage.

(*) Cette étude fait l'objet du stage de DEA de géographie (Université de Nanterre, DEA "Pratique du développement dans le Tiers-Monde") de J.M. EBERHARD à l'Atelier de Télédétection de l'Orstom à Bondy, sous la direction de B. LORTIC.



2. Analyse de la texture sur imagerie

Des paramètres (1) caractérisent ce nuage en termes d'entropie, de resserrement ou de dispersion à l'axe principal et, indirectement, caractérisent l'image elle-même : "rugosité", existence de plages uniformes, distribution des valeurs dans l'image... La méthode rend possible l'examen du voisinage selon divers angles.

Une **Analyse en Composantes Principales** sur les paramètres fournis permet de dégager :

- une assez grande corrélation de paramètres entre eux
- la primauté de l'entropie et du second moment angulaire,
- 3 grands groupes d'individus, et un certain nombre d'autres, plus petits.

Une **seconde étude sur les voisinages de pixels à 315° (-45°)** montre les mouvements d'un certain nombre de textures (de zones) d'un groupe à l'autre, par rapport à l'analyse à 0°. Les redistributions de groupe, faibles il est vrai, pourraient constituer une première approche de la structure...

Des précisions supplémentaires seront peut-être apportées par l'examen des **écart-type locaux** (programme RMS). Notons que cette méthode s'est révélée plutôt décevante sur Marseille.

3. Analyse de la structure

Il s'est agi de tester l'apport d'un outil mathématique, la **Transformée de Fourier**, méthode utilisée en sciences physiques pour l'étude des phénomènes périodiques, notamment optiques. Déjà utilisée à l'Orstom, cette technique a permis de mettre en évidence avec un certain succès des structures dunaires (cf. C. MERING, Y. PONCET, M. RAKOTO).

Dans le domaine urbain, les images obtenues sont d'une grande complexité, surtout avec une résolution de 10 m (voir les 3 exemples de spectres de Fourier au début de ce rapport). Cette richesse en information peut apparaître comme nuisible dans une étude de structure, le "bruit" risquant de couvrir le "signal".

Le programme de Transformée de M. RAKOTO calcule les spectres de Fourier d'après la fréquence des variations dans les valeurs radiométriques. Les figures obtenues, "reflets" des images de base, très complexes, sont d'une interprétation difficile. Seules les structures fortement marquées, visibles sur l'image, se signalent ; les réseaux à fréquence basse sont peu ou pas repérables sur le spectre, tandis qu'au contraire, des "pics" semblent se dégager, que l'interprétation visuelle n'identifie à aucune structure.

La voirie géométrique et régulière, les alignements du bâti apparaissent donc sur les spectres, et si les effets d'ombre, les délimitations "floues", perturbent la régularité des structures, il reste que l'on peut envisager la conception de procédés automatiques, sophistiqués, qui permettraient l'extraction des quartiers "organisés",

(1) Paramètres : second moment angulaire, homogénéité locale, degrés d'organisation du nuage, valeur moyenne des coordonnées des couples dans le nuage.

et de les classer. En travaillant directement sur le spectre, on pourrait, par exemple, quantifier les "pics", leur "inertie", leur direction, éventuellement explorer leur voisinage et les associer à d'autres.

A ces méthodes, toutefois, des restrictions immédiates :

a) les spectres doivent être comparables entre eux, c'est à dire étalonnés d'une manière identique, ce qui peut poser des problèmes de seuillage ;

b) le degré de "sensibilité" : quelle sera la limite inférieure, la puissance minimale des pics, qui délimitera les quartiers structurés de ceux considérés comme non-organisés?

c) la méthode de Fourier produit un artéfact qui peut être gênant : "les harmoniques". Sur le spectre, en effet, les formes produites se répètent à intervalle régulier et viennent se superposer, brouiller l'information intéressante (pourtant, les harmoniques sont proportionnelles à la fréquence et constituent eux-mêmes un indicateur) ;

d) les accidents de terrain, les phénomènes naturels (ruptures de pente, cours d'eau, ombres du relief ...) influencent le spectre ; ils peuvent même faire apparaître des structures qui n'ont rien d'urbaines. Un système d'extraction, donc, devrait prévoir l'influence des conditions physiques, peut-être comparer le spectre et l'image de base...

e) il faut faire attention aux effets de lignage et autres artéfacts (barrettes...)

On conçoit que, d'une manière générale, **le spectre de Fourier ne peut en aucun cas se substituer à l'image, et ne constitue qu'un outil d'assistance à l'interprétation.**

De rapides études sur des images élémentaires montrent que les spectres "accusent" les irrégularités. L'habitat symbolisé sur l'image test par de points multicolores, produit dans le spectre un bruit important et des pseudo-périodes dues au seul fait que l'image est constituée de lignes et de colonnes, c'est à dire par définition d'une trame régulière.

D'où l'idée de **simplifier l'image, d'éliminer l'information inutile, avant de la soumettre à la Transformée.** Les simplifications possibles sont multiples.

On peut, par exemple, **réduire le nombre de classes de niveaux de gris**, à 3 ou 4. Là se pose le problème de la pertinence des seuillages : un mauvais seuillage peut faire disparaître complètement une structure. Par ailleurs, sur une image donnée, les pixels d'une même structure peuvent appartenir à des niveaux très différents, d'autant plus aisément que la structure est fine (voirie) et que la composition du pixel est influencée par l'environnement.

Pour ces raisons, de telles démarches sont peu satisfaisantes. Les seuils judicieusement choisis permettent néanmoins, dans l'ensemble, un rehaussement des pics et une relative simplification de l'information.

Mais d'autres moyens sont susceptibles d'améliorer la perception des structures. **La transformée inverse**, suite logique de la première étape de la méthode, permet de reconstituer une image à partir du spectre. ; dès lors, en filtrant le bruit sur le spectre lui-même, on arrive à synthétiser une image dépourvue d'une partie de son

information.

Un autre moyen de simplification consisterait à étudier la structure après l'extraction de voirie proposée par A. MICHEL (voir annexe 25) ; mais c'est là faire un peu un a priori et réduire la structure urbaine à la seule voirie, alors que l'agencement de l'habitat n'est pas moins intéressant.

Ces quelques méthodes d'analyse d'image rappellent les difficultés de rassembler des caractéristiques de nature différente : si l'on appréhende la texture de l'image en composition d'éléments lumineux, leur distribution est quantifiable.

En revanche, la notion de structure, vue ici comme l'agencement spatiale de ces éléments entre eux, fait appel à des concepts subjectifs. Mais, si certaines formes d'organisation de l'espace restent inaccessibles aux moyens automatisés, il se trouve que l'une des structures possibles, les phénomènes agencés périodiquement, sont quantifiables par un outil mathématique.

INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES SUR LA PROBABILITE D'OBTENTION D'UNE IMAGE SATELLITE SPOT OU THEMATIC MAPPER.

Etude sur le site de Quito, Equateur.

Alain MICHEL , Quito Septembre 1987

Problématique:

- Quelle est la probabilité d'obtenir une image pour un mois déterminé, en admettant une quantité maximum de nébulosité? En ce qui concerne SPOT, on prendra en compte les différents angles de visée possibles.
- Quelle est l'importance d'autres facteurs météorologiques: vitesse du vent, précipitations. Ces facteurs interviennent t-ils de façon significative pendant les périodes où la nébulosité est minimum?
- Existe-t-il des mois qui thématiquement sont prépondérants ou indispensables? La thématique urbaine est-elle compatible avec la météorologie?

Table des matières.

Introduction

Site et climat de Quito

Thématique et météorologie

1. Recueil des données météorologiques

1.1. Origine des données

1.2. Type des données recueillies

1.2.1. La nébulosité

1.2.2. Les précipitations

1.2.3. La vitesse du vent

1.3. Période et fréquence des données

2. Traitement des données météorologiques

2.1. Fréquence relative de la nébulosité par mois. (Figures 3, 4 et 5)

2.2. Probabilité d'obtenir une image

2.3. Les précipitations

2.4. Les vents.

Conclusion

Introduction.

Site et climat de Quito.

Quito se situe au pied et pour partie sur les flancs Est du volcan Pinchincha (4794 m d'altitude) et domine la vallée andine sur sa partie Est.

"Le climat quiténien est de type mésothermique équatorial semi-humide"¹. L'existence d'un fort gradient pluviométrique du Nord (800 mm) vers le Sud (plus de 1400 mm) sur une distance d'environ 35 Km induit une forte différenciation entre la végétation que l'on rencontre au Nord (sèche) et au Sud (activité chlorophyllienne plus intense) de la ville. Ce phénomène est essentiellement imputable au volcan Pinchincha qui protège le Nord de la ville des vents humides provenant du Sud-Est².

Thématique et météorologie.

En milieu urbain, l'espace intersticiel végétal, dont la prise en compte est indispensable pour discriminer les différents types d'espaces bâtis, est sensible aux changements induits par certains facteurs météorologiques. Certaines périodes de l'année apparaissent donc comme privilégiées. Lors du passage du satellite, l'importance de la nébulosité ambiante est le facteur essentiel qui détermine la proportion d'image utilisable. Cependant, de multiples impératifs inhérents à l'avancement d'un programme fixent une date à ne pas dépasser pour obtenir une image. Il importe donc de concilier ces considérations, ce qui nous amène à exprimer le problème dans les termes suivants: **quelle est la probabilité pour un mois arrêté thématiquement intéressant (ou indispensable) d'obtenir une image comportant une quantité de nuages inférieure à un maximum donné ?** Une telle probabilité doit tenir compte des caractéristiques propres de chacun des satellites (répétitivité et heures de passage pour SPOT et Thematic Mapper, possibilité de visée oblique pour SPOT).

La connaissance et le traitement des données météorologiques permettent de calculer ces probabilités. De plus, la prise en compte d'informations telles que les précipitations et la vitesse du vent précise la période de l'année la plus propice à l'enregistrement des images satellite.

1. Recueil des données météorologiques.

1.1. Origine des données.

A Quito, les relevés météorologiques quotidiens (**Figure 1 et 2**) de la station de l'aéroport "Mariscal Sucre" relatifs aux 10 dernières années sont regroupés dans les bureaux de la Direction de l'Aviation Civile. L'aéroport se situe dans la partie nord de la ville et constitue la seule station météorologique où sont effectués des relevés horaires de nébulosité. L'importance du recueil de ces données pour l'aviation constitue une garantie de fiabilité suffisante pour notre propos.

1.2. Type des données recueillies.

1.2.1. La nébulosité.

La nébulosité est estimée visuellement toutes les heures. Elle s'exprime en octas, 1/8 de ciel couvert que le météorologue observe dans son champ visuel. Il répartit ensuite ces octas en fonction du type et donc de l'altitude des nuages. Nous avons relevé l'indication **totale** de nébulosité tous types de nuages confondus à 9H, 10h et 11H, ces 3 heures englobant les heures de passage des satellites Thematic Mapper et SPOT. (respectivement 9h30 et 10h30 heure locale) au dessus de Quito.

1.2.2. Les précipitations.

Deux types d'appareils sont utilisés pour mesurer la quantité de précipitation: le pluviomètre et le pluviographe. Nous avons opté pour ce dernier, plus précis et dont aucune mesure n'était absente dans la période considérée, ce qui n'était pas le cas des

Figure 1 - Relevé météorologique quotidien, verso-

REGISTRO DIARIO DE OBSERVACIONES DE SUPERFICIE

DIRECCION GENERAL DE AVIACION CIVIL
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA AERONAUTICA

ESTACION _____
LAT. _____ LONG. _____ W. _____ ELEV. _____ m.
FECHA: _____

Horas de Observación		VIENTO				TEMPERATURA Y HUMEDAD								PRESION ATMOSFERICA BAROMETRO							N U B O S I O A D													
																					CAPAS SIGNIFICANTES													
																					C _L		C _M		C _H		I CAPA			II CAPA			III CAPA	
CANTIDAD	GENERO	ALTURA	CANTIDAD	GENERO	ALTURA	CANTIDAD	GENERO	ALTURA	CANTIDAD	GENERO	ALTURA	CANTIDAD	GENERO	ALTURA	CANTIDAD	GENERO	ALTURA	CANTIDAD	GENERO	ALTURA	CANTIDAD	GENERO	ALTURA											
mm	ft	m	ft	m	ft	mm	ft	mm	ft	mm	ft	mm	ft	mm	ft	mm	ft	mm	ft	mm	ft	mm	ft	mm	ft									
LEGAL	T M G	Grados	Nudos	Nudos	°C	°C	°C	°C	%	%	mb	°C	°C	mm	mb	mb	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm							
1	2																																	
00	05																																	
01	06																																	
02	07																																	
03	08																																	
04	09																																	
05	10																																	
06	11																																	
07	12																																	
08	13																																	
09	14																																	
10	15																																	
11	16																																	
12	17																																	
13	18																																	
14	19																																	
15	20																																	
16	21																																	
17	22																																	
18	23																																	
19	00																																	
20	01																																	
21	02																																	
22	03																																	
23	04																																	

OBSERVACIONES COMPLEMENTARIAS				PRECIPITACION		VALORES EXTREMOS				CONTROL DE FENOMENOS												OBSERVADORES RESPONSABLES						
Horas de Observación	LEGAL	T M G	EVAPORACION	HELIOFANIA	GEOTERMOMETROS			PERIODO	PLUVIOMETRO	PLUVIOMETRO	PARAMETROS				WW	Comenzó	Terminó	WW	Comenzó	Terminó	WW	Comenzó	Terminó	WW	Comenzó	Terminó	TURNO	NOMBRES Y FIRMAS
					°C	°C	°C				TEMPERATURA °C	PRESION (mb)	PRESION (mb)	HUMEDAD % RELATIVA														
			mm	ft			01-01-07-00																				00-06	
							07-01-13-00																				06-13	
							13-01-19-00																				13-18	
							19-01-01-00																				19-24	
							TOTAL																				19-00	

mesures de pluviométrie. Le pluviographe enregistre directement les quantités d'eau recueillie en mm pendant 6 heures. Nous avons relevé nos données pour la période comprise entre 1h et 7h, laps de temps situé immédiatement avant l'heure de passage des deux satellites. La prise en compte de cette mesure constitue un critère de choix non négligeable pour déterminer les périodes de l'année durant lesquelles la surface perméable du sol n'est pas imbibée d'eau.

1.2.3. La vitesse du vent.

La vitesse du vent se mesure toutes les heures à l'aide d'un anémographe et s'exprime en KT (1,94m/s). Cette information est intéressante, car d'importants espaces urbains, en particulier sur les franges urbaines situées sur le flanc du Pichicha, sont recouverts de terre. Une rafale de vent en période sèche suscite la formation de nuages de poussière susceptibles de bruyter localement l'information radiométrique. Il faut cependant préciser que ce phénomène ne peut affecter qu'un espace très faible de l'espace urbain quiténien et ne se produit que lorsque de fortes bourrasques apparaissent.

1.3. Période et fréquence des données.

Nous avons recueilli les différentes données sur une période de 10 ans, de Septembre 1977 à Août 1987, afin de tenir compte des phénomènes décennaux très importants en météorologie. Les différents traitements réalisés consistent à élaborer des fréquences (nébulosité et précipitations) ainsi que des statistiques descriptives, moyennes et extrêmes (précipitations et vitesse du vent). Les données ont été relevées tous les trois jours, fréquence conciliant à la fois un nombre raisonnable de renseignements et assurant un bon suivi des phénomènes météorologiques qui nous concernent. Il en résulte donc un total de 8 variables par jour (3 concernant la vitesse du vent à 9, 10 et 11h, 3 traitant de la nébulosité aux mêmes heures et 2 ayant trait aux précipitations). Sur la période de 10 ans considérée, nous avons donc à notre disposition 100 données pour décrire chacune de nos 8 variables pendant les 12 mois de l'année.

2. Traitement des données météorologiques.

2.1. Fréquence relative de la nébulosité par mois. (Figures 3, 4 et 5).

Les heures de passage des satellites au dessus de Quito ne correspondent pas aux heures des relevés de nébulosité. Nous avons donc effectué une interpolation entre les données recueillies à 9h et celles recueillies à 10h pour évaluer la nébulosité à 9h30. Nous avons suivant le même principe estimé la nébulosité à 10h30.

La comparaison pour un même mois aux heures différentes de passage des deux satellites nous livre une première information intéressante: **les fréquences de faible nébulosité (de 0/8 à 2/8) sont plus importantes à 9h30 qu'une heure plus tard**, et ce quelque soit le mois considéré, à l'exception toutefois du mois de Mars à la nébulosité de toute façon trop forte pour pouvoir être retenu. Les histogrammes de la Figure 6 renforcent cette opinion. **L'idée communément exprimée affirmant que SPOT "passe" trop tard se trouve donc confirmée.**

Quito se situe immédiatement à l'est des flancs du volcan Pichincha culminant à une altitude de 4794 m. Des collines de moindre importance s'élèvent à l'Est. Tous ces sommets se situent dans le champ visuel de l'observateur, de ce fait, lorsque la nébulosité est inférieure ou égale à 2/8, on peut considérer que la plupart des nuages se concentrent sur ces hauteurs et laissent la quasi-totalité de la ville sous un ciel bleu.

Soit une nébulosité inférieure ou égale à 2/8. Les mois pendant lesquels la fréquence des jours qui vérifient cette condition est la plus forte sont les suivants (Tableau 1 et 2):

*à 9h30: **Juillet (43%), Août et Septembre (36%) et Novembre(35%)**

*à 10h30: **Juillet (36%), Août (35%), Novembre (30%) et Juin (29%).**

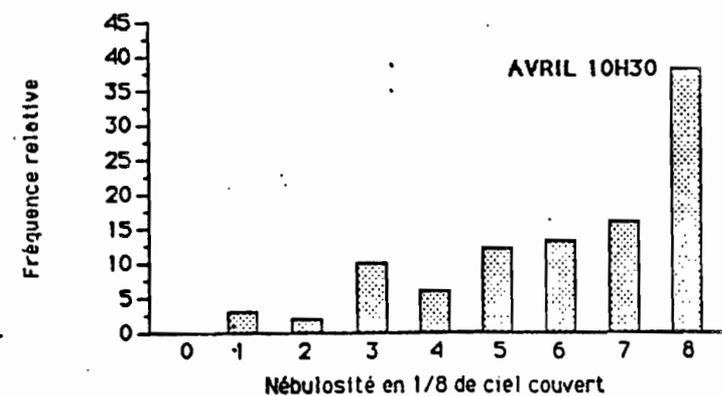
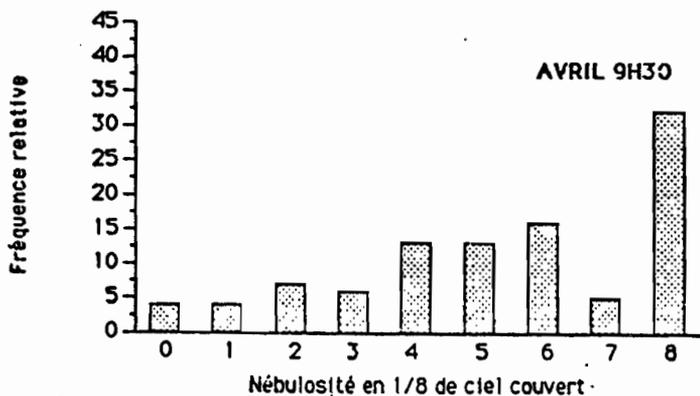
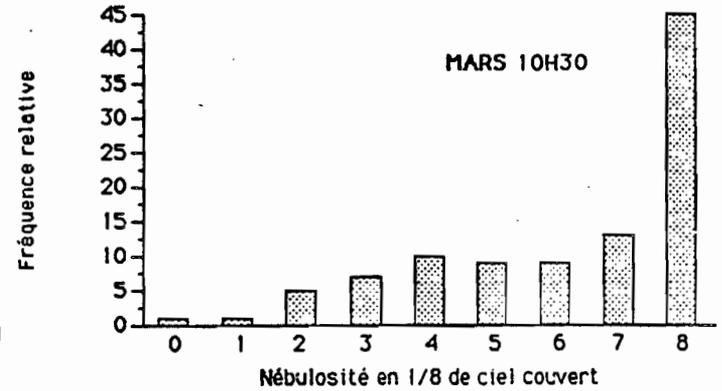
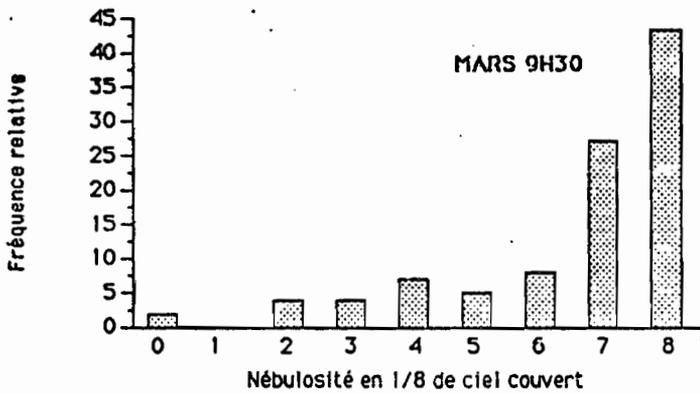
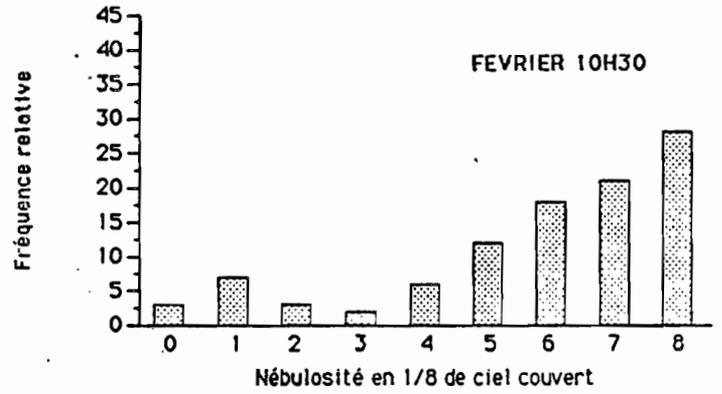
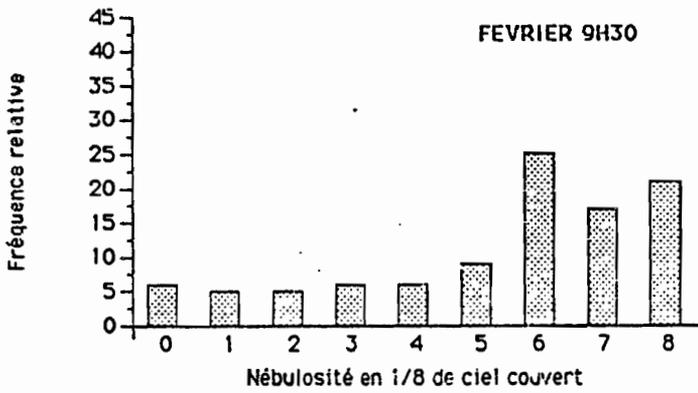
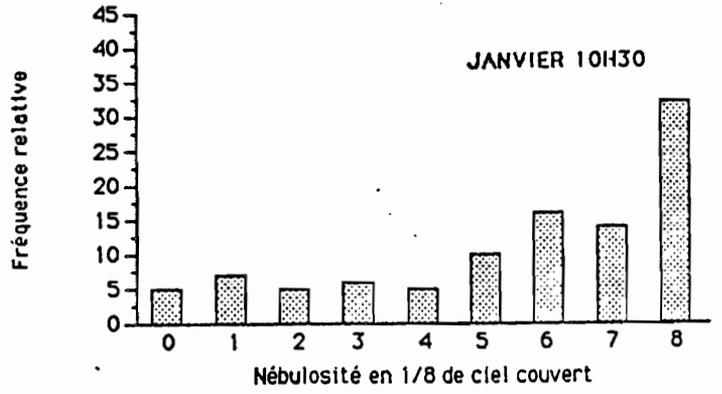
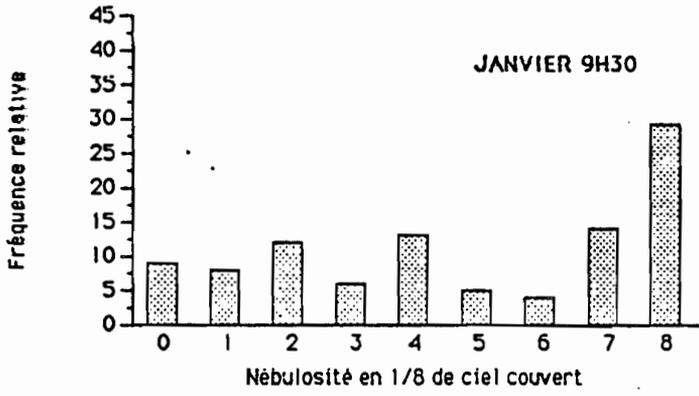


Figure 3 - Histogrammes des fréquences de nébulosité à 9h30 et 10h30 (Janvier - Avril)

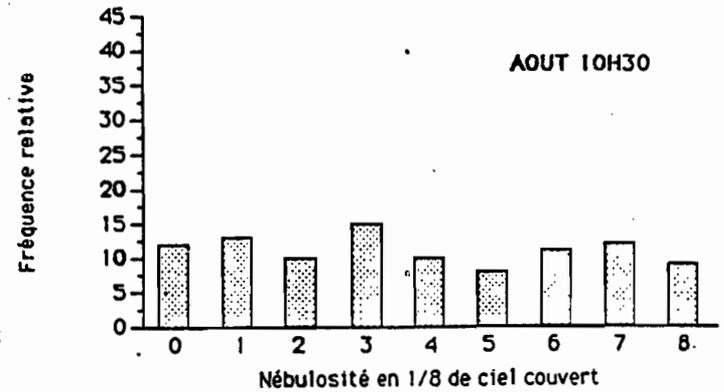
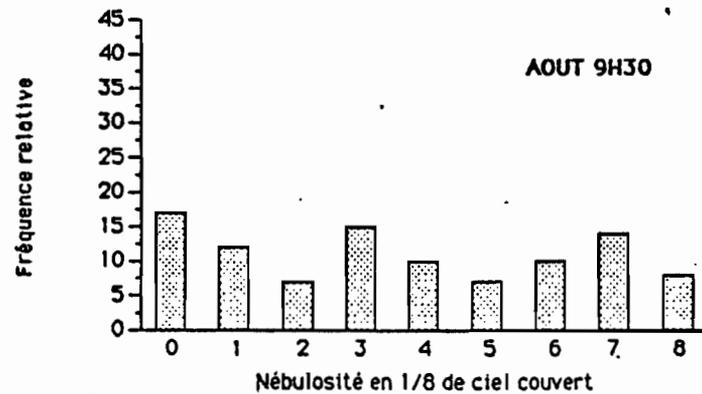
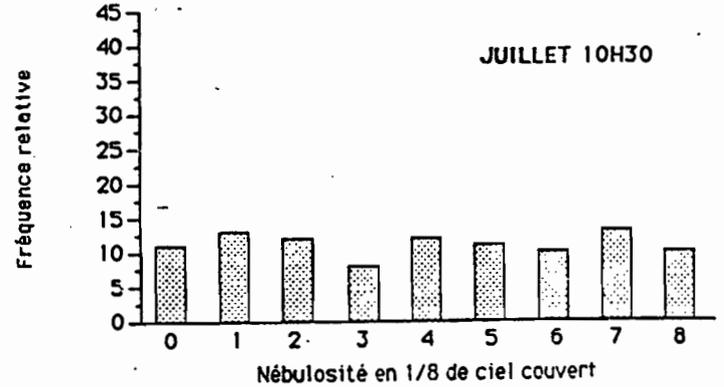
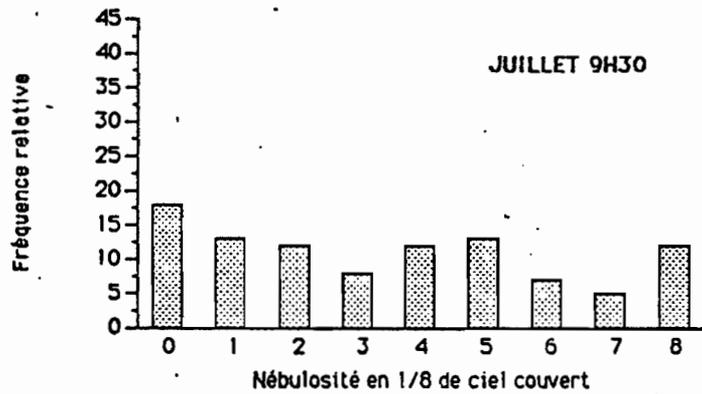
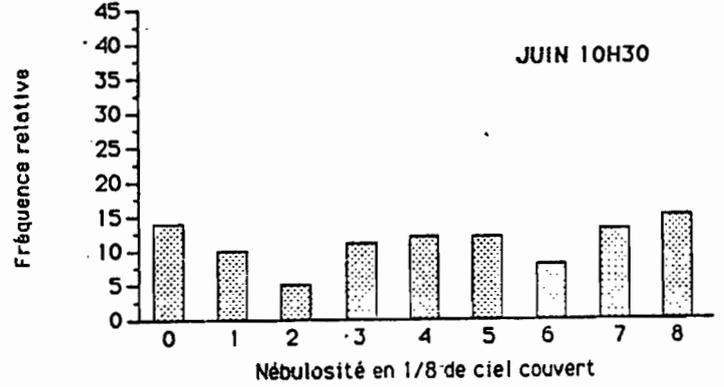
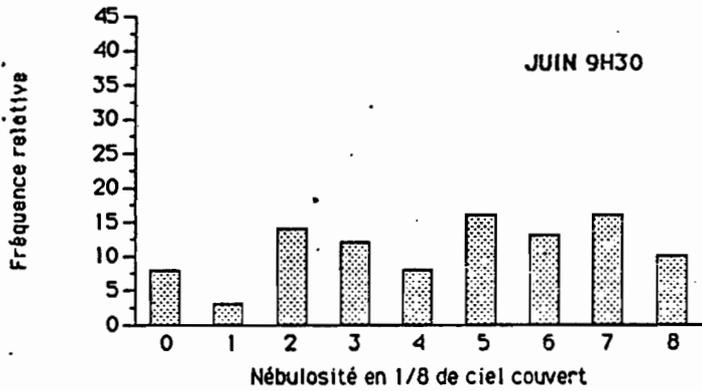
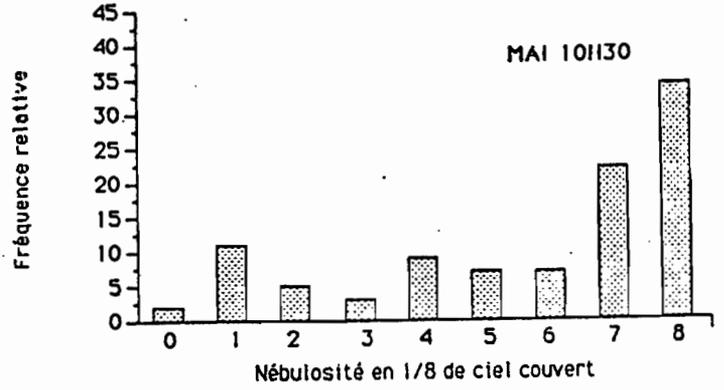
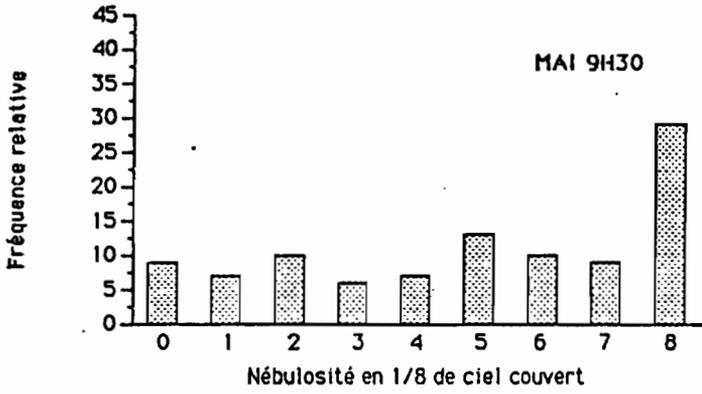


Figure 4 - Histogrammes des fréquences de nébulosité à 9h30 et 10h30 (Mai- Août)

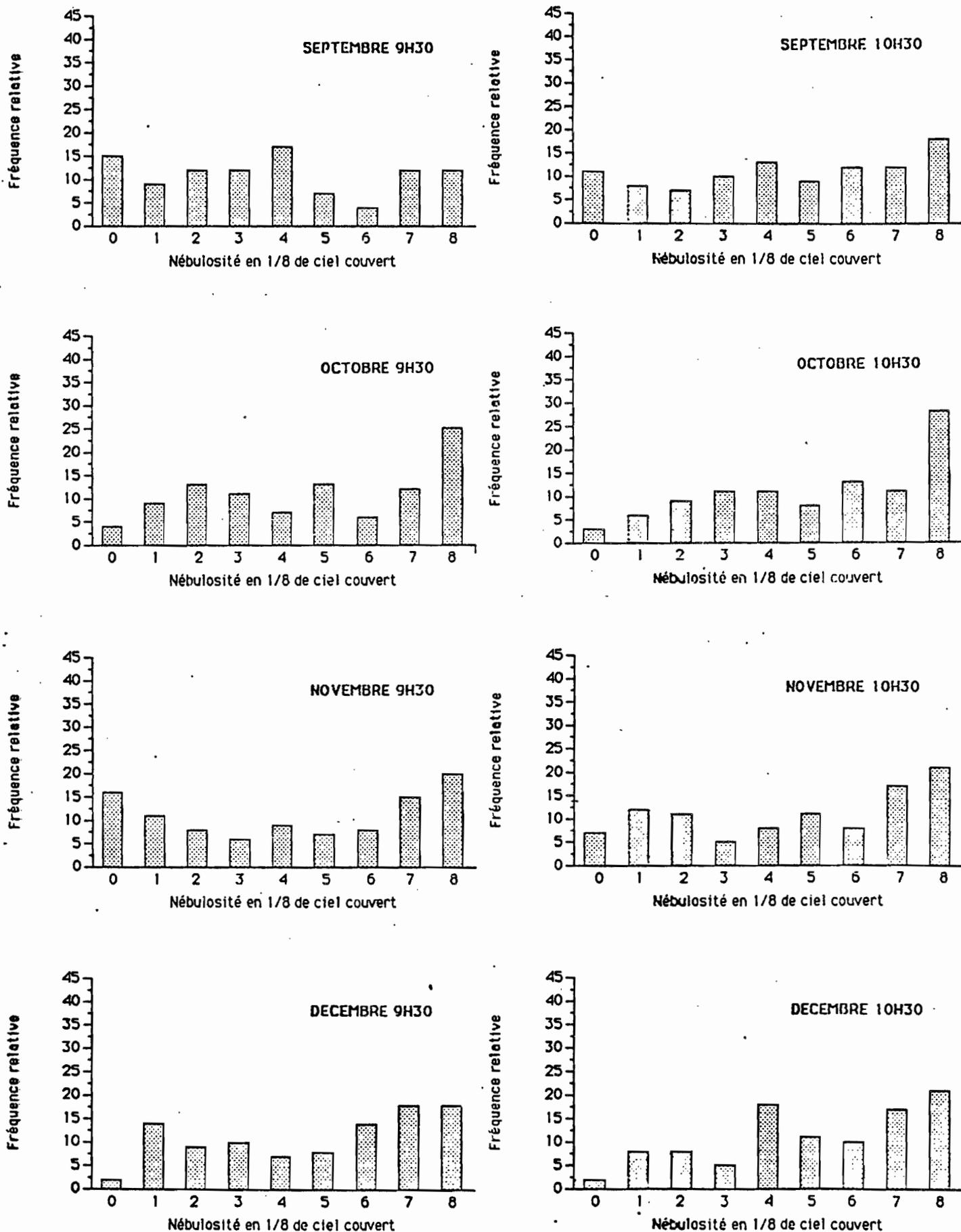


Figure 5 - Histogrammes des fréquences de nébulosité à 9h30 et 10h30 (Septembre - Décembre)

Ce qui s'exprime plus pratiquement: **43% des jours de Juillet ne présentent quasiment pas de nuage au dessus de Quito à 9h30.** Nous remarquons que ce sont les mêmes mois qui apparaissent les moins nuageux à 9h30 et à 10h30, mise à part une permutation des mois de Septembre et Juin. A l'inverse, les mois les plus défavorables du point de vue nébulosité sont:

- * à 9h30: **Mars** (6%)
- * à 10h30: **Avril** (5%) et **Mars** (7%).

Tableau 1 - Fréquence mensuelle cumulée de la nébulosité à 9h30 -
9H30

NEBULOSITE	0	1	2	3	4	5	6	7	8 1/8 de ciel couvert
JANVIER	9	17	29	35	48	53	57	71	100
FEVRIER	6	11	16	22	28	37	62	79	100
MARS	2	2	6	10	17	22	30	57	100
AVRIL	4	8	15	21	34	47	63	68	100
MAI	9	16	26	32	39	52	62	71	100
JUIN	8	11	25	37	45	61	74	90	100
JUILLET	18	31	43	51	63	76	83	88	100
AOUT	17	29	36	51	61	68	78	92	100
SEPTEMBRE	15	24	36	48	65	72	76	88	100
OCTOBRE	4	13	26	37	44	57	63	75	100
NOVEMBRE	16	27	35	41	50	57	65	80	100
DECEMBRE	2	16	25	35	42	50	64	82	100

Tableau 2 - Fréquence mensuelle cumulée de la nébulosité à 10h30 -
10H30

NEBULOSITE	0	1	2	3	4	5	6	7	8 1/8 de ciel couvert
JANVIER	5	12	17	23	28	38	54	68	100
FEVRIER	3	10	13	15	21	33	51	72	100
MARS	1	2	7	14	24	33	42	55	100
AVRIL	0	3	5	15	21	33	46	62	100
MAI	2	13	18	21	30	37	44	66	100
JUIN	14	24	29	40	52	64	72	85	100
JUILLET	11	24	36	44	56	67	77	90	100
AOUT	12	25	35	50	60	68	79	91	100
SEPTEMBRE	11	19	26	36	49	58	70	82	100
OCTOBRE	3	9	18	29	40	48	61	72	100
NOVEMBRE	7	19	30	35	43	54	62	79	100
DECEMBRE	2	10	18	23	41	52	62	79	100

2.2. Probabilité d'obtenir une image .

Nous avons calculé différentes probabilités correspondant à une nébulosité maximum donnée, et en ce qui concerne SPOT à un angle de visée latérale maximum.

Nous considérons que la probabilité d'obtenir une image peut-être approximée par la fréquence calculée pour un mois donné pour laquelle une condition de nébulosité est vérifiée (inférieure ou égale à X/8, X variant de 0 à 8). Nous considérons de même que les différents passages du satellite constituent des événements indépendants. Alors, la probabilité d'obtenir une image pour un mois donné, pour une nébulosité maximum donnée et pour un angle de visée maximum fixé est :

$1-(n/100)^P$

n: somme du nombre de jours ne vérifiant pas la condition de nébulosité, **n/100** représente alors la fréquence du phénomène.

P: nombre moyen³ de passages mensuel du satellite pour un angle maximum fixé. **P** prend comme valeur :

TM		2.00
SPOT	angle 0°	1.25
	angle <10°	3.58
	angle >10°	8.17

Ce mode de calcul s'apparente donc à un tirage avec remise; la probabilité d'obtenir un ciel sans nuage étant considérée comme constante entre le premier et le dernier passage du satellite, dans un mois considéré.

Les **Tableaux 3 et 4** expriment cette probabilité en pourcentage. Pour une tolérance maximum de **2/8** de ciel couvert, la probabilité maximum d'obtenir une image est:

- * pour Thematic Mapper: **67% en Juillet**
- * pour SPOT
42% en Juillet en visée verticale
79 % en Juillet avec un angle de visée inférieur à 10°
97% en Juillet et en **Août** avec un angle de visée quelconque.

Comme nous l'indique la **Figure 7**, les probabilités d'obtention d'une image SPOT et Thematic Mapper sans aucune nébulosité sont du même ordre si l'on accepte un angle de visée au plus égale à 10°. Cette affirmation peut être maintenue quelque soit la nébulosité maximum tolérée.

En ce qui concerne les images verticales⁴, SPOT est à la fois pénalisé par sa périodicité plus faible (tous les 26 jours contre tous les 16 jours pour Thematic mapper) et dans une moindre mesure par son heure de passage plus tardive.

En revanche, les possibilités de visée oblique font, entre autre, de SPOT un satellite permettant un suivi plus fréquent de l'observation de la terre. Cet avantage indéniable n'est cependant pas déterminant en milieu urbain, espace où les évolutions demeurent relativement lentes. Par ailleurs, cette capacité de dépointage est à retenir pour tester la faisabilité et la précision d'une évaluation de la hauteur des bâtiments.

2.3. Les précipitations.

Les diagrammes en barre de la **Figure 8** nous indiquent les mois les plus défavorables à l'enregistrement d'une image. Cette indication est fondée à la fois sur la moyenne journalière des précipitations exprimées en mm et sur le pourcentage des journées pluvieuses, et ceci pour chacun des mois de l'année. La période considérée, entre 1h et 7h, se situe juste avant les heures de passage des satellites.

Les mois les plus favorables sont donc dans l'ordre **Août, Juin et Juillet**. Ce sont, sans surprise, les mêmes que ceux déterminés par la nébulosité. En revanche, les mois de Septembre et Novembre à la nébulosité généralement faible doivent être considérés avec plus de précautions compte tenu des précipitations importantes tant en quantité qu'en fréquence.

2.4. Les vents.

La période la plus ventée s'étend de Juin à Septembre. La **Figure 9** présente 2 diagrammes en barre correspondant aux heures de passage des satellites. Nous avons relevé, pour chacun des mois des 10 années pour lesquelles nous avons recueillies des

PROBABILITE (en %) D'OBTENIR AU MOINS UNE IMAGE POUR UNE NEBULOSITE MAXIMUM DONNEE									
9H30 T T									
NEBULOSITE en 1/8 de ciel couvert	0	1	2	3	4	5	6	7	8
JANVIER	17	31	49	57	72	77	81	91	100
FÉVRIER	11	20	29	39	48	60	85	95	100
MARS	3	3	11	19	31	39	51	81	100
AVRIL	7	15	27	37	56	71	86	89	100
MAI	17	29	45	53	62	76	85	91	100
JUIN	15	20	43	60	69	84	93	99	100
JUILLET	32	52	67	75	86	94	97	98	100
AOUT	31	49	59	75	84	89	95	99	100
SEPTEMBRE	27	42	59	72	87	92	94	98	100
OCTOBRE	7	24	45	60	68	81	86	93	100
NOVEMBRE	29	46	57	65	75	81	87	96	100
DECEMBRE	3	29	43	57	66	75	87	96	100

Tableau 3 - Probabilité (en pourcentage) d'obtenir une image Thematic Mapper pour une nébulosité maximum donnée -

PROBABILITE (en %) D'OBTENIR AU MOINS UNE IMAGE POUR UNE NEBULOSITE MAXIMUM ET UN ANGLE DE VISEE MAXIMUM DONNEE											
Nébulosité en 1/8 de ciel couvert	0			1			1			2	
Angle de visée SPOT	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°
JANVIER	6	16	34	14	36	64	20	48	78	88	97
FÉVRIER	3	10	22	12	31	57	15	39	67	81	95
MARS	1	3	7	2	6	15	8	22	41	58	72
AVRIL	0	0	0	3	10	22	6	16	34	53	66
MAI	2	6	15	15	39	67	21	50	79	91	98
JUIN	17	41	70	29	62	89	34	70	93	99	100
JUILLET	13	34	61	29	62	89	42	79	95	100	100
AOUT	14	35	64	30	64	90	41	78	94	100	100
SEPTEMBRE	13	34	61	23	53	82	31	66	91	98	100
OCTOBRE	3	10	22	11	28	53	21	50	78	91	98
NOVEMBRE	8	22	44	23	53	82	35	72	93	99	100
DECEMBRE	2	6	15	12	31	57	21	50	78	91	98

2			3			4			5		
> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°
78	27	60	88	33	69	93	44	81	97	78	97
67	18	44	73	25	57	85	39	76	96	67	96
44	17	41	70	29	62	89	39	76	96	44	96
34	18	44	73	25	57	85	39	76	96	34	96
80	25	57	85	35	72	94	43	80	97	80	97
93	47	83	98	60	92	99	72	97	99	93	99
97	51	87	99	64	94	99	74	98	99	97	99
97	57	91	99	68	96	99	75	98	99	97	99
91	42	79	97	56	91	99	66	95	99	91	99
80	34	70	93	47	83	98	55	90	99	80	99
94	41	78	97	50	86	98	62	93	99	94	99
80	27	60	88	48	84	98	60	92	99	80	99

6			7			8		
VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°
62	93	99	75	98	99	100	100	100
59	92	99	79	98	99	100	100	100
49	85	98	63	94	99	100	100	100
53	89	99	70	96	99	100	100	100
51	87	99	74	97	99	100	100	100
79	98	99	90	99	99	100	100	100
84	99	99	94	99	99	100	100	100
85	99	99	95	99	99	100	100	100
77	98	99	88	99	99	100	100	100
69	96	99	79	98	99	100	100	100
70	96	99	85	99	99	100	100	100
70	96	99	85	99	99	100	100	100

Tableau 4 - Probabilité (en pourcentage) d'obtenir une image SPOT pour une nébulosité maximum donnée -

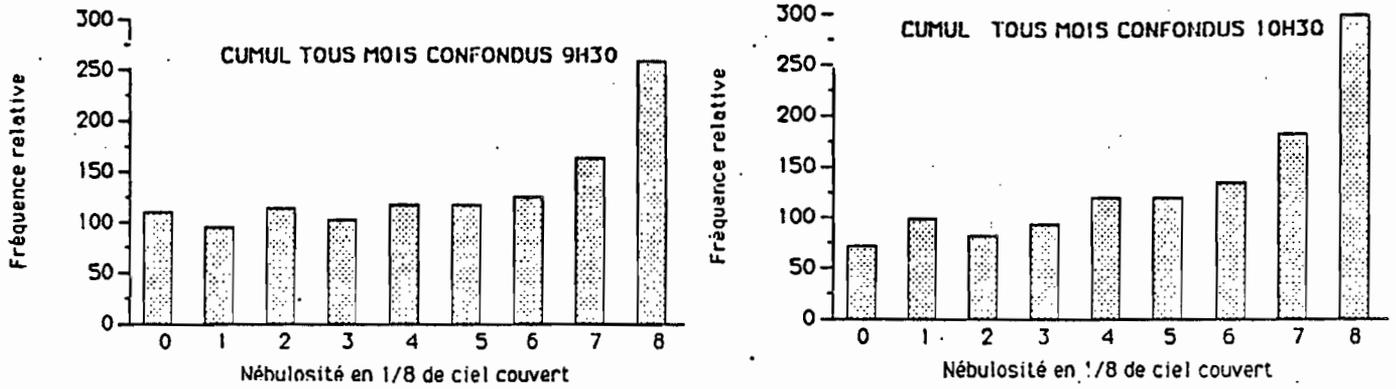


Figure 6 - Somme sur 10 ans tous mois confondus de la nébulosité 9h30 et 10h30 -

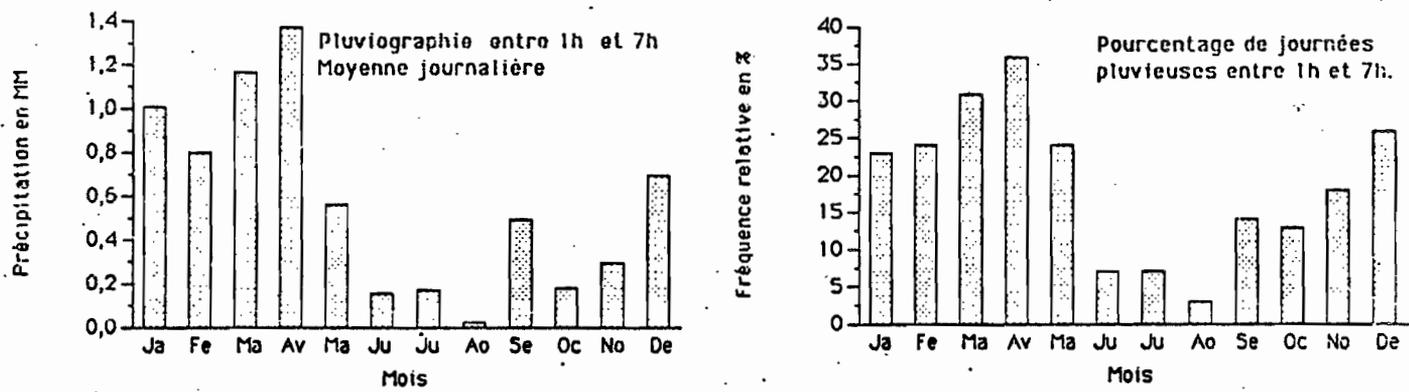


Figure 8 - Moyenne et fréquence de la pluviographie quotidienne par mois -

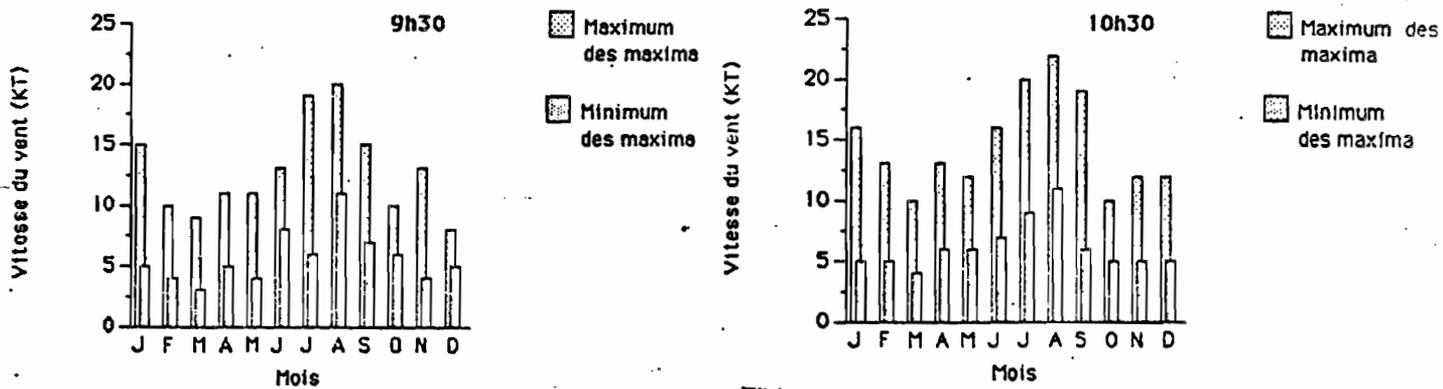


Figure 9 - Vitesse du vent, maximum et minimum des maxima par mois -

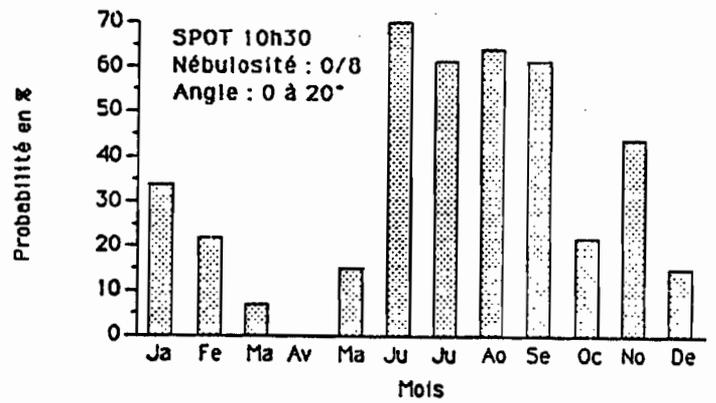
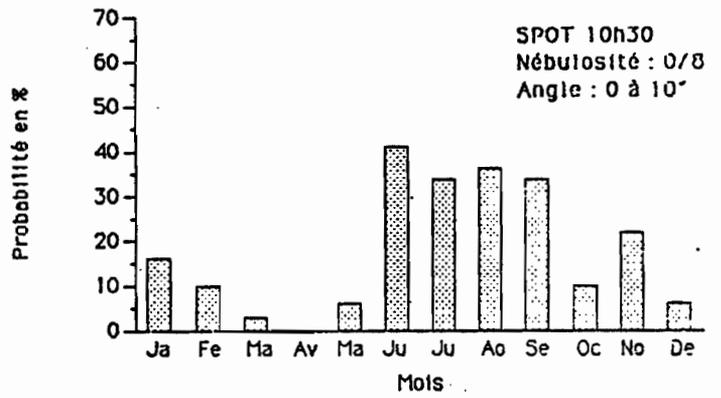
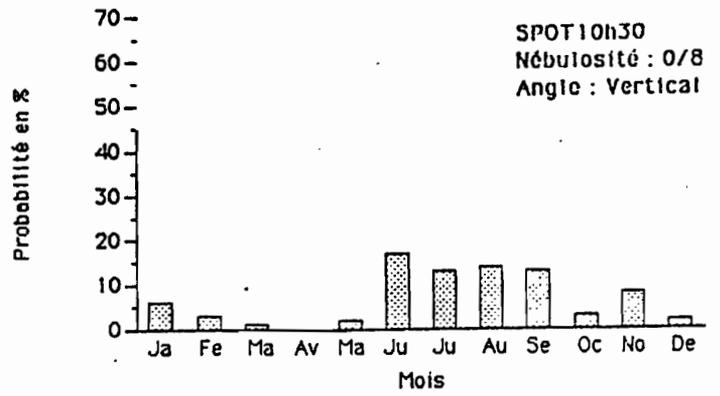
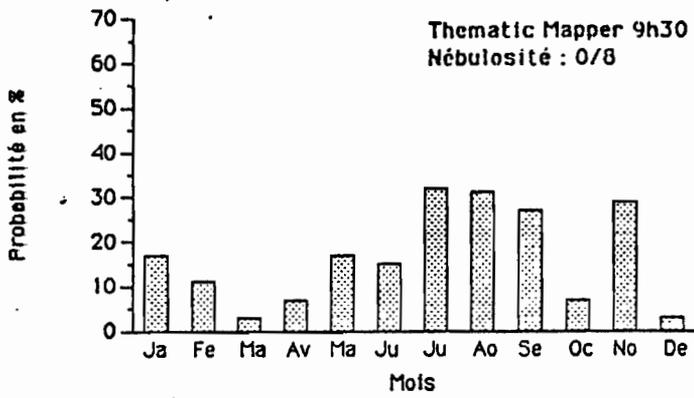


Figure 7 - Probabilité en pourcentage d'obtention d'une image de 0/8 de ciel couvert.
Comparaison SPOT / Thematic Mapper -

données, la vitesse **maximale** des vents. Ces diagrammes illustrent donc la fourchette (minima et maxima) des vitesses maximales du vent. La période la plus ventée s'étend de Juin à Septembre et affecte donc malheureusement les mois les plus favorables pour l'enregistrement des images. Cependant, si ces vitesses semblent importantes et donc paraissent pouvoir occasionner des nuages de poussière susceptibles de bruite le signal lors de l'enregistrement des images, il convient de relativiser ce phénomène en rappelant qu'il s'agit de maxima; l'apparition de vents soufflant à ces vitesses demeure peu fréquente.

Conclusion.

De nombreux traitements d'image sont indispensables pour parvenir à discriminer les différents types morphologiques d'espaces qui constituent une cité comme Quito. Ces traitements requièrent des images, panchromatiques ou multispectrales, enregistrées à des dates déterminées par le type de traitement désiré:

- un indicateur de végétation, apte à rendre compte de l'intensité de l'activité chlorophyllienne est précieux pour séparer les quartiers populaires situés sur les franges urbaines des quartiers résidentiels; une même densité de verdure caractérisent ces deux types, seul les différencie l'état des "espaces verts" en **période sèche**: constamment arrosés dans les quartiers aisés, ils sont laissés en l'état ailleurs. La discrimination de ces deux types d'espaces exige donc au moins 2 images multispectrales, une pendant la phase humide durant laquelle peuvent être repérés tous les espaces non minéraux (**Novembre** semble le mois le plus approprié), une autre en saison plus sèche (**Août** ou **Juillet** sont satisfaisants) pour opérer une distinction à l'intérieur de l'espace végétal (état de la végétation **basse** et **arborée**),

- un indicateur de la densité de l'espace bâti est sensible à la densité de végétation; une période à forte activité photo-synthétique est donc privilégiée,

- une extraction automatique de voirie, une caractérisation de la structure ou de la texture réclame une image en mode panchromatique (résolution spatiale 10m) enregistrée avec un angle de visée proche de la verticale.

Les différentes probabilités d'obtention d'image calculées indiquent que la conjonction de la thématique et de la météorologie est favorable pendant l'époque sèche. En période humide, seul le mois de Novembre paraît praticable; la nébulosité des autres mois paraît trop forte pour espérer obtenir une image correcte dans un délai raisonnable.

¹ Caujolle A., 1988 - Etude d'une formation volcanique originale des andes équatoriennes: La Cangahua. Caractérisation et possibilités de valorisation pour l'agriculture, thèse de doctorat en Géographie, Clermont-Ferrand, FNSH, en cours.

² De Noni B. et G., Fernandez M.A., Peltre P., 1986 - Accidentes climáticos y gestión de las quebradas de Quito, Paisajes geográficos, N° 17, pp 25-44.

³ Ces nombres ont été calculés en divisant le nombre de passages annuels par 12. Tous les mois sont affectés d'un coefficient identique, il n'est donc pas tenu compte de la différence de leur nombre de jours.

⁴ En milieu urbain, et pour des applications spécifiques comme l'extraction automatique de la voirie, il est quasi-nécessaire d'acquérir une image dont l'angle de prise de vue se rapproche le plus possible de la verticale.

ARTICLES ET COMMUNICATIONS

TELEDETECTION ET SYSTEME D INFORMATION GEOGRAPHIQUE
Application au suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville.

F. Dureau, B. Lortic, A. Michel, M. Souris

Orstom
70-74 Route d'Aulnay 93140 BONDY

RESUME : L'intégration de données géographiques localisées et de données satellitaires favorise l'émergence de nouvelles méthodes d'analyse en télédétection. Classiquement, l'analyse des données de télédétection s'effectue soit sur toute l'image, soit sur un échantillon de l'image par tirage systématique, soit sur des portions d'image constituant des zones d'entraînement dont les limites sont sans rapport avec le contenu de la zone elle-même. Le fait de caractériser le pixel par son appartenance à une zone géographique nous ouvre de nouvelles voies d'investigation pour l'analyse des images. A l'inverse, les données issues de traitement des images satellitaires pourront être intégrées et comparées à l'ensemble de l'information déjà disponible dans la base de données géographiques.

ABSTRACT: Integration of spatial geographic datas and remote sensing datas lead new methods in remote sensing image analysis. Usually, image analysis in remote sensing deal either with entire image or sample of image, or portions of image (training areas) whose boundaries are whitout connection with its content. Characterising the pixel by its belonging to a geographic zone open new possibilities of investigation for image analysis. Conversly, the datas issued from remote sensing image processing will be integreted and compared with all the information of the geographic data base.

Pourquoi intégrer information géographique et télédétection ?

Depuis 1985, nous menons des recherches ayant pour objectif de mettre au point un système d'observation permanent des populations urbaines utilisant l'information sur la morphologie urbaine 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, dans la méthode que nous développons, d'utiliser cette information exhaustive sur la morphologie urbaine pour recueillir rapidement, par sondage, des données relatives aux populations urbaines. Une meilleure connaissance de l'espace urbain grâce à l'information apportée par les images satellitaires 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, composée

d'îlots clairement définis, pour l'optimisation du sondage par stratification sur la morphologie urbaine, et pour l'obtention de résultats localisés, selon un découpage significatif de la ville enquêtée.

Nous envisageons de mettre au point un système d'observation intégrant la télédétection spatiale pour produire des données démographiques spatialisées en milieu urbain. Nous menons pour cela des travaux approfondis dans deux directions principales (voir §3) :

- l'interprétation des images satellitaires à haute résolution en milieu urbain : définir quelles sont les informations relatives à la morphologie urbaine contenues dans ces images et quels sont les traitements permettant d'extraire ces informations.
- les relations bâti/population et les sondages spatiaux en démographie urbaine : définir quels sont les critères morphologiques pertinents pour l'observation démographique.

L'utilisation d'un système d'information géographique est fondamentale dans cette phase de mise au point du système d'observation démographique : les différents axes de recherche impliquent la mise en relation de données localisées issues de sources d'information variées et de nombreux traitements de données géographiques. D'autre part, du fait de ses qualités (continuité spatiale et temporelle de l'observation, caractère numérique des données), la télédétection constitue une source d'information privilégiée pour l'actualisation des données d'un observatoire urbain gérées par un système d'information géographique.

La localisation des données est alors une information fondamentale : seule clé commune, c'est elle qui permet de comparer et de croiser les différentes données entre elles, avec des traitements qui conservent la pertinence spatiale des résultats.

1. Les données et les systèmes de traitements.

Les travaux à réaliser reposent sur des informations de plusieurs types différents :

- données statistiques localisées (recensements, ...)
- données géographiques (cartes existantes, interprétation de photographies aériennes, données administratives localisées...)
- images satellitaires.

Pour traiter cette information, nous disposons de deux systèmes complémentaires :

a) le système d'information géographique développé par le laboratoire d'Infographie de l'Orstom (TIGER™) qui permet de conserver et de manipuler les données géographiques zonales, linéaires ou ponctuelles. Ses principales fonctionnalités sont :

- saisie graphique par digitaliseur, saisie des variables descriptives
- intégration de données satellitaires
- choix de la projection géographique de travail
- fenestrage (sélection d'une zone de travail)
- recherches thématiques et multithématiques
- croisement de données sur des critères spatiaux ou algébriques
- cartographie des résultats
- calculs sur les variables (statistiques, ...)
- calculs métriques (surfaces, périmètres)

b) l'unité de traitement des images satellitaires de Bondy.

Si le système TIGER™ se présente comme un logiciel intégré, l'Atelier de télédétection de l'Orstom Bondy (ATOBO) a développé un ensemble de programmes réalisant les principaux traitements sur les images satellitaires:

- visualisation couleur par composition colorée
- analyse statistique
- classification supervisée ou non
- sorties graphiques et cartographie.

2. L'intégration des données.

L'idée principale consiste à pouvoir traiter indifféremment données de télédétection et données géographiques, à pouvoir les comparer et les croiser pour les analyser et créer de nouvelles données localisées. Par exemple, la classification d'une image en fonction de la radiométrie doit pouvoir utiliser la variable occupation du sol pour chaque pixel, cette valeur provenant d'une information stockée dans la base de données. Cela signifie que l'on doit pouvoir affecter cette valeur à chaque pixel de l'image satellitaire. De même, la valeur d'un indice de la radiométrie d'une parcelle agricole doit pouvoir être comparée à la production de cette parcelle, et donc intégrée comme nouvelle variable sur cette parcelle.

Pour permettre un croisement par la localisation, il est nécessaire de connaître et de pouvoir modifier les différents paramètres liés à cette localisation : projection géographique, espace d'étude, précision et taille du pixel. L'image satellitaire doit donc être localisée avec précision, et recalée suivant une projection connue, de manière à pouvoir en extraire une matrice de pixels dont on connaît la taille et la localisation. Le système de gestion des données géographiques doit permettre de s'adapter aux paramètres de l'image satellitaire par le choix de la projection géographique, de la fenêtre de travail et de la résolution spatiale des images qu'il engendre. Ces choix sont rendus possible par le passage interactif d'une structure vectorielle à une structure matricielle dans le système TIGER™.

3. Application à l'étude de la démographie sur Marseille.

Deux hypothèses centrales sous-tendent ce programme :

a) Il existe des relations étroites entre les caractéristiques morphologiques du milieu urbain, et les caractéristiques démographiques et socio-économiques des habitants.

b) On peut identifier sur les images satellitaires de type SPOT ou THEMATIC

MAPPER les caractéristiques morphologiques pertinentes pour l'observation démographique en ville.

Le programme de recherche est mené depuis 1985 sur la ville de Marseille, qui possédait dès cette date les données nécessaires à la première phase de développement méthodologique, c'est-à-dire des références fiables pour tester la validité des méthodes mises au point au fur et à mesure de l'avancement des travaux. L'utilisation d'un système d'information géographique est fondamentale dans cette phase de mise au point du système d'observation démographique : les différents axes de recherche impliquent la mise en relation de données localisées issues de sources d'information

variés et de nombreux traitements de données géographiques. A travers quelques exemples tirés de l'expérience sur Marseille, nous verrons dans une première partie ce qu'apporte le système TIGER™ pour le développement de méthodes et leur vérification. D'autre part, du fait de ses qualités (continuité spatiale et temporelle de l'observation, caractère numérique des données), la télédétection constitue une source d'information privilégiée pour l'actualisation des données d'un observatoire urbain géré par un système d'information géographique.

3.1 L'utilisation d'un système d'information géographique pour l'étude de la démographie sur la ville de Marseille.

La zone d'étude a été déterminée de manière à couvrir les différents types de quartiers de Marseille, soit schématiquement : les quartiers industriels et de grands ensembles ouvriers du nord, les quartiers résidentiels du sud, le vieux centre, et les zones pavillonnaires de l'est de la commune.

Dans cette première phase du programme de recherches, purement méthodologique, les travaux réalisés reposent sur trois types d'information, quasi-concomitante :

- données démographiques issues du recensement de mars 1982
- caractéristiques morphologiques observées sur photographies aériennes à grande échelle et au sol (août 1982)
- image satellite Thematic Mapper (février 1983) .

L'ensemble de ces informations, connues sur toute la zone d'étude, sont intégrées dans une base de données gérée par le système d'information géographique TIGER ; ainsi, nous nous trouvons dans une situation d'expérimentation quasi-idéale, en pouvant croiser toutes les données localisées, chacune étant conservée dans son propre mode d'implantation spatiale. Notons qu'à Marseille, il n'est pas réalisé de collecte de données démographiques d'après un sondage aréolaire bâti sur image satellite. Le recensement de 1982 est utilisé de deux façons : par sondage, pour modéliser les relations bâti/population et simuler l'enquête démographique sur échantillon aréolaire, et exhaustivement, comme référence pour mesurer le degré de précision des résultats obtenus en mettant en oeuvre différentes stratégies de sondage.

Si la base de données concerne l'ensemble de la zone délimitée sur la Figure 1, tous les travaux méthodologiques ne sont pas réalisés sur l'intégralité de cet espace. En effet, il est nécessaire d'en extraire un échantillon pour la mise au point de méthodes comme celles relatives à l'interprétation d'image satellite : si l'on ne procédait pas ainsi, on ne pourrait pas vérifier la validité des traitements mis au point, c'est à dire tester qualitativement et quantitativement leur efficacité. Travailler sur un échantillon permet de contrôler en permanence les méthodes développées, en les testant sur un espace disposant d'une information de référence, les données de population et de morphologie urbaine dans le cas présent.

Pour que cette méthode de travail soit vraiment efficace, il importe de disposer d'un échantillon représentatif des différents types d'occupation du sol présents dans l'ensemble de la zone : c'est à cet effet qu'est réalisée une typologie de la morphologie urbaine, d'après l'information observée sur photographie aérienne et contrôlée au sol.

3. 2 Mise en relation de l'information satellitaire et des données sur la morphologie

urbaine.

En raison de la résolution insuffisante des images LANDSAT MSS, seules disponibles jusqu'à ces dernières années, la télédétection est restée très peu employée en milieu urbain, caractérisée par une forte hétérogénéité et la faible taille des éléments constitutants ; l'analyse précise de l'information apportée par les capteurs à haute résolution comme Thematic Mapper et SPOT, et les méthodes d'extraction de cette information n'en sont qu'à leurs débuts.

Dans l'état actuel de la télédétection en milieu urbain, il est primordial de pouvoir confronter spatialement les données satellitaires avec les données de la base sur la morphologie urbaine issues, dans le cas de Marseille, d'observations terrain et de photographies aériennes à grande échelle.

En effet, la mise en relation avec les données localisées gérées par le système d'information géographique s'avère nécessaire à plusieurs niveaux:

- sélection d'un échantillon spatial de l'image représentatif des types morphologiques présents dans la zone d'étude,
- confrontation avec les références de terrain relevées sur cet échantillon, pour développer des méthodes d'interprétation de l'image satellite,
- confrontation avec les données morphologiques connues sur l'ensemble de la zone d'étude afin d'évaluer précisément les résultats obtenus en appliquant les méthodes d'interprétation mises au point sur l'échantillon,
- test de la qualité géographique des recalages d'image satellite, en comparant les images recalées aux données digitalisées à grande échelle.

A l'heure actuelle, étant donné la complexité du milieu étudié et l'état des connaissances en télédétection urbaine, ne pas recourir à une base de données gérée par un système d'information géographique limiterait sérieusement les interprétations de l'image satellite, tant sur le plan thématique que sur le plan spatial. De plus, comme l'écrit justement A. BALLUT à propos de la télédétection urbaine, le fait de prendre en compte la localisation peut constituer un atout important : "Il faudrait, dans les algorithmes de traitement, faire intervenir des notions relatives à la répartition géographique". L'intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique tel que celui développé à l'ORSTOM favorise les recherches dans cette direction, pour la mise au point de méthodes de classification en télédétection intégrant la localisation ; de même, la localisation peut constituer un paramètre discriminant d'un point de vue démographique, au même titre que des variables décrivant la morphologie urbaine.

3.3 Mise en relation des données démographiques et des données sur la morphologie urbaine

La mise au point d'un système d'observation démographique intégrant l'information satellitaire suppose de répondre à un certain nombre de questions :

- Quels sont les critères morphologiques pertinents pour établir la stratification spatiale d'une ville en vue d'une enquête démographique par sondage, et quels sont les critères révélant directement des phénomènes démographiques (tels que la dynamique migratoire, par exemple) ?
- Quelle est la stratégie de sondage la plus efficace? Ce qui suppose de définir la taille et le nombre de strates qui maximisent le gain de précision, le type d'unité spatiale à enquêter, le mode de tirage de l'échantillon (aléatoire ou systématique, selon quelle fréquence spatiale) et l'estimateur à utiliser.

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, il est nécessaire de mettre en relation et traiter conjointement des données démographiques et morphologiques localisées, c'est-à-dire de réaliser principalement :

- le croisement entres données démographiques et morphologiques, afin de connaître la répartition de la morphologie selon le découpage géographique des données démographiques, et inversement. Cette information sert, notamment, à tirer un échantillon de districts INSEE représentatif des types morphologiques et à étudier les relations bâti/population par des méthodes d'ajustement,
- des sélections et statistiques spatiales selon les modalités des attributs morphologiques ou démographiques,
- une étude du mode d'implantation spatiale des données afin de déterminer quelles hypothèses peuvent être faites sur leur répartition dans l'espace et donc quelles sont les méthodes d'échantillonnage à tester,
- une évaluation spatialisée et quantifiée des résultats obtenus en simulant différentes stratégies de sondage.

De façon parallèle à la démarche adoptée en télédétection urbaine, les critères morphologiques sont testés analytiquement comme critères de stratification, qui eux seuls peuvent être identifiés sur toute ville.

3. 4 Télédétection urbaine

En matière de télédétection urbaine, les premiers résultats obtenus dans le cadre du programme de recherche concernent :

- le test de la qualité géométrique des images recalées géographiquement avec et sans modèle numérique de terrain (niveaux 2 et 3 des recalages réalisés par l'IGN);
- la mise au point d'une méthodologie de collecte d'informations sur la morphologie urbaine servant de références de terrain pour l'interprétation des images satellitaires. Propre au milieu urbain, et répondant à ses caractéristiques particulières d'occupation du sol, cette méthode, mise au point à Marseille, a été appliquée en octobre-novembre 1986 sur la ville de Quito ;
 - l'analyse statistique descriptive des données spectrales de l'image TM
 - la mise au point de méthodes d'extraction sur image satellite TM de l'information relative à la densité du bâti.

Le dernier point cité est au centre de notre programme de recherche. Après avoir rappelé brièvement les caractéristiques statistiques de l'image TM (Marseille, février 1983), nous présentons, à titre démonstratif plus que pour l'intérêt des résultats exposés, la méthode de travail adoptée pour la mise au point des méthodes de télédétection et quelques uns des premiers résultats auxquels elle a donné lieu.

La première phase du travail a consisté à étudier les caractéristiques radiométriques pour chacune des 6 modalités de la densité du bâti : cette analyse statistique de la radiométrie en fonction de la densité du bâti a été rendue possible en générant, par une interrogation de la base sur l'attribut "densité du bâti", une image aux caractéristiques spatiales compatibles avec celles de l'image TM. Connaissant pour chaque pixel de l'image ses valeurs dans les 6 canaux TM et son niveau de densité du bâti, on peut rechercher dans de bonnes conditions les canaux, les combinaisons de canaux et les opérateurs spatiaux les plus efficaces pour discriminer les différents degrés de densité du bâti.

Dans un deuxième temps, le travail s'est poursuivi sur l'échantillon de 80 îlots, tiré par sondage stratifié sur les types morphologiques parmi les 3534 îlots de la zone d'étude. Une enquête réalisée à Marseille en juin 1986 a permis de compléter les données morphologiques recueillies sur la mosaïque de photographies aériennes : actualisation de l'information aérienne à la date d'enregistrement de l'image TM (février 1983), calage des données observées sur photographies aériennes avec les références terrain (précisions sur la hauteur des bâtiments, la nature des toitures...etc). Grâce à cette collecte de données sur le terrain, accompagnée de l'exploitation de photographies aériennes à très grande échelle (1/8000), couleurs naturelles), il est possible de travailler plus précisément que sur l'ensemble de la zone d'étude, en utilisant des méthodes de traitement de données quantitatives (corrélations notamment) : c'est donc de cette façon que s'est poursuivi le travail de mise au point de méthodes d'extraction d'information sur image satellite, les descripteurs morphologiques connus sur l'ensemble de la base servant pour tester la validité des méthodes mises au point sur échantillon.

Un élément important dans cette deuxième phase de la recherche est de caractériser un pixel non seulement par son niveau de densité, mais aussi par son appartenance à un îlot donné de l'échantillon : de la sorte, on ne raisonne plus par pixel ou ensembles de pixels dont la définition est sans rapport direct avec le contenu de la zone, mais par zones définies d'après leur contenu. Cette approche, nouvelle en télédétection, permet de relier précisément radiométrie et occupation du sol et facilite les travaux sur la texture, au sein de zones correspondant à une réalité géographique, où la notion d'agencement peut être appréhendée de façon précise.

4. En conclusion, de nouvelles perspectives en télédétection.

L'utilisation du système TIGER™ permet une meilleure perception de la réalité de la zone de collecte, car les attributs des objets étudiés y sont définis par rapport à leur localisation réelle. Les valeurs numériques traitées en télédétection apparaissent par contre comme une densité radiométrique sur la surface d'un pixel, zone arbitraire qui, n'ayant que rarement une composition homogène, ne correspond pas directement au phénomène étudié : le passage du pixel à une zone définie par rapport au phénomène à étudier permet un changement d'échelle qui augmente les possibilités d'analyse en télédétection spatiale.

La conjonction d'un système d'information géographique et de données de télédétection permet facilement de développer deux approches indispensables en télédétection :

- considérer le pixel par rapport à une stratification de l'espace (par exemple l'altitude, la pente, la pluviométrie ...), car on sait très bien qu'une même valeur d'un indice radiométrique peut correspondre à des objets différents, et de même qu'une classe peut avoir plusieurs réponses suivant les strates considérées.

- considérer des objets prédéfinis (la maison, l'îlot, le quartier, la parcelle...) et enrichir la connaissance de ces objets par une approche contextuelle de la radiométrie (par exemple, agencement géométrique et radiométrique dans la zone, calcul de la valeur d'un indice pour la zone...).

Sortir le pixel de son ghetto radiométrique, permettre la création et l'actualisation rapide d'une cartographie thématique : telles sont les voies qui nous semblent au jour d'hui ouvertes.

Publications et notes de travail de l'équipe ORSTOM.

(peuvent être consultés au département D, ORSTOM, 30 Rue de Charonne, 75011 Paris).

Equipe ORSTOM (Ur 406, ATOB, Unité d'Infographie), 1986. - Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique: suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport intermédiaire, Avril 1986, Paris, 109 P.

BARBARY O., 1985. - Projet de thèse de mathématiques appliquées aux sciences de l'homme, sous la direction de M. BARBUT, EHESS. Sujet : "Elaboration de plans de sondage pour l'estimation de données spatio-temporelles, en prenant en compte les informations fournies par la télédétection. Application aux données démographiques en milieu urbain des pays en développement". Pris, 20 P.

BARBARY O., 1986. - Apport d'une stratification morphologique des districts INSEE de recensement dans l'estimation des effectifs de population à Marseille. Quito, 47 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 démographie des villes des pays en développement. Communication au XXe congrès général de l'Union Internationale pour l'Etude Scientifique de la Population, Florence (Italie), 5-12 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.

DUREAU F., 1986. - Marseille: tirage de l'échantillon de travail. Quito, 9 P.

DUREAU F. et MICHEL A., 1986. - Quito: enquête morphologique urbaine. Instructions aux enquêteurs. (2 versions: française et espagnol). Quito, 19 P.

MICHEL A., 1986. - Projet de thèse de géographie, sous la direction de J.P. RAISON, EHESS. Sujet: " Télédétection et observation suivie de la morphologie et de la démographie des villes des pays en développement. Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution et évaluation des informations fournies par ces images". Paris 9 P.

MICHEL A., 1986. - Le point sur la télédétection urbaine en 1986 à travers la bibliographie française et anglo-saxonnne sur le sujet. Recueil des fiches de dépouillement des articles et ouvrages. ORSTOM, 49 P.

MICHEL A., 1986. - Mise au point des méthodes d'analyse des images à haute résolution: étude statistique du descripteur " densité du bâti " (image TM Marseille 1983). Paris, 44 P.

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

INFORMÁTICA. TELEDETECCIÓN Y OBSERVACIÓN DE LAS POBLACIONES URBANAS. Una investigación vigente en Quito (ECUADOR).

F. DUREAU, B. LORTIC, A. MICHEL, M. SOURIS

ORSTOM, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

Desde 1985, el Departamento "Urbanización y Socio-sistemas Urbanos" de la Orstom viene desarrollando un programa de investigación sobre la utilización de la teledetección para la observación de las poblaciones urbanas. El objetivo de este programa, todavía vigente, es el de perfeccionar un sistema de observación permanente de dichas poblaciones utilizando la información aportada por los satélites de alta resolución (SPOT y Thematic Mapper). La idea central es la siguiente : utilizar la información exhaustiva sobre la ocupación del suelo enviada continuamente por estos satélites, para recolectar rápidamente, por sondeo areolar, los datos relativos a las poblaciones urbanas.

Los métodos clásicos de recolección de datos demográficos no permiten asegurar una observación continua y localizada de las ciudades de los países en desarrollo, con ritmos de crecimiento a menudo muy elevado ; en cambio, las experiencias de observación demográfica basadas en fotografías aéreas realizadas desde la década de los cuarenta, han demostrado claramente la eficacia de la morfología urbana como vector para la observación de las poblaciones residentes en ciudades. Ahora que los satélites están logrando una resolución suficiente para observar bastante detalladamente el tejido urbano, parece pues necesario comprobar desde ya las posibilidades de implantar los métodos de observación demográfica integrando datos morfológicos observables mediante la imagen del satélite : tal es el objetivo del programa de investigación dentro del cual se inscriben los trabajos presentados en esta comunicación.

Las primeras investigaciones se llevaron a cabo en la ciudad de Marsella (FRANCIA): dentro del marco del sistema de información TIGRE desarrollado por la Orstom, se ha constituido una base de datos localizados que integran datos demográficos, morfológicos y de teledetección, lo que ha permitido desarrollar cierto número de métodos de teledetección urbana y sondeos espaciales.

La segunda fase del programa se lleva a cabo en Quito (ECUADOR), donde el programa constituye una parte del Atlas Informatizado de Quito, consagrada a los métodos de actualización de los datos morfológicos y demográficos.

Ya sea en Marsella o en Quito, el tratamiento informático de los datos geográficos ocupa un lugar muy importante en las investigaciones realizadas por el equipo de la Orstom. Es, pues, a partir de estas experiencias que los autores tratan en su comunicación de los dos aspectos principales de un elemento fundamental para su trabajo, la integración teledetección - sistema de información geográfica :

- la teledetección, fuente de información privilegiada para la actualización de los datos de un observatorio urbano, como en el que trabajaron los autores en Quito ;
- el sistema de información geográfica, elemento fundamental para poner al día los métodos de interpretación de las imágenes de satélite en el medio urbano, y para el desarrollo de un sistema de observación demográfica utilizando la información satelitaria sobre la morfología urbana.

Después de haber señalado dentro de qué problemática se enmarca su trabajo, los autores abordan esta cuestión de la integración teledetección-sistema de información geográfica desde un punto de vista general, tanto teórico como técnico, siendo estas dos metodologías totalmente complementarias. Es a través de esta primera parte que se presenta el sistema de información geográfica TIGRE de la Orstom, organizado según el esquema de los sistemas de manejo de base de datos relacional.

Las experiencias realizadas en Marsella y Quito permiten luego mostrar más precisamente los diferentes problemas que presenta la integración de datos localizados emitidos de variadas fuentes de información (como la teledetección espacial) y las repuestas dadas.

En fin, los autores presentan algunos de los principales resultados que se han obtenido en el campo de la teledetección urbana gracias a las posibilidades de relacionar y tratar los datos localizados en el seno del sistema TIGRE : métodos de extracción de información relativa a la morfología urbana a través de la imagen Thematic Mapper de Marsella, y SPOT de Quito (metodologías adoptadas por su desarrollo y validación, así como sus resultados).

En conclusión, los autores se preguntan sobre las repercusiones metodológicas que puede tener una herramienta como el sistema de información geográfica desarrollado por la Orstom sobre la base de las prácticas científicas, principalmente en geografía.

INFORMATICA, TELEDETECCION Y OBSERVACION DE LAS POBLACIONES URBANAS. Una investigacion vigente en Quito (ECUADOR).

F. DUREAU. B. LORTIC. A. MICHEL. M. SOURIS

ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération)

70-74 Route d'Aulnay, 93140 Bondy (FRANCIA) y Ap. Postal 6596 CCI Quito (ECUADOR)

Desde 1985, realizamos investigaciones cuyo objetivo consiste en poner a punto un sistema de observación permanente de las poblaciones urbanas, utilizando las informaciones relativas a la morfología urbana proporcionadas por los satélites de alta resolución. El tratamiento de los datos geográficos ocupa una gran importancia en nuestro programa de investigación, tanto en lo que concierne a la fase de desarrollo metodológico en Marseille (Francia) como en lo que concierne a nuestros trabajos en Quito (Ecuador).

Es esencial utilizar un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.) en la fase de desarrollo del sistema de observación demográfica : las diferentes líneas de investigación implican que se relacionen los datos localizados derivados de diversas fuentes de información y realizar numerosos tratamientos de datos geográficos. Por otra parte, debido a sus cualidades (continuidad espacial y temporal de la observación, carácter numérico de los datos), la teledetección constituye una fuente de información privilegiada para actualizar los datos de un observatorio urbano administrados por un sistema de información geográfica tal como en el que trabajamos en Quito.

Ese trabajo es un buen ejemplo del interés de la utilización de un S.I.G. que permite la integración de la información geográfica y de los datos de teledetección : por consiguiente, nos proponemos desarrollar esta cuestión a través de nuestra doble

experiencia de Marseille y Quito, después de haber mencionado dentro de qué problemática se enmarcan nuestros trabajos, y de haber planteado el problema de la integración de esos dos tipos de información localizada desde un punto de vista general.

1. POR QUE Y COMO SE UTILIZA LA TELEDETECCION PARA LA OBSERVACION DE LAS POBLACIONES URBANAS ?

Desde los años treinta, algunos investigadores trabajando en el ambiente urbano se han interesado por las relaciones entre las características morfológicas de las residencias y las características demográficas y socio-económicas de los habitantes : los trabajos realizados por norteamericanos tales como KENZIE (1934) o PARK (1937) han sido propagados en Francia donde se han efectuado estudios sobre el mismo tema desde los años cincuenta (CHOMBART DE LAUWE, 1952).

La identificación y la caracterización de las relaciones entre la morfología urbana y las características de la población urbana establecidas por esos trabajos han contribuido al desarrollo de métodos para la evaluación de la población a partir de la información relativa a la ocupación del suelo proporcionada por las fotografías aéreas. La idea central de esos métodos consiste en utilizar la información exhaustiva que proporcionan las fotografías aéreas para recoger rápidamente, por sondeo, los datos relativos a las poblaciones urbanas, o para actualizar el total de habitantes en una ciudad que ha sido anteriormente objeto de un censo de población.

Las características de la urbanización en los países en desarrollo, los modos de residencia especiales de los habitantes (sistemas complejos de pluri-residencias) y la escasez de los elementos de identificación clásicos (mapas, planos cadastrales o registros administrativos), hacen las poblaciones urbanas de los países en desarrollo particularmente difícil de observar ; sin embargo, las tasas de

crecimiento demográfico muy elevadas y las modificaciones rápidas del tejido urbano hacen necesarias unas observaciones repetidas. Los métodos clásicos de recolección de los datos demográficos no permiten que se haga una observación continua y localizada de las ciudades en los países en desarrollo :

- los censos exhaustivos necesitan algunos medios (técnicos, financieros y humanos) que no permiten que la periodicidad sea inferior a unos diez años y la explotación de los datos recogidos necesita a menudo más de tres años, lo que es incompatible con el ritmo de crecimiento rápido de las ciudades;
- es a menudo imposible efectuar encuestas por sondeo, debido a la falta de una base de sondeo completa y al día.

Frente a los límites de los métodos clásicos de recolección de datos demográficos, las técnicas para la evaluación de la población basadas en las fotografías aéreas han sido utilizadas desde fines de los años sesenta por los urbanistas en las ciudades de los países en desarrollo donde han demostrado su eficacia. Pero, la utilización de las fotografías aéreas se vuelve más y más problemática. En efecto, las coberturas aéreas realizadas en las ciudades de los países en desarrollo están más y más raras, en razón a los importantes medios requeridos : la repetitividad de la observación aérea está cada vez menos asegurada en esas ciudades. En cambio, esa repetitividad es ahora posible por medio de los nuevos satélites SPOT y THEMATIC MAPPER, que tienen una resolución suficiente (respectivamente 10/20 metros y 30 metros) para efectuar una observación bastante detallada del tejido urbano.

Las imágenes de satélite presentan unas cualidades inherentes a su tipo de registro y a la naturaleza del documento difundido :

- repetitividad de las observaciones (TM 16 días - SPOT 1 a 4 días),
- exhaustividad espacial,
- costo módico : aproximadamente 15 veces inferior al de las fotografías aéreas,

- carácter numérico de los datos,
- abundancia de la información registrada y posibilidad de visión estereoscópica.

Por consiguiente, parece necesario someter a prueba desde ahora las posibilidades de poner en práctica métodos de observación demográfica que incluyen los datos morfológicos observables en la imagen de satélite, a fin de encontrar soluciones frente a las carencias de la observación demográfica clásica o basada en las fotografías aéreas. Se trata de sacar partido de las cualidades de las imágenes de satélite, utilizando la experiencia metodológica representada por los trabajos anteriores relativos a la producción de datos demográficos a partir de fotografías aéreas.

La idea central siempre consiste en utilizar la información exhaustiva sobre la morfología urbana registrada por las imágenes de satélite para recolectar rápidamente, por sondeo, los datos relativos a las poblaciones urbanas.

Un mejor conocimiento del espacio urbano gracias a la información aportada por las imágenes de satélite constituye un factor importante para mejorar un sistema de encuesta demográfica por sondeo :

- para elaborar una base de sondeo completa y al día, compuesta de manzanas claramente definidas,
- para optimizar el sondeo por medio de la estratificación sobre la morfología urbana, y para obtener resultados localizados según una división significativa de la ciudad estudiada.

2. INTEGRAR INFORMACION GEOGRAFICA Y TELEDETECCION : UNA NECESIDAD

Para poner a punto un sistema de producción de datos demográficos localizadas en el ambiente urbano que integra la teledetección espacial, efectuamos estudios

detenidos en dos direcciones principales :

- la interpretación de las imágenes de satélite de alta resolución en el ambiente urbano : definir las informaciones relativas a la morfología urbana contenidas en esas imágenes y los tratamientos que permiten obtener esas informaciones ;
- las relaciones entre el hábitat y la población, y los sondeos espaciales en demografía urbana : definir los criterios morfológicos pertinentes para la observación demográfica.

Esas líneas de investigaciones han sido realizadas desde principios de 1985 en Marseille (Francia) que tenía desde esta fecha los datos necesarios para la primera fase del desarrollo metodológico, es decir las referencias fiables para someter a prueba la validez de los métodos desarrollados a medida que los trabajos progresen. Como lo demostramos más detalladamente luego en esa comunicación, los trabajos realizados en Marseille ilustran el interés de la integración información geográfica y teledetección : la integración de datos localizadas favorece la aparición de nuevos métodos de análisis en teledetección.

En efecto, clásicamente, el análisis de los datos de teledetección se efectúa sea en la totalidad de la imagen, sea en una muestra de la imagen por medio de uno sondeo sistemático, sea en porciones de imagen que constituyen zonas de inicialización cuyas límites no tienen ninguna relación con el contenido de la zona propia. Caracterizar el "pixel" por su pertenencia a una zona geográfica nos abre nuevas vías de investigación para el análisis de las imágenes.

Desde septiembre de 1986, trabajamos en Ecuador, en el marco del Atlas Informatizado de Quito, donde realizamos la primera aplicación en tamaño verdadero del sistema de observación demográfica que integra la teledetección. En esa segunda fase del programa, abordamos el segundo aspecto de la integración

información geográfica y teledetección : la teledetección, fuente de información privilegiada para la actualización de una base de datos manejada por un S.I.G.. Utilizando ciertos datos de la base para inicializar la extracción de la información en la imagen de satélite, se trata de integrar en la base los datos derivados de los tratamientos efectuados en las imágenes de satélite : esos datos podrán entonces cruzarse con todas las informaciones ya disponibles en la base de datos geográficos. En tal caso, la localización de los datos es una información esencial : única clave común, es ella que permite comparar y cruzar los diferentes datos entre sí, por medio de tratamientos que mantienen la pertinencia espacial de los resultados.

3. COMO REALIZAR LA INTEGRACION DE LOS DATOS ?

Teniendo en cuenta las investigaciones realizadas en Marseille o en Quito, los trabajos que deben efectuarse se basan en diferentes tipos de informaciones :

- datos estadísticos localizados (censos...)
- datos geográficos (mapas existentes, interpretación de fotografías aéreas, datos administrativos localizados...)
- imágenes de satélite.

Para analizar esa información, tenemos dos sistemas complementarios en ORSTOM :

a) El sistema de información geográfica desarrollado por el Laboratorio de Infografía de ORSTOM (TIGRE) que permite conservar y manipular los datos geográficos zonales, lineales o puntuales. Sus funciones principales son :

- procesamiento gráfico por medio del digitalizador, procesamiento de las variables descriptivas,
- selección de la proyección geográfica estudiada,
- selección de una zona de estudio,

- investigaciones temàticas y multitemàticas,
- cruzamiento de los datos sobre criterios algèbricos o espaciales,
- cartografia de los resultados,
- calculos sobre las variables (estadísticas,...)
- calculos mètricos (superficies, perimetros).

b) La unidad de procesamiento de las imàgenes de satèlite del ATOB (Laboratorio de Teledetección de ORSTOM en Bondy, Francia).

Aunque el sistema TIGRE se presenta como un software integrado, el ATOB desarrollio un conjunto de programas que efectuan los principales tratamientos en las imàgenes de satelite :

- visualización color por combinación,
- analisis estadístico,
- indices, filtros operadores de textura,
- clasificación controlado o no,
- representaciones gráficas y cartografia.

La idea principal consiste en poder procesar de manera indiferente los datos de teledetección y los datos geogràficos, en poder comparalos y cruzarlos para analizarlos y crear nuevos datos localizados.

La clasificación de una imagen debe poder hacerse con arreglo a la radiometria, pero tambièn con arreglo a los variables exògenos que pueden existir en la base, tales como, por ejemplo, la altura o el sol. Eso significa que el valor relativo a un variable exògeno debe poder atribuirse a cada pixel de la imagen de satelite. Asimismo, un indice de la radiometria calculado, por ejemplo, en un distrito de censo debe poder comparse con una variable exògena a la imagen de satèlite, y despuès integrado como nueva variable de ese distrito.

Figura 1 - La zona de estudio - Marseille (FRANCIA)



Para permitir que se realice un cruzamiento por medio de la localización, es necesario conocer y poder modificar los diferentes parámetros ligados a esa localización : proyección geográfica, espacio de estudio, tamaño del píxel. Por consiguiente, la imagen de satélite debe localizarse con precisión y ponerse en su sitio según una proyección conocida, con objeto de poder obtener una matriz de píxeles cuyos tamaño y localización se conocen. El sistema de gestión de los datos geográficos debe permitir adaptarse a los parámetros de la imagen de satélite seleccionando la proyección geográfica, la ventana de estudio y la resolución espacial de las imágenes.

4. LA UTILIZACION DEL SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA TIGRE EN UNA FASE DE DESARROLLO METODOLOGICO EN MARSEILLE (FRANCIA)

A través de algunos ejemplos de esa primera experiencia, consideramos en ese capítulo los diferentes problemas planteados por la integración de datos localizados derivados de varias fuentes de información, como la teledetección espacial, y las soluciones proporcionadas para aplicar nuestro plan de investigación en Marseille.

4. 1. El plano de investigación

Se definió la zona de estudio con objeto de cubrir los diferentes tipos de barrios en Marseille, es decir : los barrios industriales y los grupos de viviendas obreras del norte, los barrios residenciales del sur, el viejo centro, y las zonas con casas en el este del municipio.

En esa primera fase del programa de investigación, puramente metodológica, los trabajos realizados se basan en tres tipos de informaciones que son casi concomitantes :

- los datos demográficos derivados del censo, realizado por el INSEE en Marzo de 1982,
- las características morfológicas observadas en las fotografías aéreas en gran escala y en el suelo (Agosto de 1982),
- la imagen de satélite THEMATIC MAPPER de Febrero de 1983.

Todas esas informaciones conocidas en toda la zona de estudio se integran en una base de datos manejada por el S.I.G. TIGRE ; así, nos encontramos en una situación de experimentación casi ideal ya que podemos cruzar todos los datos localizados, cada uno mantenido en su implantación espacial propia.

Aunque la base de los datos concierne a la totalidad de la zona delimitada en la Figura 1, todos los trabajos metodológicos no se efectúan en la totalidad de ese espacio. En efecto, es necesario sacar una muestra para poner a punto los métodos : trabajar sobre una muestra permite controlar de manera permanente los métodos desarrollados, sometiéndolos a prueba en un espacio que tiene una información de referencia, es decir en ese caso los datos relativos a la población y a la morfología urbana.

4. 2. Los cruzamientos de datos necesitados por los desarrollos metodológicos

a) Datos demográficos y datos relativos a la morfología urbana

El desarrollo de un sistema de observación demográfica que integra la información satélite implica que se contesten cierto número de preguntas :

- Cuales son los criterios morfológicos pertinentes para establecer la estratificación espacial de una ciudad con objeto de una encuesta demográfica por sondeo, y cuales son los criterios que revelan directamente fenómenos demográficos (tales como la

dinamica migratoria, por ejemplo)?

- Cual es la estrategia de muestreo mas eficaz? Lo que implica que se definan el tamaño y el número de estratos que optimizan la precisión, el tipo de unidad espacial que debe ser analizada, el tipo de selección de la muestra (aleatoria o sistemática, y según qué frecuencia espacial) y el estimador que debe ser utilizado.

Para tratar de contestar esas preguntas, es necesario relacionar y procesar juntamente los datos localizados demográficos y morfológicos, es decir :

- cruzar los datos demográficos y morfológicos para conocer la distribución de la morfología según la división geográfica de los datos demográficos, y lo contrario. Esa información sirve, en otras cosas, para seleccionar una muestra de distritos INSEE representativa de los tipos morfológicos y para estudiar las relaciones entre el habitat y la población por medio de métodos de ajuste ;
- efectuar selecciones y estadísticas espaciales según las modalidades de los datos morfológicos o demográficos ;
- estudiar el modo de implantación espacial de los datos para determinar las hipótesis que pueden hacerse sobre su distribución espacial y, por consiguiente, los métodos de muestreo que deben ser sometidos a prueba ;
- evaluar los resultados obtenidos desde un punto de vista espacial y cuantificado simulando diferentes estrategias de muestreo.

b) Información de satélite y datos sobre la morfología urbana

Debido a la resolución insuficiente de las imágenes LANDSAT MSS, que han sido las únicas obtenidas hasta esos últimos años, la teledetección queda muy poco utilizada en el ambiente urbano, que se caracteriza por una alta heterogeneidad y el tamaño reducido de los constituyentes ; el análisis preciso de la información registrada por los captadores de alta resolución como THEMATIC MAPPER y SPOT, y los métodos para

obtener una información sólo están a su comienzo.

En la situación actual de la teledetección en el ambiente urbano, es primordial que se puedan comparar espacialmente los datos de satélite con los datos de la base sobre la morfología urbana derivados, en el caso de Marseille, de observaciones en el campo y de fotografías aéreas en gran escala.

En efecto, la relación con los datos localizados administrados por el S.I.G. se revela necesaria a varios niveles:

- selección de una muestra espacial de la imagen representativa de los tipos morfológicos presentes en la zona de estudio,
- comparación con las referencias de campo observadas en esa muestra para desarrollar los métodos de interpretación de la imagen de satélite,
- comparación con los datos morfológicos conocidos en toda la zona de estudio para evaluar precisamente los resultados obtenidos utilizando los métodos de interpretación desarrollados en la muestra,
- prueba de la cualidad geográfica de los ajustes de la imagen de satélite comparando las imágenes de satélite ajustadas, con los datos digitalizados en gran escala.

En la actualidad, debido a la complejidad del ambiente estudiado y a los conocimientos relativos a la teledetección urbana, la no utilización de una base de datos administrada por un S.I.G. limitaría considerablemente las interpretaciones de la imagen de satélite, tanto desde el punto de vista temático como desde el punto de vista espacial. Además, como lo escribe con mucho razón A. BALLUT a propósito de la teledetección urbana, una ventaja importante consiste en tener en cuenta la localización: "Sería preciso, en los algoritmos de procesamiento, aplicar nociones relativas a la distribución geográfica". La integración de los datos de teledetección en un S.I.G. tal como el desarrollado por ORSTOM estimula las investigaciones en esa

dirección, para poner a punto métodos de clasificación en teledetección que integran la localización ; asimismo, la localización puede ser un parametro discriminante desde un punto de vista demográfico, con el mismo titulo que los variables que describen la morfología urbana.

4. 3. La realización de la base de datos de Marseille

A partir del análisis de las características temáticas, estadísticas y sobre todo espaciales de las informaciones que deben integrarse en la base de datos de Marseille, explicamos como se ha efectuado esa operación de integración en la base manejada por el sistema TIGRE.

a) Características de las informaciones que deben ser integradas

La imagen de satélite de Marseille que utilizamos ha sido registrada en Febrero de 1983 por el captador Thematic Mapper.

La característica principal de la información contenida en cualquier imagen de satélite proviene del modo de registro que se efectúa sobre unidades elementales llamadas "pixels", cuya superficie es un paralelogramo de 30 metros de lado aproximadamente para Thematic Mapper : los datos satélites siempre se presentan en forma "raster".

La imagen Thematic Mapper de Marseille ha sido ajustada geográficamente por IGN (Instituto Geográfico Nacional, Francia) según una proyección LAMBERT III : ese ajuste se basa en unas diez marcas (puntos característicos de la superficie terrestre que se delimitan bien en la imagen de satélite y se localizan en una mapa topográfica en gran escala).

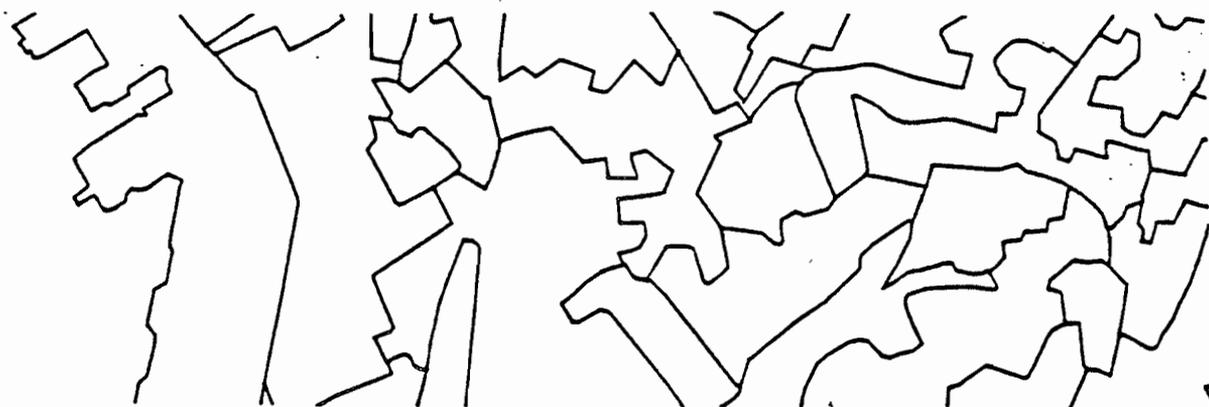
En lo que concierne a los datos demográficos, trabajamos a partir de la cinta de los

Figura 2 - La implantación geográfica de los tres tipos de datos integrados en la base de datos sobre Marseille



Distritos censales INSEE

0 250 500 m



División morfológica

0 250 500 m



Imagen Thematic Mapper

0 250 500 m

resultados exhaustivos por distrito censal en el municipio de Marseille que comprende, además de la población total, las distribuciones de esa población según unas diez características individuales. Esos datos recolectados en el censo de Marzo de 1982 se inscriben en la división INSEE en distritos censales que resulta de criterios administrativos, demográficos y físicos : por esto, no existe ninguna relación bi-unívoca entre la división física de la ciudad determinada por las construcciones, las calles, las vías férreas y los ríos, y la división INSEE.

En lo que concierne a la información morfológica, ha sido determinada a partir del mosaico fotográfico a la escala 1/23000 : los descriptores morfológicos (densidad del habitat...etc) se inscriben en una división de la zona de estudio en 542 zonas que no corresponde a la división INSEE ni a la de los bloques de casa, aunque el trazado de las calles introduce una discontinuidad en el espacio urbano y por consiguiente tiende a influir en ciertos casos sobre el trazado de las zonas homogéneas.

Como lo muestra la Figura 2, los tres tipos de datos localizados que deben integrarse en la base entran en el marco de los diferentes divisiones geográficas. Esas diferentes divisiones resultan naturalmente del modo de implantación espacial propia de cada fenómeno, pero también del método de recolección y explotación de la información que describen ese fenómeno. Ese segundo factor desfigura necesariamente la realidad de los hechos que se trata de observar : los datos que deben integrarse en la base corresponden cierta modelización de la realidad que dominamos más o menos según la fuente de información. Se completa esa modelización con las selecciones efectuadas en las modalidades de integración de los datos en la base que vamos a examinar ahora.

b). Integración de la información morfológica y demográfica en la base de datos

Se efectúa la integración de los datos demográficos y morfológicos en la base manejada por el sistema TIGRE de la manera siguiente, en tres etapas sucesivas :

- preparación de los fondos de mapas antes de la numerización,
- numerización de los fondos de mapas sobre una mesa de digitalización,
- integración de la información temática.

En el sistema TIGRE, se procesan y se conservan en forma vectorial la información gráfica que describe la división INSEE (límites de los distritos censales reportados en planos a escalas 1/5000 y 1/2000) y la división morfológica (límites de las zonas morfológicamente homogéneas reportados en un mapa IGN a escala de 1/25000). Después de la numerización, las coordenadas relativas a los perímetros de las zonas se convierten en coordenadas geográficas conocidas para los tres o cuatro puntos de ajuste procesados al mismo tiempo que el fondo cartográfico.

En la base de datos, se conservan las coordenadas geográficas del conjunto de los puntos que componen los perímetros de las zonas : longitud, latitud con relación a un punto de referencia propio de la base. Así, no hay ningún obstáculo técnico a la integración y a la relación de informaciones gráficas procesadas a escalas o según sistemas de proyección diferentes. Sin embargo, queda un límite conceptual a los cambios de escala que prohíbe la utilización sin ninguna precaución de un dato a una escala demasiado diferente de su escala de validez.

c). Integración de los datos de teledetección

En el sistema TIGRE, los datos gráficos están estructurados y almacenados en forma vectorial : cómo integrar en este sistema datos de teledetección que son normalmente en forma matricial?

Una primera solución consiste en poner en forma vectorial los datos de teledetección: esa solución, que puede aplicarse en ORSTOM, puede ser considerada sólo después de haber simplificado la imagen inicial, después de una clasificación, por ejemplo. Por consiguiente, puede considerarse esa solución sólo para integrar en una base administrada por TIGRE los resultados gráficos obtenidos por una explotación de una imagen de satélite: la teledetección sirve para actualizar los datos de la base a partir de las informaciones sobre la ocupación del suelo sacadas de imágenes de satélite.

Otra posibilidad que consiste en integrar los datos de satélite en el sistema TIGRE en forma matricial, es inherente al sistema debido a la fase de transformación temporal vectorial-matricial utilizada por cierto número de tratamientos: el sistema crea imágenes numéricas de pixels asociados con registros descriptivos, la resolución de la matriz estando parámetroable.

Esa doble estructura (almacenamiento vectorial, manipulación matricial) es uno de los elementos importantes del sistema TIGRE: permite manipular fácilmente la estructura matricial sin sufrir los inconvenientes mayores como la reducción inicial de la información para integrar todos los datos en una red de tamaño fijo. Así, se pueden cruzar datos conservándolos en la base en su propio modo de implantación espacial.

Debido a la existencia de la fase de transformación temporal de los datos de la base en estructura matricial, la integración de las imágenes matriciales como las producidas por los satélites no plantea ningún problema esencial. El único problema técnico es la coherencia de los parámetros que definen la matriz de pixels en la cual se proyectan los datos (inicialmente en forma vectorial) y de la matriz de pixels de la imagen de satélite.

Ya que se conocen los parámetros espaciales de la imagen de satélite (tamaño del pixel, sistema de proyección geográfica y coordenadas del pixel SW de la imagen),

basta con crear en TIGRE unas imágenes con parámetros similares: los módulos de interrogación de TIGRE le permite al utilizador hacer esas selecciones en forma interactiva.

4. 4. Nuevos métodos de trabajo en teledetección por medio del sistema de información geográfica TIGRE

En materia de teledetección urbana, los primeros resultados obtenidos dentro del marco del programa de investigación conciernen a :

- la prueba de la cualidad geométrica de las imágenes ajustadas geográficamente con un modelo numérico de campo y sin él (niveles 2 y 3 de los ajustes efectuados por IGN) : la relación entre los datos Thematic Mapper y el trazado de la red de comunicaciones resultando del procesamiento en gran escala de los distritos INSEE nos permitió, entre otras cosas, someter a prueba la cualidad del ajuste geográfico de la imagen Thematic Mapper : esa prueba que dió un resultado muy satisfactorio permite precisar los límites y los métodos de utilización del documento satélite en el ambiente urbano.

- el desarrollo de una metodología de recolección de informaciones sobre la morfología urbana que sirve de referencias de campo para interpretar las imágenes de satélite. Ese método que es propio del ambiente urbano y que corresponde a sus características especiales de ocupación del suelo, fué puesto a punto en Marseille y aplicado en Octubre-Noviembre de 1986 en Quito.

- el análisis estadístico descriptivo de los datos espectrales de la imagen TM.

- el desarrollo de métodos para sacar la información relativa a la densidad del habitat en la imagen satélite TM.

El último punto mencionado está en el centro de nuestro programa de investigación.

La descripción a continuación del método de trabajo adoptado a este respecto en la

imagen TM de Marseille es un buen ejemplo de las nuevas vías de investigaciones por medio de un S.I.G..

La primera fase del trabajo consistió en estudiar las características radiométricas para cada de las seis modalidades de la densidad del habitat, variable morfológica conocida para cada una de las 542 zonas establecidas sobre el mosaico aéreo de 1982 (cf Capítulo 4.1.) : ese análisis estadístico de la radiometría con arreglo a la densidad del habitat se volvió posible produciendo por medio de una interrogación de la base en la variable "densidad del habitat", una imagen cuyas características espaciales son compatibles con las de la imagen TM. Ya que se conocen para cada pixel de la imagen sus valores en los 6 canales TM y su nivel de densidad del habitat, se pueden buscar bajo buenas condiciones los canales, las combinaciones de canales y los operadores espaciales lo más eficaces para discriminar los diferentes grados de la densidad del habitat.

La segunda fase del trabajo consistió en estudiar la muestra de 80 manzanas, seleccionada por sondeo estratificado sobre los tipos morfológicos entre los 3534 manzanas de la zona de estudio. Una encuesta realizada en Marseille en Junio de 1986 permitió completar los datos morfológicos recogidos sobre el mosaico de fotografías aéreas : actualización de la información aérea en fecha del registro de la imagen TM (Febrero de 1983), ajuste de los datos observados en las fotografías aéreas con las referencias de campo (precisiones sobre la altura de las construcciones, la naturaleza de los tejados...etc). Por medio de esa recolección de datos en el campo, asociada con la utilización de fotografías en gran escala (1/8000, colores naturales), es posible trabajar más precisamente que sobre la totalidad de la zona de estudio, utilizando métodos de procesamiento de datos cuantitativos (especialmente correlaciones) : es así que se han desarrollado los métodos para sacar la información sobre la imagen de satélite, los descriptores morfológicos conocidos en la totalidad de

la base han servido para someter a prueba la validez de los métodos desarrollados en la muestra.

Lo que es importante en esa segunda fase de la investigación, consiste en caracterizar un pixel no sólo por su nivel de densidad, sino que por su pertenencia a una manzana determinada de la muestra : así, ya no razonamos por un pixel o conjuntos de pixels cuya definición no se relaciona directamente con el contenido de la zona, sino por zonas definidas según su contenido. Ese enfoque que es nueva en teledetección permite relacionar de manera precisa la radiometría y la ocupación del suelo, y facilita los trabajos sobre la textura, dentro de zonas que corresponden a una realidad geográfica donde la noción de disposición puede ser estudiada de manera precisa.

5. A PROPOSITO DE LA CONSTITUCION DE UNA BASE DE DATOS URBANOS QUE INTEGRA LA TELEDETECCION : EL ATLAS INFORMATIZADO DE QUITO (ECUADOR)

En Quito, se trata de aplicar los métodos desarrollados sobre "el caso de estudio" que constituye Marseille donde teníamos casi simultáneamente informaciones demográfica, morfológica y de satélite : aplicamos por primera vez a la capital del Ecuador el sistema de producción de los datos demográficos, desarrollado en Marseille.

Esa aplicación entra en el marco del proyecto "Atlas informatizado de Quito", en el que participan en Municipio de Quito, el I.G.M. (Instituto Geográfico Militar), el I.P.G.H. (Instituto Panamericano de Geografía y Historia) y la ORSTOM.

El objetivo del Atlas es doble : consiste en proporcionar los elementos para hacer una evaluación de la ciudad a fines de los años 1980, y en desarrollar una metodología que permitirá efectuar una actualización periódica y procesar las informaciones de manera eficaz. A este respecto, se entregarán los datos en una base administrada por

el sistema TIGRE. El desarrollo de un método de recolección de los datos basado en la teledetección constituye uno de los objetivos metodológicos del Atlas, tendiendo a satisfacer las necesidades de los gestores urbanos en materia de producción rápida de informaciones localizadas.

Para ese último objeto, las principales etapas del trabajo corresponden a las que se observarían, en una fase operacional, para cualquier aplicación del método :

- Encuesta sobre la morfología urbana donde se recolectan informaciones precisas sobre la ocupación del suelo en una muestra de manzanas de Quito para iniciar la interpretación de las imágenes de satélite;
- Análisis de las relaciones entre el hábitat y la población, sobre una submuestra de las manzanas estudiadas desde un punto de vista morfológico;
- Estratificación sobre la imagen satélite y selección de la muestra a encuestar;
- Encuesta demográfica : evaluación de la población y análisis de los modos de residencia;
- Utilización de la encuesta, producción de los datos demográficos por estimación.

Hasta que la encuesta final proporcione los datos demográficos, utilizamos sólo los documentos básicos que pueden existir en cualquier ciudad de los países en vías de desarrollo : imagen satélite y planos urbanos no actualizados. Se utilizarán sólo al fin de la experimentación los otros tipos de información que existen en Quito y generalmente no existen en otras ciudades, para examinar la coherencia de nuestros resultados. Además, no podrá ser muy precisa esa comprobación, debido a la diferencia temporal entre la última cobertura aérea (1984) y el último censo (1982) y nuestras propias observaciones (1986-1987). Sin embargo, podremos comprobar de

manera bastante aproximada :

- la interpretación de las imágenes de satélite utilizando las fotografías aéreas como referencia,
- las evaluaciones de poblaciones con relación a proyecciones derivadas del censo de 1982.

En la concepción general de la organización del programa de investigación, decidimos realizar los desarrollos metodológicos en el sitio de Marseille. Sin embargo, algunos puntos metodológicos que no fueron tratados en Marseille, son objeto de estudios específicos en Quito :

- la definición de las unidades espaciales que deben ser estudiadas : en Marseille, debido a la utilización de datos del censo para simular las encuestas por muestreo, nos vemos obligado a trabajar en los distritos censales definidos por el INSEE, es decir una división espacial resultando de criterios administrativos, demográficos y físicos. Al considerar esos diferentes parámetros, se llega a una división espacial en unidades de tamaño muy variable que no corresponde sistemáticamente a la manzana urbana en el sentido físico del término, es decir el bloque de casas.

En Quito, no hay una división espacial impuesta, por consiguiente, podemos someter a prueba varios tipos de unidades estadísticas y buscar las que son más fiables para la recolección de datos y las más precisas para las estimaciones demográficas. Se efectuará esa prueba sobre la submuestra de manzanas donde tenemos la información demográfica y morfológica.

- La estereoscopia sobre la imagen de satélite en el ambiente urbano : debido a las variaciones posibles del ángulo de captación, el satélite SPOT permite que se realice la visión estereoscópica. En Quito someteremos a prueba la importancia de esa nueva información en teledetección espacial y su grado de precisión para determinar las alturas de las construcciones.

- La comparación de la información proporcionada por SPOT y TM : al disponer de esos dos tipos de imágenes tomadas respectivamente en Noviembre y Septiembre de 1986, podemos evaluar las ventajas y las inconvenientes de cada una de esas fuentes de información y su complementaridad.

6. EN CONCLUSION, NUEVAS PERSPECTIVAS

... EN TELEDETECCION

La utilización del sistema TIGRE permite una mejor percepción de la realidad de la zona de recolección, porque los objetos estudiados se definen con relación a su localización real. En cambio, los valores numéricos procesados en teledetección parecen como una densidad radiométrica en la superficie de un pixel, zona arbitraria que tiene muy pocas veces una composición homogénea y que por consiguiente no corresponde directamente al fenómeno estudiado : la transmisión de un pixel a una zona definida con relación al fenómeno que debe ser estudiado permite cambiar de escala, lo que aumenta las posibilidades de análisis en teledetección espacial.

La combinación de un sistema de información geográfica con datos de teledetección permite hacer fácilmente dos enfoques indispensables en teledetección, es decir :

- considerar el pixel con relación a una estratificación del espacio (por ejemplo la altitud, la pendiente, la pluviometría...) porque se sabe muy bien que el mismo valor de un índice radiométrico puede corresponder a objetos diferentes, asimismo, una clase de ocupación del suelo puede tener varias repuestas según los estratos espaciales considerados;
- considerar objetos predefinidos (la casa, la manzana, el barrio, la parcela...) y conocer mejor esos objetos por medio de una enfoque contextual de la radiometría

(por ejemplo, disposición geométrica y radiométrica en la zona, cálculo del valor de un índice para la zona...)

Sacar el píxel de su ghetto radiométrico, permitir la creación y la actualización rápida de una cartografía temática : tales son las vías que nos parecen hoy día abiertas en teledetección por la utilización de un sistema de información geográfica.

.... Y, DE MANERA GENERAL, A PROPOSITO DE LAS PRATICAS CIENTIFICAS.

Más allá de los efectos de la utilización de una S.I.G. como TIGRE sobre los métodos en teledetección, también hay que insistir en el impacto que puede tener la introducción de una información localizada relativa a las características morfológicas del ambiente urbano en un sistema de recolección de datos demográficos.

En demografía o en cualquier otra disciplina, definiciones, indicadores, conceptos y problemática están estrechamente ligados a los métodos de recolección de los datos.

La utilización eventual de la teledetección espacial en demografía urbana tendrá un impacto inevitable a esos diferentes niveles. Algunos ejemplos permiten definirlo fácilmente :

- Al nivel de las definiciones : la utilización de las imágenes de satélite privilegia los criterios morfológicos tales como la densidad del hábitat por unidad de superficie para definir los límites urbano/rural.

- Al nivel de los indicadores : el análisis de las formas y estructuras y, de manera general, de los cambios dentro de la ciudad o de su extrarradio en las imágenes de satélite puede permitir que se elabore cierto número de indicadores cualitativos relativos al crecimiento urbano.

- Al nivel de la problemática : la utilización de la teledetección para observar las poblaciones urbanas introduce el espacio como vector de observación (debido a la estrategia de muestreo espacial estratificado en la morfología) y/o como objeto de

observación (si se consideran las formas de ocupación del suelo como una dimensión del crecimiento urbano). Así se privilegian las diferenciaciones de las subpoblaciones urbanas en el análisis demográfico de la ciudad. A otra escala, la teledetección hace más fácil la evaluación repetida de las poblaciones urbanas, lo que incita a realizar investigaciones sobre la dinámica demográfica de las estructuras urbanas que se centran sobre el análisis sistémico de los tamaños de las ciudades.

Por último, debido a la disminución de la muestra estudiada derivando de la estratificación morfológica en la imagen de satélite, esa investigación que está lejos de contribuir sólo a la recolección rápida de los datos demográficos cuantitativos, también incita a efectuar una observación demográfica de los individuos constituyendo la muestra más detallada que la efectuada por medio de los métodos tradicionales de sondeo.

Esos ejemplos no abarcan la totalidad de las repercusiones que puede tener el desarrollo de un nuevo método de recolección demográfica que integra la teledetección, pero permiten que nos demos cuenta de su importancia. Son inevitables esas repercusiones, pero también y sobre todo, a nuestro juicio, son útiles, en la medida en que dan a la problemática población-espacio un lugar preferente, y permiten una renovación del análisis demográfico en el ambiente urbano.

ELEMENTOS DE BIBLIOGRAFIA

Estudios u modelización de las relaciones entre morfología urbana y población

CHOMBART DE LAUWE, 1952. - L'espace social d'une grande cité. Paris et l'agglomération parisienne. Paris, P.U.F..

HUXLEY J.S., 1932. - Problems of relative growth. London, Methuen.

KENZIE M., 1934. - Human ecology.

NORDBECK S., 1965. - The law of allometric growth. Michigan Inter-University Community of Mathematical Geographers.

PARK R.E., 1937. - Human ecology american of sociology. Vol. XLIII.

TOBLER W.R., 1969. - Satellite confirmation of settlement size coefficients. Area, Vol. 1, n° 3, pp. 30-34.

Utilización de datos de teledetección aérea y espacial para estimaciones demográficas

ADENIYI P.O., 1983. - An aerial photographic method for estimating urban population. Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 49, n° 4, pp. 545-560.

BALLUT A. et GAUTHIER M., 1983. - Une méthode pour la production de données socio-économiques spatialisées dans le cadre d'un schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme. IAURIF, Paris, 55 p..

GREEN N.E., 1956. - Aerial photographic analysis of residential neighborhoods : an evaluation of data accuracy. Social Forces, n° 35, pp. 142-1247.

HOLZ R.K., HUFF D.L., MAYFIELD R.C., 1969. - Urban spatial structure based on remote sensing imagery. Sixth International Symposium Remote Sensing Environment, Vol. II, pp. 819-830.

HSU S.Y., 1971. - Population estimation. Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 37, n° 5, pp. 449-454.

LAURIF, ROC, SIDAU, SEE, 1983. - Les données urbaines. Système permanent de production rapide et économique. Recherche et synthèse. Paris, 82 p.

KRAUS S.P., SENGER L.W., RYERSON J.M., 1974. Estimating population from photographically determined residential land use types. Remote sensing of environment, n° 3, pp. 35-42.

LO C.P. et WELCH R., 1977. - Chinese urban population estimates. Annals of the Association for American Geographers, Vol. 67, n° 2, pp. 246-250.

PORTER P.W., 1956. - Population distribution and land use in Liberia. London School of Economics and Political Science, Thèse de Ph. D.

VERNIERE M., 1978. - Méthode d'analyse quantitative de la croissance urbaine dans l'espace et dans le temps. Exemple d'une banlieue de Dakar (Sénégal). Photo interprétation, n° 1, pp. 34-55.

WATKINS J.F., 1985. - Small area population estimates using aerial photography. Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 51, n° 2, pp. 1933-1935.

Teledetección espacial en el ambiente urbano

BALLUT, 1980. L'étude de l'occupation du sol par satellite. Cahiers de l'IAURIF, Vol. 61, 20 p.

BOQUET E., 1980. - Réactualisation du Mode d'Occupation du Sol par utilisation des simulations SPOT (81 et 83). Université Paris VII, mémoire de maîtrise de géographie, 109 p.

CNRS, 1982. - Débats des journées télédétection en milieu urbain (6-7 mai 1982). CERG, Paris, 141 p.

IGN, 1984. - Recherches méthodologiques sur l'utilisation de la télédétection spatiale en aménagement urbain. IGN, Paris, 19 p.

THIBAUT C., BIANCALE M., DELAVIGNE R., 1983. - La télédétection par satellite appliquée au milieu urbain : test de validité de l'indice de végétation dans la proche couronne. IAURIF, 151 p.

WILMET J. et SOYER J., 1982. - Lubumbashi et le sud-est du Haut Shaba : interprétation de données LANSAT. Bulletin de la Société Belge d'Etudes Géographiques, pp. 87-100.

Teoria de los sondeos y análisis de los datos

BENZECRI J.P. et al., 1973. - L'analyse des données. 1 : la taxinomie. 2 : l'analyse des correspondances. Paris, DUNOD, 635 + 632 p.

COCHRAN J., 1953. - Sampling techniques. England, VILLEY.

DESABIE J., 1966. - Théorie et pratique des sondages. Paris, DUNOD, 479 p.

HOUSEMAN E., 1975. - Area frame sampling in agriculture. Statistical Reporting Service, United States of Department of Agriculture. Washington, D.C. 20250, 79 p.

MATHERON J., 1965. - Les variables régionalisées et leur estimation. MASSON, 305 p.

Bases de datos

GARDARIN G., 1983. Bases de données. les systèmes et leurs langages. Paris, Eyrolles, 265 p.

PUBLICACIONES Y NOTAS DE TRABAJO DEL EQUIPO ORSTOM

- Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1986. -Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport intermédiaire - Avril 1986. Paris, 190 p.
- BARBARY O., 1985. -Projet de thèse de mathématiques appliquées aux sciences de l'homme, sous la direction de M. BARBUT, EHESS. Sujet : "Elaboration de plans de sondage pour l'estimation de données spatio-temporelles, en prenant en compte les informations fournies par la télédétection. Application aux données démographiques en milieu urbain des pays en développement". Paris, 20p.
- BARBARY O., 1986. - Apport d'une stratification morphologique des districts INSEE de recensement dans l'estimation par sondage des effectifs de population à Marseille. Quito, 47 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 (Italie), 5-12 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.
- DUREAU F., 1986. - Marseille : tirage de l'échantillon de travail. Quito, 9 p.
- DUREAU F. et MICHEL A., 1986. - Quito : enquête morphologie urbaine. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). Quito, 19 p.
- DUREAU F., 1987. - Quito : enquête bâti/population. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). Quito, 27 p.
- 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., 1986. - Projet de thèse de géographie, sous la direction de J.P. RAISON, EHESS. Sujet : " Télédétection et observation suivie de la morphologie et de la démographie des villes des pays en développement. Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution et évaluation des informations fournies par ces images ". Paris, 9 p.
- MICHEL A., 1986. - Le point sur la télédétection urbaine en 1986 à travers la bibliographie française et anglo-saxonne sur le sujet. Recueil des fiches de dépouillement des articles et ouvrages. ORSTOM, 49p.

MICHEL A., 1987. - Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution : étude statistique du descripteur "densité du bâti", présentation des classifications (Image TM Marseille 1983). Paris, 90 p.

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.

UTILISER LA TELEDETECTION SPATIALE POUR PRODUIRE RAPIDEMENT DES DONNEES DEMOGRAPHIQUES EN VILLE. L'exemple de Quito (EQUATEUR).

*DUREAU F. (géographe-démographe), BARBARY O. (statisticien),
LORTIC B. (télé-détection), MICHEL A. (urbaniste) (*)*

Mission Orstom, Apartado Postal 6596 CCI, Quito, Equateur

(*) Orstom, Atelier de télé-détection, 70-74 Route d'Aulnay, 93140 Bondy, France

Le rythme et les modalités de la croissance urbaine des villes des pays en développement rendent les observations démographiques très délicates : face à cette complexité, les techniques classiques se révèlent difficiles à mettre en oeuvre. 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.

Face au manque de données démographiques récentes auquel sont confrontées les autorités durant les périodes intercensitaires, il paraît nécessaire de développer de nouvelles méthodes adaptées à la spécificité démographique de ces villes. A cet effet, la télé-détection spatiale, assurant une observation continue et relativement précise (SPOT et THEMATIC MAPPER) de l'occupation du sol, constitue une source de données particulièrement intéressante : comme l'ont montré depuis les années cinquante les travaux réalisés sur photographies aériennes, 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.**

Notre équipe a commencé par des travaux préliminaires sur la ville de Marseille (FRANCE), qui possédait dès cette date les données nécessaires à la première phase de développement méthodologique : image satellite Thematic Mapper, photographies aériennes à grande échelle, et recensement de population exploitable au niveau de l'ilot. L'existence de ces informations de référence a permis non seulement de développer, mais aussi de tester la validité de méthodes d'interprétation d'image Thematic Mapper en ville, de sondages spatiaux, et d'intégration de données de télé-détection dans une base de données gérée par le système TIGRE.

Depuis Août 1986, une partie de l'équipe est affectée à Quito au sein de l'Atlas Informatisé de Quito, pour mettre au point des méthodes de production de données morphologiques et démographiques appropriées au contexte quiténien et à l'environnement informatique de l'Atlas de Quito. C'est dans ce cadre qu'a été réalisée la première application en vraie grandeur de la méthodologie de collecte de données démographiques utilisant la télé-détection : au cours du dernier trimestre 1987, nous avons réalisé une enquête démographique par sondage, sur un échantillon d'ilots tiré de l'image satellite SPOT.

Dans la présente communication, nous exposons l'ensemble de la chaîne méthodologique développée par notre équipe et expérimentée à Quito : exploitation de l'image SPOT, sélection de l'échantillon spatial et mise en oeuvre de la collecte de données sur le terrain. A partir de notre expérience quiténienne, nous évaluons le degré de portabilité de la méthode à d'autres sites urbains.



A. MICHEL
Allocataire MRT attaché au département D UR 406
F. DUREAU
Responsable du programme, en poste à Quito,
département D UR 406
B. LORTIC
Chercheur associé, atelier de télédétection de
l'ORSTOM à Bondy (ATOB)
M. SOURIS
Ingénieur de recherche, responsable de l'Unité
d'Infographie, Bondy.

MISE AU POINT DES MÉTHODES D'ANALYSE DES IMAGES DES SATELLITES A HAUTE RÉSOLUTION ET ÉVALUATION DES INFORMATIONS FOURNIES PAR CES IMAGES

Étude statistique du descripteur « densité du bâti ». Présentation des classifications

La communication que nous présentons ici brièvement est un résumé d'une partie du programme « Télédétection et observation suivie de la morphologie et de la démographie des villes des pays en développement » mené par le département D de l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement) en collaboration avec l'Unité d'Infographie et l'Atelier de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy.

OBJECTIF

programme de recherche de l'ORSTOM (ATP CNRS/CNES).

Dans les villes des pays en développement, la croissance démographique est telle que les méthodes classiques utilisées jusqu'à présent pour estimer des effectifs de population sont inadéquates. Les coûts technique, financier et humain des recensements exhaustifs rendent prohibitifs

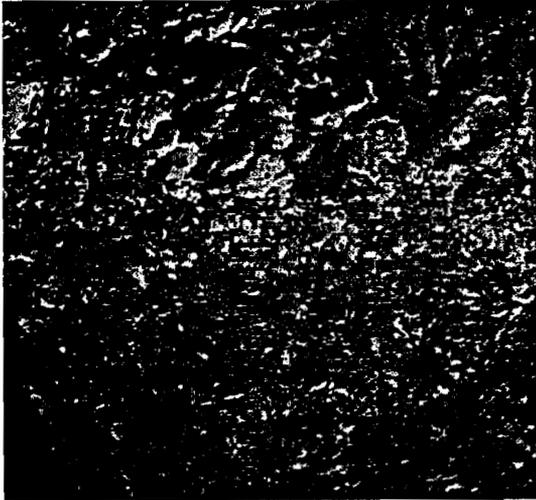
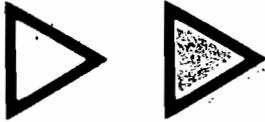


Photo 1 : Image TM Canal 4.

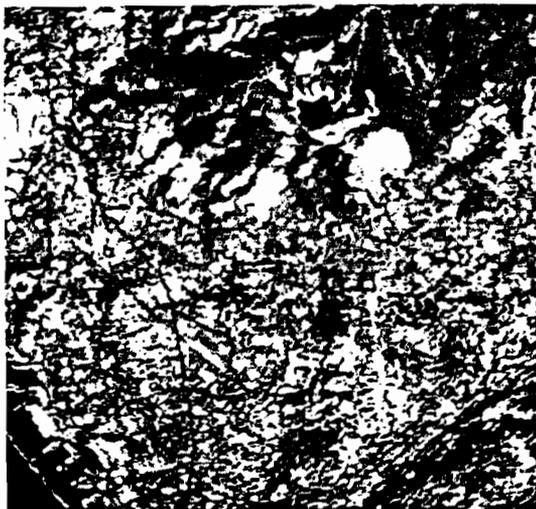


Photo 2 : 1^{re} composante principale.

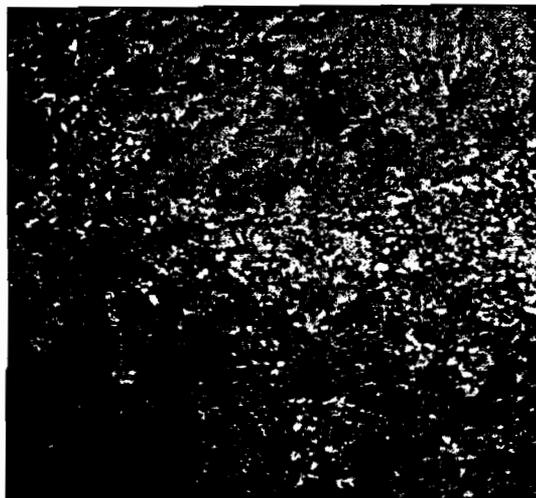


Photo 3 : Indice de végétation.

une telle opération pour une périodicité inférieure à une dizaine d'années. Quant aux enquêtes par sondage, l'absence d'une base de sondage complète et à jour hypothèque fortement leur fiabilité. Cependant, seul un système basé sur la technique des sondages peut remplir les conditions de souplesse et de rapidité nécessaires dans les villes à croissance démographique rapide. Connaître de façon approfondie la morphologie du tissu urbain permet de réaliser une **stratification de l'espace urbanisé** qui ne peut qu'améliorer le résultat d'une enquête effectuée sur une base de sondage **stratifiée** et **exhaustive**.

Les missions aériennes deviennent de plus en plus rares et onéreuses. Par contre les satellites récemment mis sur orbite délivrent des images dont la résolution spatiale est de plus en plus précise. Leur répétitivité, ainsi que la richesse des informations qu'ils enregistrent rendent leur utilisation attractive. Néanmoins, l'interprétation de ces images nouvelles en milieu urbain est plus délicate que celle des photographies aériennes auxquelles nous sommes désormais habitués.

L'objectif principal assigné au programme de recherche est de mettre au point un système d'observation permanent des populations urbaines, en intégrant l'information satellitaire sur la morphologie urbaine : suivi des effectifs et caractéristiques générales des populations et mise en œuvre de sondages spatiaux stratifiés sur image SPOT ou Thematic Mapper pour des investigations approfondies par le comportement des citoyens. La stratification sera obtenue après traitement des images Thematic Mapper ou SPOT de façon à faire apparaître les différents descripteurs de la morphologie urbaine pertinents pour une observation démographique.

Ce sont les étapes de la mise au point de cette stratification, du moins la mise en évidence du premier de ces descripteurs, la densité du bâti, que nous exposons dans cette présentation.

Problématique du travail effectué

Nous posons comme hypothèse et départ qu'un **système de relations étroites existe entre la morphologie urbaine et la démographie**. L'axe central de notre problématique est simple : est-il possible d'extraire d'une image Landsat Thematic Mapper (résolution spatiale ou IFOV 30 mètres, résolution spectrale 7 bandes allant du visible à l'infra-rouge thermique) des informations pertinentes pour rendre compte de la morphologie urbaine, et plus particulièrement de la **densité du bâti** ? Les questions qui en décou-

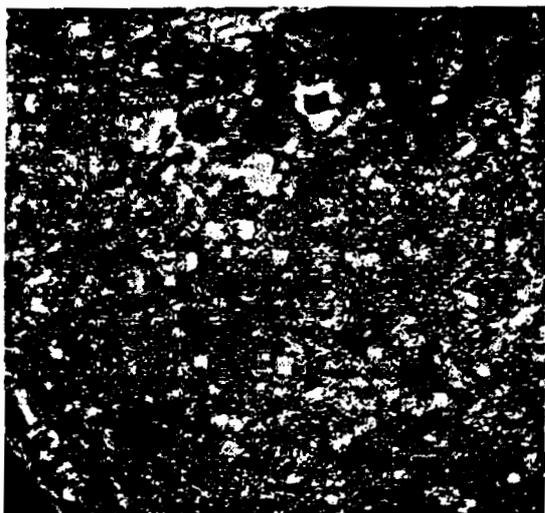


Photo 4 : Ecart type local 5x5.

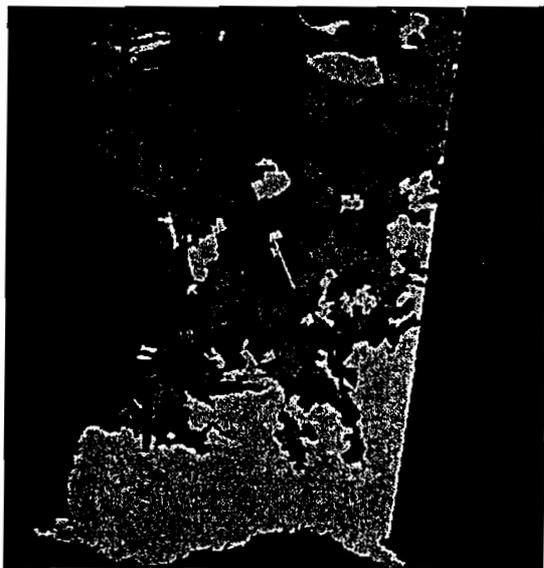


Photo 5 : Densité du bâti. Ensemble de la zone.

lent immédiatement sont les suivantes :

- Quels sont les moyens les plus appropriés pour traiter les informations initiales (les valeurs du pixel dans les différents canaux) afin de mesurer la densité du bâti ? Quelle méthodologie employer ?
- Quels sont les paramètres spectraux ou spatiaux qui discriminent le mieux la densité du bâti ?
- Comment mesurer la fiabilité des traitements développés ?

C'est à toutes ces questions que nous apporterons un début de réponse au cours de cette étude.

DÉMARCHÉ

Justification du choix du descripteur densité du bâti.

Une analyse de la mosaïque photo-aérienne de la ville de Marseille a été réalisée. Chacune des 542 zones homogènes délimitées a été décrite à l'aide de 11 critères morphologiques. Parmi ces 11 descripteurs retenus et testés sur Marseille, celui décrivant la densité du bâti nous a semblé le plus opportun à mettre en évidence sur l'image satellite en premier lieu. En effet ce sera celui qui interviendra le plus fortement dans l'explication des variations spatiales des indicateurs démographiques. Ce descripteur caractérise l'ensemble de la zone d'étude à l'aide des 6 modalités suivantes : non bâti, très faible, faible, moyenne, forte, très forte.

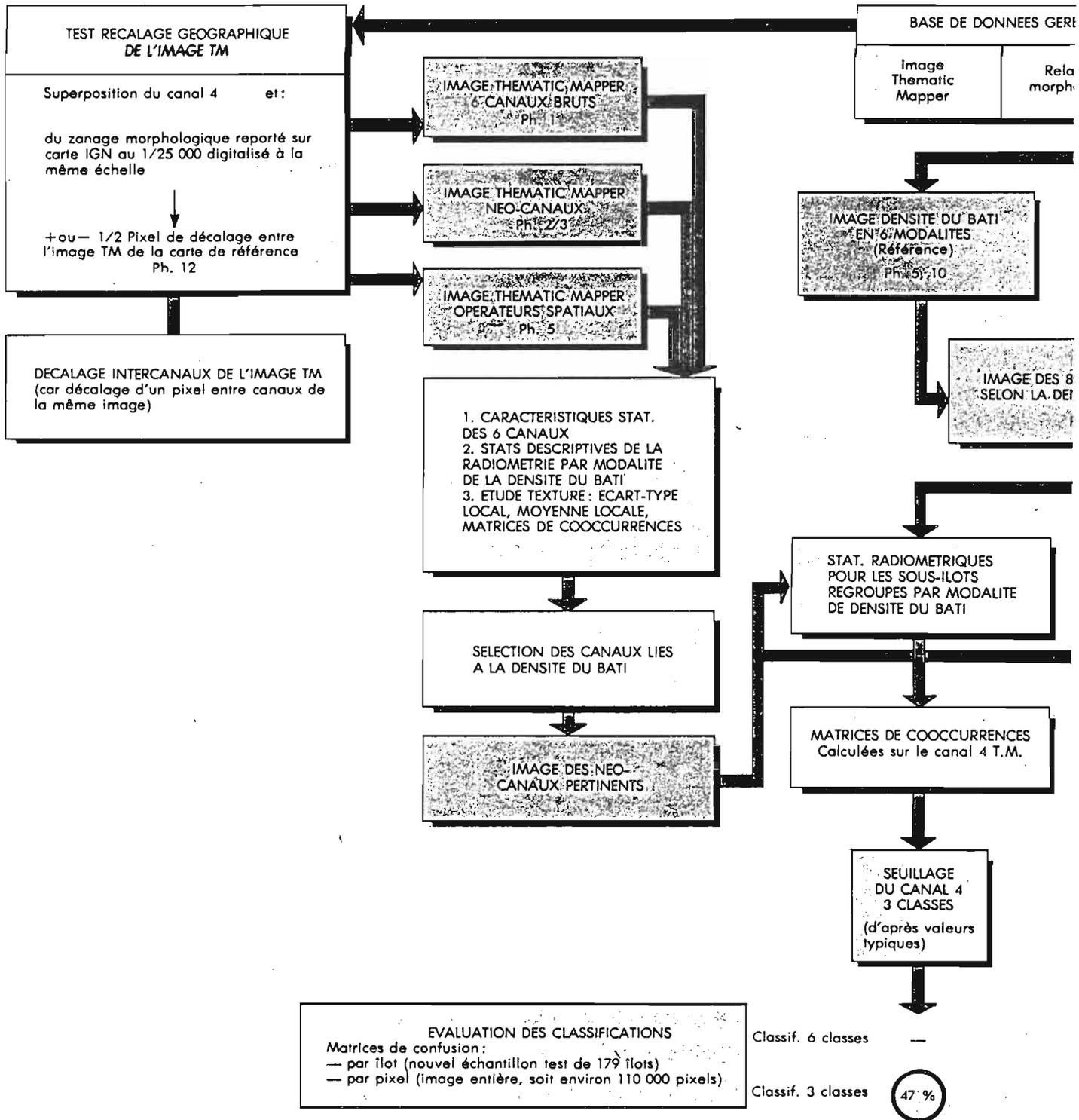
Le but de ce travail est de générer à partir d'images Landsat TM 6 canaux, une image qui rend compte de la densité du bâti observée sur mosaïque, et vérifiée sur le terrain. De façon plus pragmatique, il s'agit donc de classer les images de Landsat TM afin de se rapprocher le plus possible de l'interprétation visuelle de la densité du bâti réalisée sur la mosaïque photo-aérienne échelle 1/23 000.

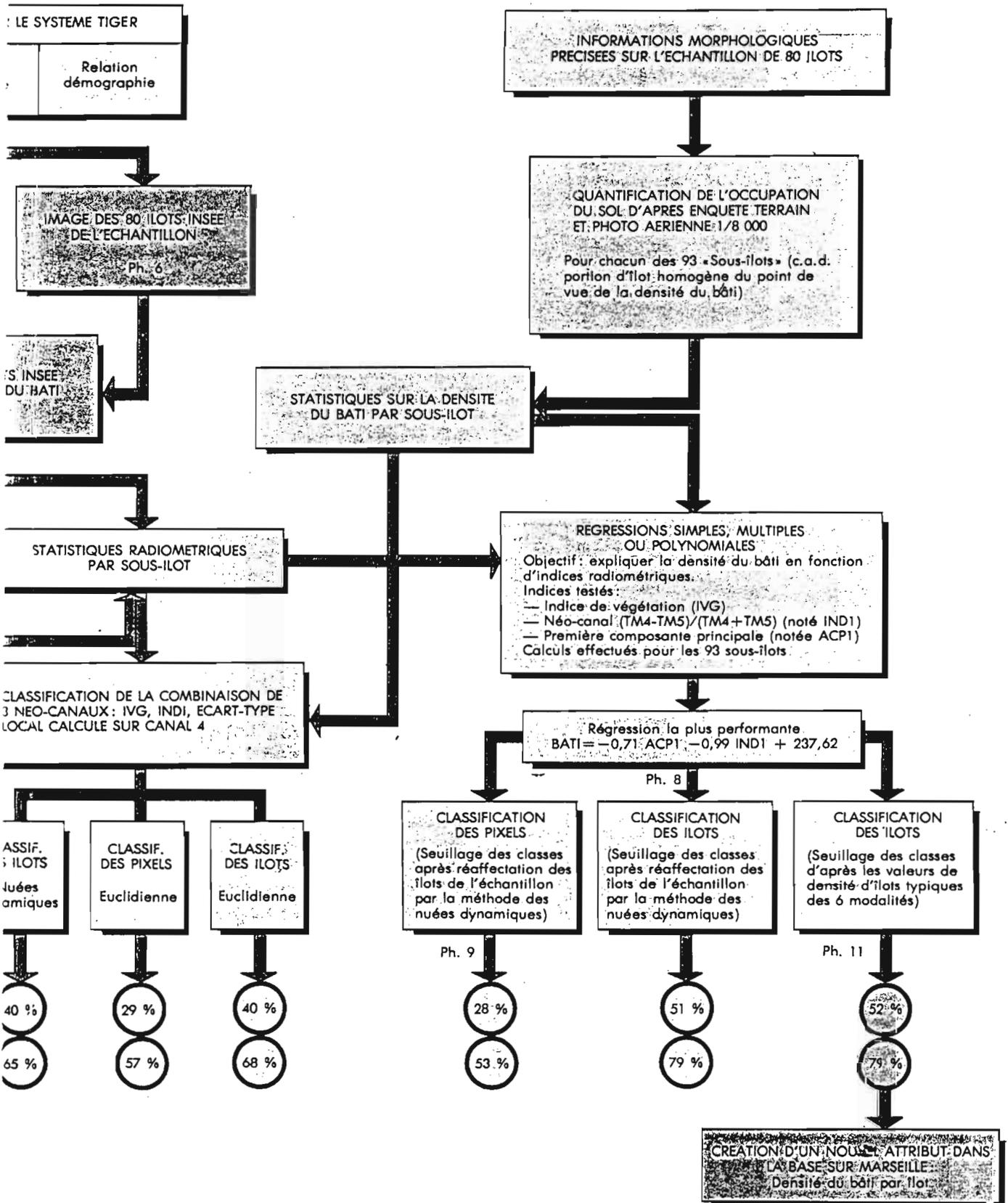
Explication de la démarche suivie.

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur un fichier image généré par Tiger(*) qui décrit la zone d'étude en fonction des 6 modalités du descripteur densité du bâti. (non bâti, très faible, faible, moyenne, fort, très fort). A chacune des différentes zones, pas nécessairement connexes, est affectée la valeur de sa modalité. Des statistiques descriptives classiques sont ensuite calculées pour chaque modalité et dans

(*) Système de gestion de base de données relationnelles développé à l'Atelier d'Infographie de l'ORSTOM. Une base de données localisées intégrant des données démographiques, morphologiques et satellitaires et pilotée par TIGER a été constituée sur Marseille.

EXTRACTION DE L'INFORMATION SUR LA DENSITÉ DU BÂTI Image Thematic Mapper de Marseille





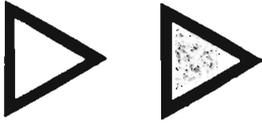


Photo 6 : Echantillons îlots INSEE



Photo 7 : Croisement-échantillons îlots INSEE et strates.

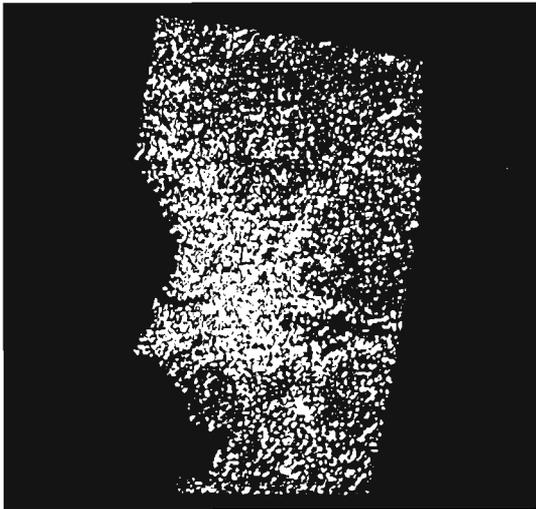


Photo 8 : régression îlot-Bâti/ACPI, Ind. 1.

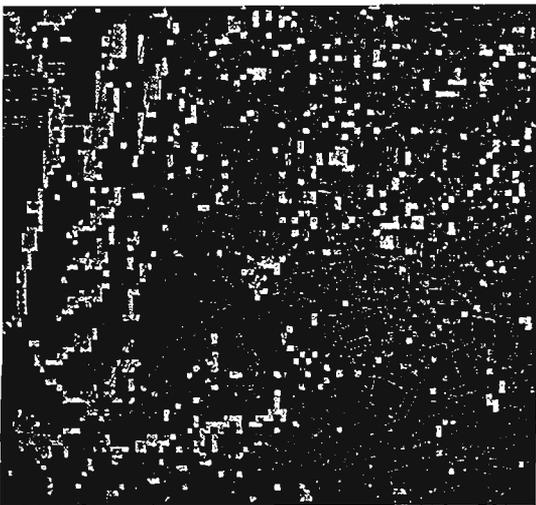


Photo 9 : Densité du bâti par Pixel, contours îlots INSEE (centre ville).

chacun des 6 canaux de Landsat Thematic Mapper. Cette première étape, de « dégrossissage », vise à déterminer les canaux, les combinaisons de canaux (indices) et les opérateurs spatiaux (indices de texture) qui apparaissent les plus discriminants. Aucun résultat statistique issu de cette partie de l'étude ne sera pris en compte pour calculer des coefficients de régression ou pour initialiser une classification. En effet, la démarche choisie consiste à initialiser le processus de classification à partir d'un échantillon (de travail) et à comparer les résultats obtenus soit à l'ensemble de la zone d'étude, soit à un autre échantillon (de vérification).

Après le tirage des 80 îlots échantillons, une nouvelle image multithématique cette fois, a été générée par Tiger, en croisant la **densité du bâti** avec **les îlots échantillons**. Dans l'image résultante l'entité n'est plus l'îlot mais le sous-îlot (portion d'îlot homogène par rapport à la densité du bâti). En effet, compte tenu de la taille de certains îlots ou de la complexité du tissu urbain, il arrive que les îlots INSEE ne soient pas entièrement compris dans des zones morphologiques de même modalité.

Une enquête sur le terrain a eu lieu en juin 1986 afin de tenir compte des éventuelles constructions ou démolitions intervenues entre la date de prise de vue des photographies aériennes et celle de l'enregistrement de l'image TM. De plus il s'est avéré nécessaire de se déplacer sur le terrain afin de pouvoir caler les informations que l'on a recueillies sur la photographie aérienne avec la réalité terrain (nature du toit, hauteur du bâti, etc.). La superficie de l'élément bâti a pu être déterminée, ainsi que le rapport (surface bâti/surface totale de l'îlot) qui est noté **coefficient de densité du bâti** dans ce texte. Ces éléments sont issus de l'analyse fine de photographies aériennes 1/8 000 couleurs naturelles sur lesquelles les îlots de l'échantillon de travail ont été détournés.

Des statistiques descriptives classiques calculées sur les indices qui nous ont paru les plus discriminants ont alors été calculés pour chaque sous-îlot de l'échantillon.

Afin de quantifier le pouvoir de discrimination des différents canaux, néo-canaux (combinaisons de canaux bruts) et opérateurs spatiaux, diverses régressions simples, multiples et polynomiales ont été tentées avec le coefficient de densité du bâti calculé précédemment. Les coefficients de régression entre moyenne radiométrique des sous-îlots et le coefficient de densité de l'espace bâti correspondant ont été calculés sur la base de l'échantillon de travail. Ces coefficients permettent de générer, sur l'ensemble de Marseille, une image de la densité de l'espace bâti à partir de valeurs radiométriques dont les valeurs

varient entre 0 et 100. La valeur du pixel indique donc une densité de l'espace bâti. Diverses algorithmes ou méthodes de classification initialisés sur l'échantillon de travail et testés sur l'ensemble de la zone ou sur un échantillon de vérification ont alors été expérimentés; une comparaison de leur fiabilité est présentée. Les individus classés sont soit des **pixels**, soit des **sous-îlots INSEE**. En télédétection, classer des zones pré-définies et non des pixels est peu courant; nous verrons en quoi cette façon de procéder améliore nos résultats.

DIFFICULTÉS ET PERSPECTIVE D'AVENIR

La conclusion principale à tirer est semble-t-il d'ordre méthodologique. **Il est plus pertinent et plus efficace de classer des zones, ici des îlots INSEE, que des pixels.** Les raisons en sont multiples.

Les différentes statistiques radiométriques ont été calculées sur des îlots INSEE, il est donc logique de classer des entités de même grandeur que celles dont on a extrait l'information. Cela est plus flagrant lorsque l'on s'intéresse aux régressions. Calculer une densité de bâti par pixel est à la limite de l'acceptable. En effet, les régressions ont été obtenues en comparant les valeurs radiométriques de différents néo-canaux avec une densité de bâti par îlot. Il est donc plus logique d'appliquer ces régressions sur les mêmes entités, c'est-à-dire les îlots, que sur des éléments de dimension inférieure (les pixels). De plus, seule une densité calculée sur une surface de taille conséquente est significative de ce paramètre.

De nombreux chercheurs travaillant sur l'interprétation d'images satellite en milieu urbain filtrent par un lissage par la moyenne les images avant classification de façon à se rapprocher le plus possible des valeurs moyennes en fonction desquelles ils ont initialisé leur classification. Cette façon de procéder, qui contribue à dégrader artificiellement la résolution spatiale de l'image s'apparente donc à un artefact qui facilite le classement de pixels de valeurs extrêmes. La résolution spatiale plus fine de TM(*) est en milieu urbain un cadeau empoisonné. En effet alors que les images générées par Landsat MSS étaient constituées d'un assemblage de pixels de valeurs relativement proches dû à un lissage lors de l'enregistrement des données, la résolution spatiale sensiblement meilleure du capteur TM

(*) par rapport à Landsat MSS.



Photo 10 : Densité du bâti par îlot référence (centre ville).



Photo 11 : Densité du bâti par îlot régression 6 classes (centre ville).

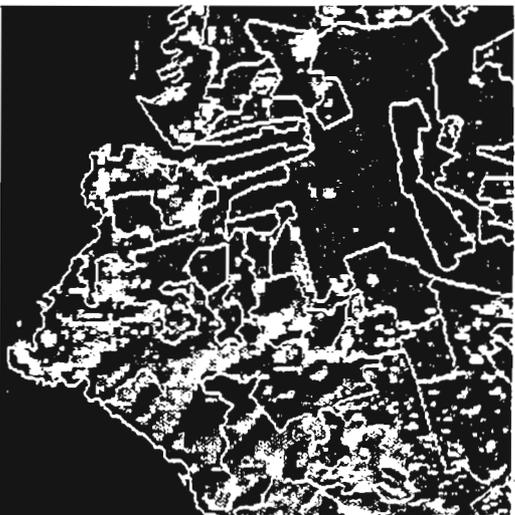
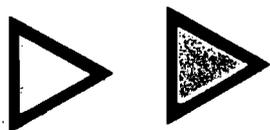


Photo 12 : Composition colorée (canaux 1, 4, 7) avec contours des strates en blanc.



permet l'émergence d'un nouveau type de pixel jusque-là inconnu dans les villes: le **pixel pur** (ou presque pur). Compte tenu de notre problématique et du type de résultat que nous désirons obtenir (une **stratification**, de l'espace urbain en fonction d'un critère bien précis), c'est paradoxalement une résolution spatiale plus grossière qui nous aurait convenu le mieux. La résolution spatiale de TM paraît inadaptée pour l'étude de la densité des villes, trop fine pour classer les pixels, mais pas suffisamment cependant pour se livrer aux joies de la photo-interprétation.

Sauf dans le centre-ville très dense et très homogène où il occupe une surface négligeable, le tissu urbain interstitiel, de part la variété de sa nature induit des valeurs radiométriques qui sont trop éloignées de celles générées par les toits des bâtiments voisins. De plus ceux-ci sont loin d'être semblables et leurs valeurs de réflectance varient sensiblement en fonction des différents matériaux utilisés. C'est ainsi que nous obtenons des classifications qui présentent l'apparence d'un semis de points multicolores là où nous voudrions voir apparaître de grandes plages de mêmes couleurs (dans le but d'obtenir une stratification de l'espace urbain).

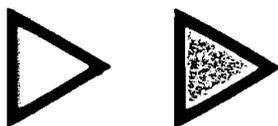
Lisser avant ou après la classification est une opération qui entraîne une distorsion de la réalité, car elle n'est pas sélective au niveau spatial (lissage de pixels de mer avec les pixels côtiers pour prendre un exemple significatif), contrairement à une moyenne raisonnée sur une entité spatiale qui possède une réalité, ne serait-ce qu'administrative (les îlots INSEE par exemple). Il faut ajouter que plus cette entité est homogène du point de vue thématique, plus la production de la moyenne radiométrique sur cette zone se justifie. Dans notre cas les îlots INSEE, de part leur petite taille et leur relative homogénéité de contenu, se prêtent relativement bien à ce genre d'exercice.

Enfin, nous pouvons conclure que le découpage initial des modalités, obtenu par photo-interprétation d'une mosaïque 1/23 000 n'était pas adapté à la réalité statistique de la radiométrie dans le canal TM4. Il semble en être de même avec d'autres néo-canaux (indice de végétation: IVG, Canal TM4-TM5 normalisé: IND1, indice de texture: TEXT-C4) ainsi qu'avec les néo-canaux utilisés pour générer les régressions (ACPI).

Passer d'une classification de pixels à une classification de zones prédéfinies améliore les différentes classifications que nous avons effectuées de près de 100 %. Ce type de classification, pour stratifier le milieu urbain, semble être une des méthodes les plus prometteuses, même si sa fiabilité est encore loin d'être excellente.

Travailler dans l'environnement d'un système de gestion de base de données relationnelles en milieu urbain est presque une nécessité:

- pour **repérer** avec exactitude les parcelles des échantillons; ceci suppose une parfaite superposition entre l'image satellite et le fichier des îlots INSEE.
- pour **valider** les traitements de façon quantifiée et précise
- pour **intégrer** dans la base des informations élaborées à partir de la télédétection
- pour **générer** des images à partir de données numériques (fichiers INSEE de recensement), ceci suppose une parfaite connaissance des référents géographiques de l'information saisie (coordonnées géographiques, mode de projection, taille du pixel).
- pour **croiser** entre elles des données de provenances diverses (îlots de l'échantillon et densité du bâti). **La localisation des données est alors une information fondamentale;** seule clé commune, c'est elle qui permet de comparer et de croiser différentes données entre elles, avec des traitements qui conservent la pertinence spatiale des résultats.



A. MICHEL
Allocataire MRT attaché au département DUR 406.
F. DUREAU
Responsable du programme, département DUR 406,
en poste à Quito.
R. LORTIC
Chercheur associé attaché à l'Atelier de
Télé-détection de l'ORSTOM à Bondy (ATOB).
M. SOURIS
Ingénieur de recherche, responsable de l'Unité
d'Infographie.

MISE AU POINT DES MÉTHODES D'ANALYSE DES IMAGES DES SATELLITES À HAUTE RÉSOLUTION ET ÉVALUATION DES INFORMATIONS FOURNIES PAR CES IMAGES

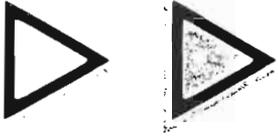
Mise en évidence des réseaux routiers sur une image Spot panchromatique. Etude de faisabilité sur Quito (Équateur).

Nous avons pu constater l'avantage, sur site urbain, du traitement d'image satellite dans des zones prédéfinies pour faire apparaître les phénomènes urbains qui nous intéressent (densité du bâti par exemple) par rapport à un traitement classique par pixel. Cet avantage nous est apparu lorsque nous avons travaillé sur les images de Thematic Mapper du site de Marseille. Ces zones pré-définies résultaient de zonages visuels pour la morphologie du tissu urbain 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 ne numériserons pas les différentes manzanas (pâtés de maison). C'est justement l'entité qui sert de base pour la définition des unités spatiales d'enquête. Il s'agit donc ici de tester la fiabilité d'une

extraction automatique de la voirie devant permettre la création de zones, une zone étant incluse à l'intérieur des contours de la voirie adjacente. Pour parvenir à cet objectif ambitieux, trois grands problèmes doivent être résolus :

- l'extraction de la voirie
- la reconstruction des contours (réseaux de voirie), chaque zone devant impérativement être fermées.
- la labellisation de toutes les zones.

L'objectif de cette étude est donc d'exposer ces différents traitements, à mettre au point les problèmes qui en découlent, les résultats obtenus comparativement à une méthode visuelle et les choix qui devront être effectués à chaque étape. Cette étude est en cours de réalisation, les résultats présentés sont donc issus des premières expérimentations menée sur un matériel « ancien » (MINI 6) lequel limite les traitements (taille maximum des tableaux en mémoire environ 170*170 pixels) ainsi que les expérimentations compte tenu des temps de calculs très élevés.



OBJECTIF

Tester sur une imagette de 256 pixels de côté l'efficacité des outils de morphologie mathématiques simples pour extraire la voirie principale par comparaison avec une extraction visuelle.

DÉMARCHE

La problématique : est-il possible de constituer des zones définies à l'intérieur de contours, ces contours résultant de l'extraction de la voirie.

PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE D'EXTRACTION DE LA VOIRIE À L'AIDE D'ALGORITHMES DE MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE.

Nous avons défini une imagette de 256 pixels de côté extraite d'une scène SPOT panchromatique de Quito. La taille de cette imagette nous a été imposée par des contingences matérielles, taille des tableaux acceptables par l'ordinateur et temps calcul raisonnable permettant de tester différentes chaînes de traitement en 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 en télédétection sont fondées sur les **gradients** (ROBINSON, KIRSCH, PREWITT, SOBEL, ROBERTS, etc.) ou les **Laplaciens**. **La morphologie mathématique**, en teinte de gris sur images en trame carrée, d'un développement plus récent, offre des chaînes de traitements séduisantes, rapides en temps calcul et d'une mise en œuvre 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 une image satellite SPOT en milieu urbain.

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 (Photo 1).

- leur réponse radiométrique (sur image panchromatique) très faible
- leur finesse spatiale
- leur configuration linéaire (suite de pixels connexes)

* Cette chaîne de traitement a été définie avec la collaboration de M. Rakoto-ravalontsalama.

Photo 1 Image en teinte de gris.



Une opération de morphologie mathématique en teinte de gris est particulièrement adaptée pour prendre en compte la combinaison des 2^e 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 composantes de l'image à répondre très faiblement dans la fenêtre du visible (les forêts offrent une réponse très proche). Par contre, la prise en compte simultanée de ces 2 premiers facteurs est discriminante.

Transformation « chapeau haut de forme ».

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

EXTRACTION DES VALLÉES. ÉLÉMENTS THÉORIQUES.

Si l'on considère un transect dans l'image sous la forme d'un histogramme des valeurs de gris, les réseaux apparaissent comme une vallée profonde (ils possèdent une très faible valeur) et de faible amplitude (les réseaux ne sont pas larges d'un point de vue spatial). Il s'agit donc de ne conserver que ces phénomènes 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** ».

Soit un élément structurant noté S , la dilatation de l'image notée $F(x)$ par S se définit par :

$$F(x)+S = \text{SUP} (F(s), S S_x)$$

avec S_x l'élément structurant S appliqué au point x de $F(x)$.

Cela revient donc de façon intuitive à combler les vallées et à épaissir les pics,

- une « **érosion** ».

Avec les mêmes notations, il vient

$$F(x)-S = \text{INF} (F(s), S S_x)$$

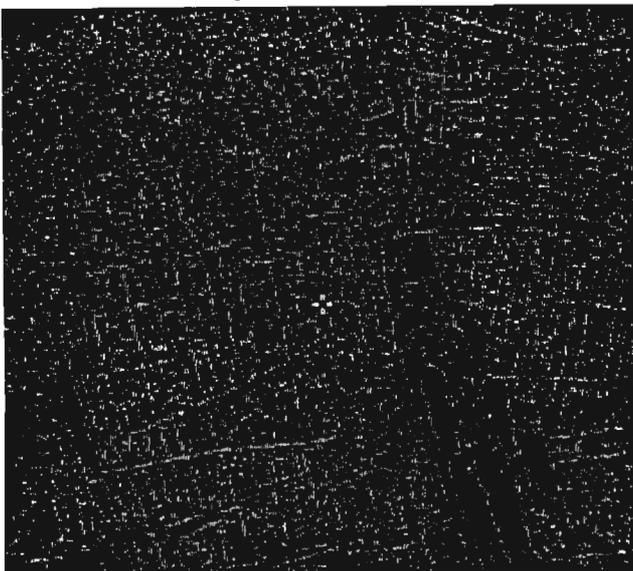
qui revient à l'inverse à réduire les pics et à élargir les vallées.

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 (Photo 2), 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**, ce qui s'écrit de façon formalisée de la manière suivante :

soit l'image fermée notée $F(x)S$

Photo 2 Fermeture - image originale.





soit l'image résultante notée $G(x)$
soit le seuil noté P

$$G(x) = (x ; (F(x)S - F(x)) = P)$$

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 crédibles.

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)

De même, varier la valeur du seuil influe de façon considérable sur le résultat.

En ce qui concerne la détermination de la valeur du seuil, nous avons opéré par seuillage visuel interactif sur Péricolor 1000. 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.

Amincissement par itérations successives.

Ce qui nous intéresse ici, ce n'est pas de conserver une information sur l'importance (largeur) de la chaussée, mais d'extraire un élément de contour à partir d'éléments de la voirie. Or, l'image que nous avons obtenue à l'issue de ces traitements simples apparaît comme peu exploitable car trop bruitée. 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 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ 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. Cela revient à faire un squelette des éléments linéaires par amincissement successif.



Photo 3 Amincissement après 1 passage.

L'élément structurant employé pour effectuer l'érosion binaire dans la direction 0° est le suivant :

0	0	0
X	1	X
1	1	1

Le 0 signifie que la valeur 0 (pas de pixel contour) est indispensable

Le 1 signifie que la valeur 1 (pixel contour) est indispensable.

Le X signifie que la valeur du pixel est indifférente.

Compte tenu de la configuration rencontrée, le pixel central qui est un pixel de voirie (de valeur 1) restera un pixel de voirie (de valeur 1) si son voisinage 3*3 est compatible avec l'élément structurant. Sinon, il prendra la valeur 0.

Les éléments structurant des 7 autres directions s'obtiennent en effectuant une rotation de 45° de l'élément structurant de la direction précédente. Ainsi pour la direction 45°, l'élément structurant présente la configuration suivante :

X	0	0
1	1	1
1	1	X

Dans notre exemple, l'idempotence s'obtient après 2 amincissements complets effectués dans chacune des 8 directions. La Photo 3 a été prise après 1 amincissement complet opéré dans les 8 directions.

AMÉLIORATION DE L'EXTRACTION DE LA VOIRIE.

Deux 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 à priori pas à de la voirie.

Tentative de connexion des pixels isolés.

Il se trouve dans l'imagette de nombreux pixels déconnectés de l'élément linéaire dont ils devraient faire partie. Pour tenter de reconstituer ces éléments de contour, nous avons décidé de comparer à l'intérieur d'un masque 5*5 les différentes configurations rencontrées sur l'image avec un certain nombre de configurations de référence pour lesquelles il est convenu de créer un pixel contour. Ces configurations de référence sont définies de telle manière que le pixel central est nul interrompant de la sorte un élément linéaire d'au moins 4 pixels alignés (en 8 connexités). Les 16 configurations de référence se déduisent des 2 suivantes par rotations successives de 45°.

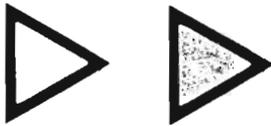


Photo 4 Pixels ajoutés ou supprimés



Photo 5 Image des distances.

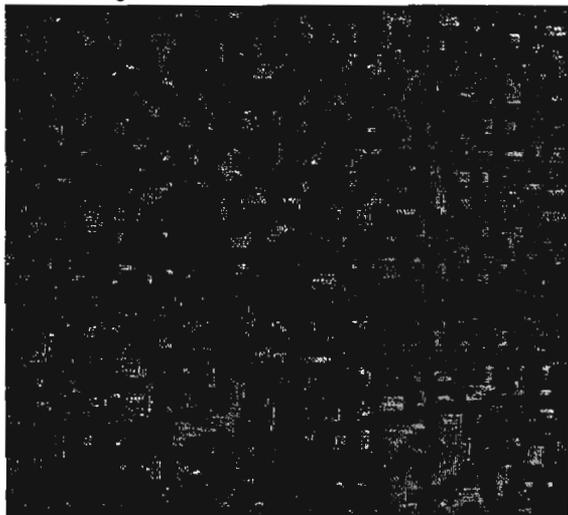
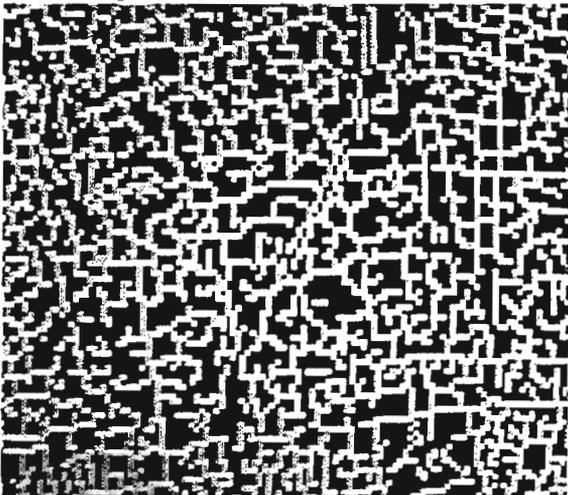


Photo 6 Image avec pixels selle.



1	X	X	X	X	X	1	X	X	X
X	1	0	X	X	X	1	0	X	X
X	0	0	0	0	X	0	0	0	X
X	X	0	1	0	X	X	0	1	X
X	X	X	X	1	X	X	X	1	X

Suppression des pixels isolés.

A l'inverse, et pour nettoyer l'imagette des nombreux amas de 1, 2 ou 3 pixels déconnectés d'un élément de réseau nous avons balayé l'imagette à l'aide d'une fenêtre 5*5.

Lorsque l'on rencontre une des 15 configurations correspondant à un amas de pixels déconnectés d'un réseau, le pixel central prend la valeur 0. Deux passages ont été exécutés avant de nettoyer effectivement cette image.

La Photo 4 illustre les deux traitements successifs. Les pixels apparaissant en rouge étant ceux qui ont été reconnectés, les pixels jaunes ceux qui ont été supprimés.

Essai de fermeture des contours.

Il est souhaitable de prolonger la méthode que nous avons initialisée 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 A1 qui a été testée sur une photographie aérienne numérisée paraît adaptée à notre cas bien qu'un grand nombre de points selle risquent d'apparaître.

PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE (MILGRAM ET A1, 1986).

Cette méthode se fonde sur l'idée principale qu'un point selle, i.e. un éventuel point contour non encore détecté, présente la particularité d'être un point où la fonction « distance au point contour la 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. Nous l'avons générée sur une imagette 128*128, en raison d'impératifs liés au matériel (taille limi-

tée des tableaux en mémoire), située au centre de notre image d'essai (Voir Photo 5).

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.

La Photo 6 montre l'imagette 128*128 après un passage de l'algorithme. Les pixels-selle sont représentés en rouge.

DIFFICULTÉS ET PERSPECTIVE

L'image résultant de tous ces traitements simples n'est pas vraiment satisfaisante compte tenu de ce nous désirons produire. D'une part, **tous les éléments de voirie ne sont pas extraits**, d'une part **des pixels qui ne sont pas des éléments de voirie ont été pris en compte**.

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. Par ailleurs, 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 est bien sûr inapproprié 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 base 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 de grande hauteur. D'une part, la réflectance très faible 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 petit amas de faible effectif. Il est donc délicat de les séparer des pixels de voirie. Toutefois, l'ombre n'est pas

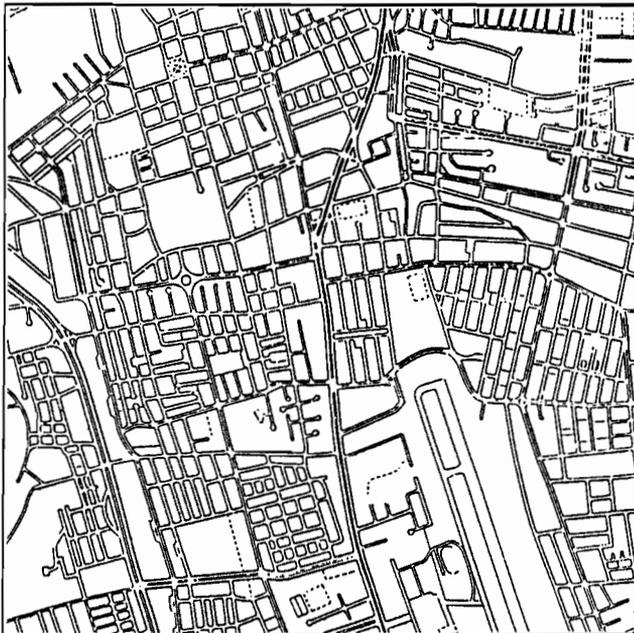
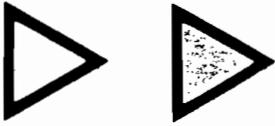


Figure 1 - Extraction des réseaux sur image SPOT, extrait de carte.

la seule possibilité 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 initialement à l'échelle 1/25 000 (Figure 1) indique clairement que le problème à résoudre est prioritairement 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**. La prise en compte du canal infra-rouge proche (XS3) permettra peut-être de lever cette confusion.

La carte ne se superpose pas exactement sur l'image, cette dernière n'ayant pas été encore recalée. En conséquence, il est difficile d'évaluer numériquement la fiabilité de ce traitement en mettant en œuvre un traitement de type matrice de confusion.

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 **si la méthode visuelle permet de n'extraire que les éléments de voirie et de constituer ainsi des éléments linéaires continus, elle 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.

L'UTILISATION DE LA TELEDETECTION POUR L'OBSERVATION DES POPULATIONS URBAINES. Une recherche en cours à Quito (EQUATEUR).

Alain MICHEL, Jean-Michel EBERHARD, Bernard LORTIC, Françoise DUREAU ()*

ORSTOM, Atelier de Télédétection, 70-74 route d'Aulnay, 93140 Bondy, FRANCE

(*) ORSTOM, Apartado Postal 6596 CCI, Quito, ECUADOR

Dans le cadre du projet PEPS n° 148, trois types d'exploitation des images SPOT niveau 1B de Quito ont été réalisés : stratifications simples à partir de néo-canaux, mise en évidence des réseaux de voirie, analyse numérique des textures et structures des quartiers. Ces différents travaux sur les images SPOT de Quito ont été réalisés dans le cadre du programme du Département D de l'ORSTOM "Utilisation de la télédétection pour l'observation des populations urbaines des pays en développement".

Parmi les différentes scènes acquises dans le cadre de la convention CNES ou achetées par l'ORSTOM, nous avons retenu les dates de Juin et Novembre 1986, seules dates pour lesquelles nous disposons d'une couverture complète de l'agglomération quiténienne (deux images sont nécessaires pour obtenir la totalité de la ville). Une collecte d'informations morphologiques a été réalisée sur 199 îlots en octobre/novembre 1986, en adaptant la technique de collecte mise au point par l'équipe en 1986 sur la ville de Marseille.

L'utilisation opérationnelle d'images SPOT pour l'observation suivie d'une ville telle que Quito s'inscrit dans un faisceau de contraintes qu'il est important de rappeler : contraintes climatiques et thématiques pour l'acquisition d'une image, et pré-traitements radiométriques et géométriques pour rendre l'image exploitable.

Ainsi, dans un premier temps, des tests ont été effectués afin de vérifier la qualité radiométrique et géométrique des différentes images (multi-dates) panchromatiques et multispectrales utilisées. Une rectification géométrique utilisant une centaine d'amers et basée sur un polynôme de degré 5 a été développée. Ce nombre important est indispensable compte tenu des gradients de dénivellation très importants constatés sur l'image. D'autre part, un des objectifs de notre programme est d'élaborer, par le biais d'un système de gestion de base de données relationnelles, des cartes issues de la télédétection, d'où le soin apporté aux rectifications géométriques.

Le calcul de néo-canaux (indice de végétation, indice de brillance, écart-type local) a permis d'établir des classifications simples de la ville, pertinentes pour notre

application : stratification de l'espace urbain en vue d'une enquête démographique par sondage.

Une chaîne de traitements axée sur la morphologie mathématique a permis de mettre en évidence une partie du réseau urbain à partir d'une image panchromatique. Ont été testés divers essais de reconstruction de ces réseaux, et de suppression d'éléments linéaires qui ne correspondent pas à de la voirie. Les résultats ont été évalués par rapport à une extraction visuelle et à un plan de Quito au 1/15.000.

Une étude approfondie de la texture et de la structure d'un échantillon de quartiers typiques d'un point de vue morphologique a été menée à l'aide de deux méthodes complémentaires : la Transformée de Fourier pour l'étude de la structure (fréquence et direction) des réseaux, et les matrices de cooccurrence pour l'analyse de la texture. Après classement des spectres en fonction de leurs rayons, et traitement des paramètres de cooccurrence selon des méthodes d'analyse des données, nous aboutissons à une typologie des quartiers basée sur leurs caractéristiques texturales et structurales.

EL USO DE LA TELEDETECCION PARA LA OBSERVACION DE LAS POBLACIONES URBANAS. Investigación en curso en Quito (ECUADOR).

Alain MICHEL, Jean-Michel EBERHARD, Bernard LORTIC, Françoise DUREAU ()*

ORSTOM, Atelier de Télédétection, 70-74 route d'Aulnay, 93140 Bondy, FRANCE

(*) ORSTOM, Apartado Postal 6596 CCI, Quito, ECUADOR

INTRODUCCION : CONTEXTO CIENTIFICO DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN QUITO

Los objetivos del programa

El objetivo general fijado para el programa de investigación es la puesta a punto de *un sistema de observación permanente de las poblaciones urbanas utilizando la información suministrada por los satélites de alta resolución (SPOT y Thematic Mapper).*

Los satélites informan de manera continua sobre la ocupación del suelo en el medio urbano : se trata pues, dentro del método que desarrollamos, de utilizar esta información exhaustiva sobre la morfología urbana con el fin de recoger rápidamente, mediante sondeo, datos relacionados con las poblaciones urbanas. Los trabajos realizados (particularmente por VERNIERE) sobre fotografías aéreas han demostrado la eficacia de este principio (1).

Un mejor conocimiento del espacio urbano, gracias a las informaciones que suministran las imágenes de satélite, constituye un factor importante en el mejoramiento del sistema de encuesta demográfica por sondeo :

- para establecer una base de sondeo completa y al día ;
- para hacer óptimo el sondeo, gracias a que se tiene en cuenta la información sobre morfología urbana ;
- para obtener resultados localizados, según una división significativa de la ciudad.

Las líneas de investigación

Para llegar al objetivo fijado en el programa, estamos (2) realizando estudios detenidos en dos direcciones principales :

- interpretación de imágenes de satélite de alta resolución en el ambiente urbano, e integración teledetección/sistema de información geográfica ;
- las relaciones habitat/población y los sondeos espaciales en demografía urbana.

(1) Ver la bibliografía al respecto al final de este trabajo.

(2) El equipo de ORSTOM, pluridisciplinario, está compuesto por : O. BARBARY (estadístico), F. DUREAU (geógrafa-demógrafa, responsable del programa,), B. LORTIC (télédétection), A. MICHEL (urbanista, teledetección), M. SOURIS (informática).

Estas líneas de investigación han sido realizadas desde 1985 en la ciudad de Marsella (Francia), que desde esa fecha disponía ya de los datos necesarios para la primera fase de desarrollo metodológico, es decir las referencias confiables para probar la validez de los métodos desarrollados a medida que avanzaban los trabajos : imagen Thematic Mapper, fotografías aéreas en gran escala, censos demográficos disponibles a nivel de las manzanas.

Desde septiembre de 1986 trabajamos en Ecuador, donde el programa constituye una parte especial del Atlas informatizado de Quito, dedicado a los métodos de actualización de los datos morfológicos y demográficos. Estamos realizando en Quito la primera aplicación a escala natural del sistema de observación demográfico integrando la teledetección ; la investigación demográfica que actualmente llevamos a cabo se refiere a *una muestra espacial que proviene de las imágenes SPOT.*

Los resultados obtenidos durante la primera fase de desarrollo metodológico en la ciudad de Marsella (FRANCIA)

En materia de teledetección urbana, además de la evaluación de la precisión de la exactitud geográfica, los trabajos trataron en primer término el tema de *la extracción de información sobre la densidad de construcción* a partir de la imagen TM ; sólo en la segunda etapa, la investigación se orientó hacia el establecimiento de una tipología de la ocupación del suelo, basada sobre el estudio de las cantidades radiométricas de las manzanas. Se pusieron a punto los tratamientos sobre una muestra y luego fueron aplicados al conjunto de la imagen o a otra muestra. Se procedió a la *evaluación sistemática* de todas las clasificaciones utilizadas, construyendo "matrices de fusión" entre los resultados de las clasificaciones y la referencia proveniente de la foto-interpretación controlada por chequeos en el terreno.

Para los sondeos espaciales en demografía urbana, se realizaron tres series de pruebas :

- comparación de 4 técnicas de sondeo en el conjunto de las características demográficas seleccionadas, y medida de la ganancia de precisión aportada por una estratificación en 9 tipos de morfología urbana ;

- medida de la mejora aportada por una estratificación sobre la densidad de construcción proveniente de la imagen de satélite ;

- evaluación de la eficacia de la selección espacial sistemática que asegure una buena distribución geográfica de la muestra.

Los resultados evidencian claramente la ventaja de la selección sistemática sobre un mapa (imagen satélite clasificada) y de la estratificación sobre la densidad de construcción en tres clases provenientes de la imagen TM : un procedimiento como

este permite dividir la varianza del estimador por un factor de 1.6 a 4.6 dependiendo de la característica demográfica en consideración.

En el estado en el cual nos encontramos actualmente, disponemos ya de *elementos para poner en práctica un sondeo estratificado sobre una imagen de satélite Thematic Mapper*: los desarrollos que se han realizado en teledetección permiten clasificar la imagen en forma satisfactoria sobre la densidad de las construcciones (parámetro esencial de estratificación para una encuesta demográfica), y las investigaciones en sondeos espaciales han medido exactamente la ganancia de precisión que da, de una parte la técnica de selección sistemática en cuadrícula, y de otra, una estratificación sobre la densidad de construcción, o sobre una tipología de la morfología urbana. *El conjunto de los resultados confirma lo adecuado del método de sondeo espacial estratificado sobre imagen de satélite para una encuesta demográfica.*

Además de estos resultados relativos al desarrollo de un nuevo método de recolección demográfica integrando la teledetección, varios resultados metodológicos van más allá de la simple problemática demográfica y son aplicables en muchos otros campos.

Parte I - CONDICIONES DE APROVECHAMIENTO DE LAS IMAGENES

SPOT DE QUITO

Basar un plan de sondeo sobre una imagen de satélite supone, desde luego, extraer de la imagen la información necesaria: a este aspecto de nuestro trabajo se dedicará la segunda parte de esta ponencia. Pero, antes de esto, la utilización operacional de imágenes SPOT para la observación morfológica y demográfica de una ciudad supone el disponer de una imagen aprovechable, y de la información de terreno indispensable para su interpretación. Vamos pues a dedicar esta primera parte a los factores que determinan las condiciones de aprovechamiento de imágenes SPOT en un sistema rutinario de recolección de informaciones en un medio urbano.

1.1. RECOLECCION DE DATOS SOBRE LA MORFOLOGIA URBANA (oct.-dic.1986)

Nuestro método de recolección de datos del terreno, probado ya en Marsella y luego en Quito, permite obtener rápidamente los datos necesarios para la inicialización y/o verificación de la validez de los procesamientos de imágenes de alta resolución. Mas adelante presentamos las principales características del método, a partir de nuestra experiencia quiteña.

a) Objetivos

El objetivo principal de esta primera encuesta realizada en Quito es *la recolección de información precisa sobre la ocupación del suelo en un cierto número de manzanas de Quito, con el fin de inicializar la interpretación de las imágenes de satélite* que deben servir como base del sondeo para la encuesta demográfica final.

La imagen SPOT más reciente que se halla a nuestra disposición fue registrada el 26 de noviembre de 1986 y la imagen Thematic Mapper que hemos adquirido es del 15 de septiembre de 1986 : esta concomitancia (1) de la encuesta de campo y de los registros por satélite nos coloca en una buena posición para el aprovechamiento de los documentos de los satélites.

Un segundo tipo de aprovechamiento hace necesaria esta encuesta morfológica : los datos morfológicos constituyen una de las dos informaciones necesarias *para poder precisar la estrategia de sondeo a poner en práctica para la encuesta demográfica final* en Quito. En efecto, estos datos morfológicos, aprovechados conjuntamente con los datos demográficos recogidos durante una segunda encuesta (la encuesta "Habitat/población", realizada en abril de 1987), permiten dar repuestas a los siguientes interrogantes : cuáles son los elementos descriptivos de la morfología urbana más pertinentes para la observación demográfica en Quito? Cuáles son la unidad espacial de recolección y la estrategia de sondeo más eficaces para una encuesta demográfica en Quito?

b) Selección de la muestra

Para la selección de la muestra de la encuesta morfológica así como para toda la experimentación llevada a cabo en Quito, sólo utilizamos los documentos básicos que tienen más posibilidad de existir en toda ciudad de un país en desarrollo. Por lo tanto fue sobre un plano de Quito no actualizado que se hizo la selección de la muestra : los planos 1/10.000 realizados en 1982 para el censo general de la población.

La técnica de muestreo fue una de las más sencillas : optamos por una *selección sistemática sin re-colocación en cuadrícula sobrepuesta sobre los planos*. Habiendo fijado la tasa de sondeo en un 5% (resultado proveniente de los trabajos de O.

(1) Debe señalarse que esta concomitancia entre el registro SPOT y los datos de terreno es producto más de una coincidencia que de una programación muy profundizada : solamente dos meses después de terminar la encuesta fuimos avisados por SPOT IMAGE que dichas imágenes existían. Estas experiencias muestran las dificultades de poner en práctica un plan de recolección de datos que incluya el registro de una imagen SPOT ; por otro lado, debe considerarse que estamos en el extranjero, en una zona que las condiciones meteorológicas dificultan la observación, pese a ella, tales serán las concisiones de aplicación del método que buscamos desarrollar.

BARBARY sobre Marsella en cuanto a sondeos espaciales), conociendo aproximadamente el número total de manzanas de Quito y la superficie que ocupe la ciudad, dedujimos de allí el tamaño promedio de una manzana en Quito, así como la equidistancia de las líneas de la cuadrícula (750 m por lado).

En esta forma constituimos una muestra de 195 manzanas, por selección sistemática sobre el mapa. Los mapas utilizados datan de 1982 y no incluyen las extensiones experimentadas por la ciudad entre 1982 y 1986 ; por lo tanto tuvimos que completar nuestra muestra de selección sistemática, añadiendo algunas manzanas de la periferia, cuya morfología no estaba representada en la muestra inicial. Este agregado de 4 manzanas se hizo al final de la investigación, una vez que el equipo conocía bien las características morfológicas de la muestra investigada y las de las recientes extensiones de Quito. En total, nuestra muestra abarca, pues, 199 manzanas.

c) Los documentos de la investigación

Cada manzana de la muestra está descrito por tres tipos de documentos :

- **Mapa** : sobre un fondo de mapa ampliado a 1/500 en el cual no figuran, para empezar, sino los límites de cada manzana a investigar, los encuestadores establecen la cartografía de la ocupación del suelo de la manzana. Todas las construcciones, así como todos los elementos no construidos deben figurar sobre tales planos.

- **Ficha de descripción de los edificios** (ver ejemplo de ficha adjunta) : cada uno de los edificios dibujados sobre el mapa está descrito sobre tal ficha y está identificado por un número del 1 hasta n.

- **Fotografías** : para cada manzana, los investigadores de ORSTOM, toman fotografías desde un punto que domina la manzana (piso alto de un edificio o relieve del suelo) y en el suelo, en los bordes de la manzana y/o en su interior. Estas fotografías están destinadas a precisar y controlar las informaciones recogidas por los encuestadores.

El conocimiento de lo edificado y no edificado, adquirido con oportunidad de las diversas salidas a terreno dentro de Quito, y los consejos de las colegas, nos permitieron modificar y adaptar a las condiciones requeridas la ficha de encuesta ideada y experimentada en Marsella. Hicimos la prueba de carácter operacional de tales fichas con los encuestadores empleados para la encuesta, en una primera salida en común sobre el terreno. El método de recolección fue descrito con precisión en el *manual de instrucciones a los encuestadoras* con el fin de permitirles referirse a él en caso de ambigüedad.

Ficha descriptiva de la encuesta Morfología Urbana (oct.-dic. 1986)

Número de manzana :		DESCRIPCION DE LOS EDIFICIOS				
Fecha:	Hora:					
Número del edificio que corresponde a la señal localizada en el plano						
D	<u>Edificio:</u> Acabado	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	En construcción	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
M	<u>Número de pisos (incluido P.B.)</u>	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Dimensiones en el suelo:</u> Lado a	-----	-----	-----	-----	-----
E	Lado b	-----	-----	-----	-----	-----
	(Indicar este(os) lado(s) en el plano)					
N	<u>Número de pendientes del techo (0 si plano)</u>	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Material predominante en el techo</u>					
T	Losa de hormigón	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Eternit o similares	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Zinc o similares	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Teja con barniz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Teja sin barniz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Paja o similares	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Otros (chova, embaldosado, techoline...)	-----	-----	-----	-----	-----
C	<u>Color predominante en el techo</u> (Blanco, Café oscuro, Café claro, Gris, color ladrillo, Negro, Rojo, o Verde)	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Forma del material del techo</u> (Hacer un croquis de la sección)					
O	<u>Otros elementos sobre el techo</u>					
	Número de chimeneas	-----	-----	-----	-----	-----
	Presencia de pilares de hormigón	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Presencia de penthouse (a describir)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Número de tanques de reserva	-----	-----	-----	-----	-----
R	<u>Presencia de vegetación :</u>					
	Sobre balcones sobresalientes	-----	-----	-----	-----	-----
	Sobre el techo	-----	-----	-----	-----	-----
<i>Otras observaciones sobre el edificio</i>		-----	-----	-----	-----	-----

d) Desarrollo de la recolección en el terreno

La recolección de datos (llenado de cuestionarios y diseño de esquemas sobre los planos 1/500) fué realizada por dos encuestadores entre el 1° de octubre y el 9 de diciembre de 1986 ; el promedio de una manzana por medio día, que se había estimado al comenzar nuestra investigación, se vió confirmada.

En cuanto a las fotografías tomadas desde edificios o puntos elevados de la ciudad, fueron necesarias alrededor de 20 manzanas de trabajo por parte de dos personas ; 10-12 manzanas por medio día parece el máximo que puede realizarse, teniendo en cuenta el tiempo de movilización y de discusiones con el fin de obtener permiso para llegar a la cima de los edificios.

Los encuestadores no tuvieron dificultades para recoger la información ; este tipo de encuesta solo necesita poca participación de parte de la población, puesto que no requiere sino la autorización para tener acceso a las terrazas de edificios. En cuanto a todas las manzanas, tal autorización pudo obtenerse sin problemas mayores, cualquiera que sea el tipo de barrio de Quito.

e) Codificación y digitación de datos

La codificación se estableció en fichas del tipo de la que se presenta más adelante, a partir de todos los datos recogidos durante la encuesta : cuestionarios, planos 1/500, fotografías. Estas fotografías constituyeron factor fundamental para precisar la información recogida por los encuestadores : son documentos que hay que esforzarse por obtenerlos cuando se quiere realizar una recolección de datos de terreno en el ambiente urbano.

El principio general de la ficha de codificación, inspirada en la que se diseñó para nuestros trabajos de Marsella, es el siguiente : constituir dos archivos, uno que describe los edificios y otro que describe las manzanas. El archivo de edificios no los describe uno por uno sino por grupo de edificios de una manzana que presenten características similares o muy parecidas ; son éstos los grupos que llamamos "genres". Este procedimiento responde a varias necesidades : poder clasificar por un lado los edificios y por otro las manzanas, y disponer de un archivo descriptivo de los edificios utilizable mediante el IBM AT del equipo que trabaja en Quito.

Los datos de las fichas de codificación fueron digitados utilizando DBASEIII en el IBM AT, durante unas diez horas, por parte de dos personas. El análisis de los cuadros de frecuencia e histogramas nos permitieron corregir algunos errores de codificación o digitación de datos.

CODIFICATION QUITO - FICHE MANZANA

N° Manzana N° INEC N° enquêteur (Ligla=1, Xavier=2)

Surface îlot Surface 1/2 voirie Surface totale
(En m² - Mesure sur [G/D] 1/15000)

TYPE Carte Caza/Godard Enquêteur Photo

BATI Surface (m²) (D'après quest/plan)
Densité du bâti (D'après plan/quest./photo) Implantation du bâti dans l'îlot

Nombre de bâtiments : Total Terminés En construction

Répartition des bâtiments terminés par genre :

Genre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Nbre																	

Pente du toit (direction majoritaire des ailes) (Sans pente 0, N/S, E/W, NE/SW, NW/SE)

Nbre de bâtiments terminés avec penthouse

Nbre de bâtiments terminés avec poteaux fer/béton

Nbre de bâtiments terminés avec cheminées

Présence de végétation sur balcons saillants (Aucun=1, Peu nomb.=2, Très nomb.=3)

NON BATI

Pente du sol : Dom. : Direction (Ss pente=0, D=1, NE=2, E=3, Niveau (Aucun=1, Faible=2, Bs-dom. : Direction SE=4, S=5, SW=6, W=7, NW=8) Niveau (Forte=3, Très forte=4)

Eau : Type Surface (m²)

Végétation dans l'îlot : Hors bâti : Type dom. Type ss-dom. Surface (m²)
Couvrant le bâti : Type dom. Type ss-dom. Surface (m²)

Voirie dans l'îlot : Matériau dom. Matériau ss-dom. Surface (m²)

Présence de murs de clôture : dans l'îlot (Aucun=1, Peu nomb.=2, Très nomb.=3)
sur le périmètre de l'îlot (En % du périmètre de l'îlot)

1/2 VOIRIE BORDANT L'ÎLOT Trottoir : Mat. dom. Mat. ss-dom. Chaussée : Mat. Dom. Mat. Ss-dom.
Pelouse Arbres Arbustes (en % longueur de bordure)
Voitures : En stationnement En circulation

CODIFICATION QUITO - FICHE MANZANA

N° Manzana N° INEC : N° enquêteur (Ligla=1, Xavier=2)

N° du genre de bâtiment dans la manzana	Descripteurs des bâtiments terminés					
	Matériau du toit	Forme mat du toit	Couleur mat. du toit	Nbre pans du toit	Nbre étages (Rdc inclus)	Surface au sol (m ²)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						

Matériau du toit

- 1 Dalle de béton
- 2 Eternit ou similaires
- 3 Zinc ou similaires
- 4 Tuiles vernies
- 5 Tuiles non vernies
- 6 Paille ou similaires
- 7 Carrelage
- 8 Autres
- 9 Non observé

Forme du matériau du toit

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6 Autre
- 9 Non observé

Couleur du toit

- 1 Blanc
- 2 Orange
- 3 Marron clair
- 4 Marron foncé
- 5 Brique
- 6 Rouge
- 7 Vert clair
- 8 Vert foncé
- 9 Bleu clair
- 10 Bleu foncé
- 11 Gris
- 12 Noir
- 13 Autre
- 99 Non observé

1. 2. RESTRICCIONES CLIMATICAS Y TEMATICAS PARA LA OBTENCION DE UNA IMAGEN

Además de las restricciones impuestas por el calendario de una operación de recolección de datos, desde el punto de vista temático, no todos los periodos del año presentan el mismo interés: así, la información sobre el espacio intersticial vegetal, fundamental para determinar los tipos diferentes de barrios, varía según las estaciones. En el momento del paso del satélite, la nubosidad ambiental es un factor esencial que determina la porción de imagen utilizable.

Dentro de este doble haz de restricciones, temáticas y meteorológicas, se inscribe la utilización operacional de las imágenes SPOT para la observación de una ciudad como Quito. Concretamente, el problema se plantea en los siguientes términos: *Cuál es la probabilidad de obtener una imagen que contenga una cantidad de nubes inferior a un máximo dado, durante un mes fijado como temáticamente interesante (e indispensable)?*

a) Los planteamientos de nubosidad

El aeropuerto Marsical Sucre de Quito, donde se recogen los datos meteorológicos, está situado en la parte norte de la ciudad y constituye la única estación meteorológica en la cual se efectúan lecturas horarias de nubosidad. Esta se estima visualmente cada hora y se expresa en "octa", es decir 1/8 de cielo cubierto que el meteorólogo observa en su campo visual: procede luego a repartir estas octas en función del tipo y por lo tanto de la altura de las nubes. Hemos tomado nota de *la indicación total de nubosidad*, considerando todo tipo de nubes, a las 9 H., 10 H. y 11 H., encontrándose estas tres horas dentro del tiempo de paso de los satélites Thematic Mapper y SPOT por encima de Quito (9H30 y 10H30 respectivamente).

Recogimos los diferentes datos que abarcan un periodo de diez años, de septiembre de 1977 a agosto de 1987, con el fin de tener en cuenta los fenómenos periódicos muy importantes en meteorología. El procesamiento realizado consiste en *elaborar frecuencias de nubosidad*. Los datos se recogieron cada tres días, frecuencia que concilia a la vez un número razonable de informaciones y una buena continuidad de los fenómenos meteorológicos que nos interesan.

b) Procesamiento de los datos meteorológicos

Frecuencia relativa de la nubosidad por mes

Las horas de paso de los satélites por encima de Quito no corresponden exactamente con las horas de las lecturas de nubosidad. Efectuamos por lo tanto una interpolación entre los datos recogidos a las 9H y a las 10 H para evaluar la nubosidad a las 9H30: según el mismo principio, estimamos la nubosidad a las 10H30.

La comparación dentro de un mismo mes entre las diferentes horas de paso de los satélites nos suministra una información interesante : *las frecuencias de nubosidad baja (de 0/8 a 2/8) tiene mayor incidencia a las 9H30 que una hora más tarde, y esto sin importa el mes que se examine, salvo el de marzo cuya nubosidad es de todas maneras demasiado alta para tomarlo en consideración. Las informaciones de los cuadros 1 y 2 refuerzan esta opinión. La idea comúnmente expresada de que el SPOT pasa demasiado tarde se encuentra, pues, confirmada.*

Quito está situada inmediatamente al este de los flancos del volcán Pichincha que culmina a una altura de 4794 metros. Al este de la ciudad se levantan colinas de menor importancia. Todas estas cimas se encuentran dentro del campo visual del observador; por lo tanto, cuando la nubosidad es igual o inferior a 2/8 puede considerarse que la mayor parte de las nubes se concentran alrededor de dichas alturas, dejando la casi totalidad de la ciudad bajo un cielo azul.

Dada una nubosidad inferior o igual a 2/8, los meses durante los cuales se verifica esta condición en forma más acentuada son los siguientes (Cuadros 1 y 2) :

- a las 9H30 : Julio (43%), Agosto y Septiembre (36%), y Noviembre (35%)
- a las 10H30 : Julio (36%), Agosto (35%), Noviembre (30%), y Junio(29%)

Esto tiene la siguiente expresión práctica : *el 43% de los días de Julio no presentan prácticamente nubes encima de Quito a las 9H30. Debe hacerse notar que son los mismos meses que aparecen como menos nublados a las 9H30 y a las 10H30, excepto los meses de Junio y Septiembre. A la inversa, los meses más desfavorables desde el punto de vista nubosidad son :*

- a las 9H30 : Marzo (6%) ;
- a las 10H30 : Abril (5%), y Marzo (7%).

Probabilidad de obtención de una imagen

Hemos calculado las diferentes probabilidades que corresponden a una nubosidad máxima dada y, en lo que se refiere al SPOT a un ángulo de enfoque lateral máximo. Consideramos que, para un determinado mes, la probabilidad de obtener una imagen puede ser estimada por la frecuencia de los días en los cuales se verifica una condición de nubosidad (inferior o igual a X/8, variando X entre 0 y 8). Asimismo consideramos que los diferentes pasos del satélite constituyen acontecimientos independientes. Por lo tanto, la probabilidad de obtener una imagen en un determinado mes, con una nubosidad máxima dada y para un ángulo de enfoque máximo fijado, es de : $1 - (\Pi/100)P$

(Π : suma del número de días que no verifican la condición de nubosidad ; $\Pi/100$ representa entonces la frecuencia del fenómeno.

P : número promedio de pasadas mensuales del satélite para un ángulo máximo

fijado (es decir, número de pasos anual/12). El valor que toma P para TM es : 2.00, para SPOT : ángulo 0° 1.25, ángulo <10° 3.58, ángulo >10° 8.17).

Esta modalidad de cálculo se aproxima pues, a la de una selección sorteo con reposición : la probabilidad de obtener un cielo despejado es considerada como constante entre el primero y el último paso del satélite, en un mes considerado.

Las *cuadras 3 y 4* representan esta probabilidad en porcentaje. Para una tolerancia máxima de 2/8 de cielo cubierto, la probabilidad máxima de obtener una imagen es :

- para TM : *67 % en Julio*;
- para SPOT : *42 % en Julio* con enfoque vertical, *79 % en Julio* con un ángulo <10°, *97 % en Julio y Agosto* con un ángulo cualquiera.

Las probabilidades de obtener una imagen SPOT o TM sin nubosidad alguna son del mismo orden si se acepta un ángulo de enfoque máximo igual a 10°. Puede mantenerse esta afirmación cualquiera que sea la nubosidad máxima tolerada. En cuanto a las imágenes verticales, SPOT tiene a la vez la desventaja de su periodicidad menor (cada 26 días contra cada 16 días del TM) y, en menor grado, su hora de paso más tardía.

Como ventaja en cambio, debe anotarse que las posibilidades de enfoque oblicuo, entre otras, hacen del SPOT un satélite que permite una observación más frecuente de la tierra. Esta ventaja innegable no es, sin embargo, determinante en el ambiente urbano.

c) Conclusión

Numerosos tratamientos de imagen son indispensables para llegar a discriminar los diferentes tipos morfológicos del espacio que constituyen una ciudad como Quito. Estos tratamientos requieren imágenes, pancromáticas o multi-espectrales, registradas en *fechas determinadas pr el tipo de tratamiento deseado*:

- un *indicador de vegetación* que evidencie la intensidad de la actividad clorofílica es un elemento precioso para separar los barrios populares situados en las márgenes urbanas de los barrios residenciales. La misma densidad de verde caracteriza estos dos tipos de barrio, la única diferencia la constituye el estado de los espacios verdes durante la estación seca : regados constantemente durante la estación seca en los barrios acomodados, en los demás se dejan como están. La discriminación de estos dos tipos de espacios exige *al menos dos imágenes multi-espectrales*, una durante la fase húmeda durante la cual pueden especificarse todos los espacios no-minerales (*Noviembre* parece ser el mes más apropiado), otra en estación más seca (*Agosto o Julio* son satisfactorios) para proceder a una distinción dentro del espacio vegetal (estado de la vegetación baja y arbórea) ;

Tableau 1 - Fréquence mensuelle cumulée de la nébulosité à 9h30 -

NEBULOSITE(octa)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
JANVIER	9	17	29	35	48	53	57	71	100
FEVRIER	6	11	18	22	28	37	62	79	100
MARS	2	2	6	10	17	22	30	57	100
AVRIL	4	8	15	21	34	47	63	68	100
MAI	9	16	26	32	39	52	62	71	100
JUIN	8	11	25	37	45	61	74	90	100
JUILLET	18	31	43	51	63	76	83	88	100
AOUT	17	29	36	51	61	68	78	92	100
SEPTEMBRE	15	24	36	48	65	72	76	88	100
OCTOBRE	4	13	26	37	44	57	63	75	100
NOVEMBRE	16	27	35	41	50	57	65	80	100
DECEMBRE	2	16	25	35	42	50	64	82	100

Tableau 2 - Fréquence mensuelle cumulée de la nébulosité à 10h30 -

NEBULOSITE (octa)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
JANVIER	5	12	17	23	28	38	54	68	100
FEVRIER	3	10	13	15	21	33	51	72	100
MARS	1	2	7	14	24	33	42	55	100
AVRIL	0	3	5	15	21	33	48	62	100
MAI	2	13	18	21	30	37	44	66	100
JUIN	14	24	29	40	52	64	72	85	100
JUILLET	11	24	36	44	56	67	77	90	100
AOUT	12	25	35	50	60	68	79	91	100
SEPTEMBRE	11	19	26	38	49	58	70	82	100
OCTOBRE	3	9	18	29	40	48	61	72	100
NOVEMBRE	7	19	30	35	43	54	62	79	100
DECEMBRE	2	10	18	23	41	52	62	79	100

Tableau 3- Probabilité (en pourcentage) d'obtenir une image Thematic Mapper pour une nébulosité maximum donnée

PROBABILITE (en %) D'OBTENIR AU MOINS UNE IMAGE POUR UNE NEBULOSITE MAXIMUM DONNEE									
9H30 T M									
NEBULOSITE en 1/3 de ciel couvert	0	1	2	3	4	5	6	7	8
JANVIER	17	31	49	57	72	77	81	91	100
FEVRIER	11	20	29	39	48	60	83	95	100
MARS	3	3	11	19	31	39	51	81	100
AVRIL	7	13	27	37	56	71	86	89	100
MAI	17	29	45	53	62	76	85	91	100
JUIN	13	20	43	60	69	84	93	99	100
JUILLET	32	52	67	75	86	94	97	98	100
AOUT	31	49	59	73	84	89	93	99	100
SEPTEMBRE	27	42	59	72	87	92	94	98	100
OCTOBRE	7	24	45	60	68	81	86	93	100
NOVEMBRE	29	46	57	65	75	81	87	96	100
DECEMBRE	3	29	43	57	66	75	87	96	100

Tableau 4 - Probabilité (en pourcentage) d'obtenir une image SPOT pour une nébulosité maximum donnée

PROBABILITE (en %) D'OBTENIR AU MOINS UNE IMAGE POUR UNE NEBULOSITE MAXIMUM ET UN ANGLE DE VISEE MAXIMUM DONNE									
Nébulosité en 1/3 de ciel couvert	0			1			2		
Angle de visée SPOT	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°
JANVIER	6	16	34	14	36	64	20	48	78
FEVRIER	3	10	22	12	31	57	15	39	67
MARS	1	3	7	2	6	15	8	22	44
AVRIL	0	0	0	3	10	22	6	16	34
MAI	2	6	15	15	39	67	21	50	80
JUIN	17	41	70	29	62	89	34	70	91
JUILLET	13	34	61	29	62	89	42	79	97
AOUT	14	36	64	30	64	90	41	78	97
SEPTEMBRE	13	34	61	23	53	82	31	66	93
OCTOBRE	3	10	22	11	28	53	21	50	80
NOVEMBRE	8	22	44	23	53	82	35	72	94
DECEMBRE	2	6	15	12	31	57	21	50	80

2			3			4			5		
> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°		
78	27	60	88	33	69	93	44	81	97		
67	18	44	73	25	57	85	39	76	96		
44	17	41	70	29	62	89	39	76	96		
34	18	44	73	25	57	85	39	76	96		
80	25	57	85	35	72	94	43	80	97		
93	47	83	98	60	92	99	72	97	99		
97	51	87	99	64	94	99	74	98	99		
97	57	91	99	68	96	99	75	98	99		
91	42	79	97	56	91	99	66	95	99		
80	34	70	93	47	83	98	55	90	99		
94	41	78	97	50	86	98	62	93	99		
80	27	60	88	48	84	98	60	92	99		

6			7			8			8		
VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°
62	93	99	75	98	99	100	100	100	100	100	100
59	92	99	79	98	99	100	100	100	100	100	100
49	85	98	63	94	99	100	100	100	100	100	100
53	89	99	70	96	99	100	100	100	100	100	100
51	87	99	74	97	99	100	100	100	100	100	100
79	98	99	90	99	99	100	100	100	100	100	100
84	99	99	94	99	99	100	100	100	100	100	100
85	99	99	95	99	99	100	100	100	100	100	100
77	98	99	88	99	99	100	100	100	100	100	100
69	96	99	79	98	99	100	100	100	100	100	100
70	96	99	85	99	99	100	100	100	100	100	100
70	96	99	85	99	99	100	100	100	100	100	100

- un *indicador del espacio construido* es sensible a la densidad de vegetación: un periodo con fuerte actividad fotosintética es más conveniente (*Noviembre*);

- una *extracción automática de vialidades*, una *caracterización de la estructura o de la textura* necesitan una imagen en modalidad pancromática (resolución espacial 10 m), registrada con un ángulo de enfoque cercano a la vertical. Las diferentes probabilidades de obtención de imágenes calculadas indican que *la conjunción de la temática y la meteorología es favorable durante la estación seca. Durante la estación húmeda, solamente el mes de Noviembre parece adecuado.*

1. 3 LOS PRETRATAMIENTOS

Hemos decidido procesar en forma prioritaria las diferentes escenas captadas en Junio de 1986. Se trata del único periodo para el cual disponemos de 2 escenas pancromáticas y 2 escenas en modalidad multiespectral, necesarias para cubrir a Quito en su conjunto.

Las escenas pancromáticas disponibles, aunque registradas sobre el mismo trazado, se superponen en una superficie de alrededor de unas 300 líneas. Con el fin de juntar exactamente las dos imágenes, fué necesario determinar puntos idénticos en ambas. Luego extrajimos una ventana de 2000 columnas por 4000 líneas (resolución espacial 10m) que corresponde a la zona que nos interesa.

Con el fin de superponer la imagen pancromática con las imágenes multiespectrales, se hizo un re-muestreo de estas últimas, duplicando los pixels en línea y en columna. la superposición de estos dos tipos de imágenes reveló *un desfase de entre 0 y más o menos 30 pixels* Rectificamos por lo tanto la imagen pancromática mediante un algoritmo basado sobre un *polinomio de deformación de grado 5 que requiere 10 puntos de referencia.*

El resultado después de una pasada es satisfactorio teniendo en cuenta la precisión de la localización de los puntos de referencia sobre las dos imágenes.

Contrariamente, no pudimos efectuar corrección geométrica alguna en relación con mapas por el momento ; pero el trabajo será realizado en los próximos meses.

Parte 2 - PRIMEROS RESULTADOS SOBRE LAS IMAGENES SPOT DE QUITO

Nuestros primeros explotaciones de las imágenes SPOT de Quito fueron llevadas en tres direcciones de investigación : delimitación y estratificaciones simples de la aglomeración, extracción de las redes de vialidad y análisis numérico de texturas y estructuras de barrios. Los resultados obtenidos en cada uno de estos puntos se expondrán sucesivamente durante esta segunda parte. Se trata de resultados

intermedios cuya evaluación precisa se está llevando a cabo actualmente.

2. 1. ESTRATIFICACIONES SIMPLAS A PARTIR DE LAS IMAGENES PROCESADAS

La primera operación que efectuamos se refiere al *trazado del límite externo de la ciudad*. Para llegar a la delimitación final se utilizaron varios documentos fotográficos realizados en el Taller de Teledetección de Bondy en Francia (ATOB, ORSTOM) (1):

- 2 imágenes pancromáticas:

- Junio escala 1/30.000 (dos fotografías en papel en blanco y negro diferentemente contrastadas con el fin de tomar en consideración la dinámica entre los diferentes espacios no urbanizados);

- Agosto escala 1/50.000 (dos fotografías en papel en blanco y negro diferentemente contrastadas);

- Índice de vegetación $(XS3-XS2)/(XS3 + XS2)$ escala 1/50.000 (dos fotografías en papel en blanco y negro diferentemente contrastadas);

- Desviación-estándar local (ventana 5*5) realizada sobre la imagen pancromática, foto color de pantalla ampliada, escala aproximada 1/60.000;

- Índice de brillantez $(XS3 + XS2)$, foto en color de pantalla ampliada, escala aproximada 1/60.000.

Los diferentes límites obtenidos independientemente por dos interpretadores fueron confrontados. Sus respectivos trazados no ofrecen diferencias fundamentales. Se escogió entonces un "límite de síntesis" (ver figura 1), que fué controntado mediante comprobaciones en el terreno. Únicamente la delimitación norte de la ciudad plantea algunos problemas causados por un espacio urbano continuo a lo largo de la carretera panamericana, que es de interrupción delicada. El límite definitivo ha sido definido de acuerdo con los miembros del Municipio de Quito.

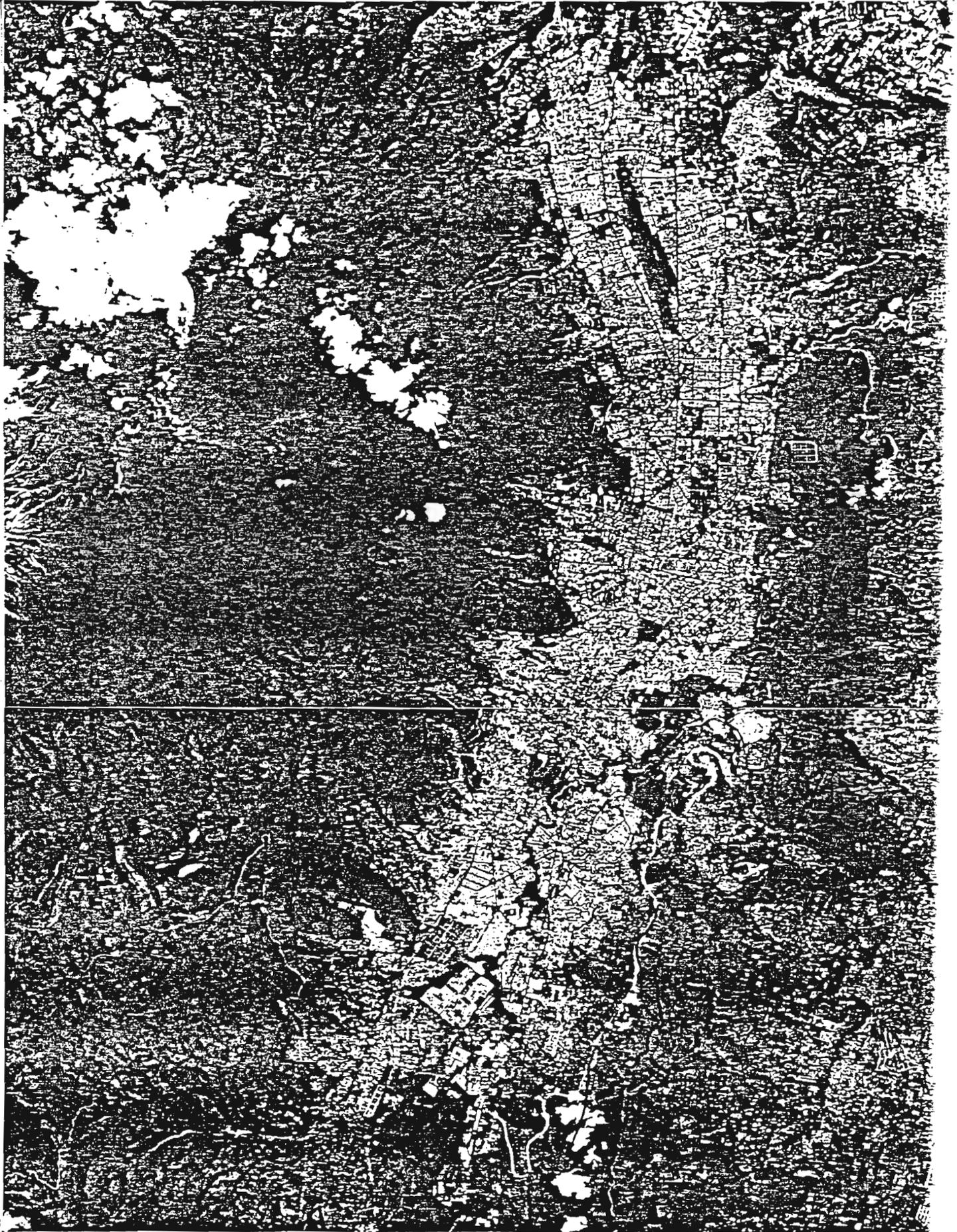
La discriminación del límite externo se realizó esencialmente sobre la imagen pancromática en bruto; pero el índice de vegetación y la desviación-tipo local han señalado algunas ambigüedades. Utilizaremos *el aparte interesante de la desviación-tipo local* que delimita en forma suficientemente segura lo rural de lo urbano para que un procesamiento automático (simple definición de umbrales) pueda contemplarse. Actualmente trabajamos sobre este punto.

La zonificación en el interior del espacio urbano fué realizada a partir de una copia de pantalla que representa una clasificación de *densidad de construcción*. Esta

(1) Los diferentes neo-canales fueron elaborados sobre la estación de trabajo MATRA-SUN del ATOB (programas elaborados por M. RAKOTO-RAVALONTEALALMA)

Figura 1 - Trazado del limite externo de la ciudad de Quito.

Imagen pancromática SPOT del 3 de Junio de 1988.



clasificación de seis divisiones fuè supervisada en función de estadísticas descriptivas calculadas sobre la muestra de 199 manzanas descritas y medidas anteriormente (ver sistema de selección y técnica de recolección en el paràgrafo 1.1). La interpretación de esta clasificación, de pixels, requiriò un considerable trabajo de zonificación, no solamente en función del valor de los pixels sino màs aún en función de las asociaciones de valores (de la textura) de la imagen clasificada. En efecto, constituye una aberración el concebir un indicador de densidad *por pixel*, y se debe tener en cuenta el vecindario, con mayor motivo si se trata de realizar una zonificación dentro del enfoque de *una estratificación del espacio*. No se recortaron, pues, las zonas de escasa superficie. Esta zonificación, para la cual conservamos las seis divisiones originales se realizò independientemente por dos intérpretes y se re-colocò, tras confrontación, sobre la ampliación pancromática 1/30.000 previamente delimitada.

Estos pocos ejemplos muestran el interés de los neo-canales para establecer fácilmente clasificaciones simples de la ciudad, de gran importancia para nuestro objetivo de estratificación del espacio urbano con miras a una encuesta demogràfica.

2. 2. EVIDENCIACION DE LAS REDES DE VIALIDAD

Hemos constatado la ventaja, en sitios urbanizados, con el fin de hacer aparecer los fenómenos urbanos que nos interesan (densidad de construcción, por ejemplo), del procesamiento de imágenes satélite *en zonas predefinidas en relación con el tratamiento clásico por pixel*. Esta ventaja se hizo evidente cuando se trabajò sobre las imágenes Thematic Mapper de Marsella.

En este preciso caso, las zonas predefinidas resultaban de zonificaciones visuales en cuanto a la morfología del tejido urbano, y de zonificación administrativa impuesta, en cuanto se trata de las manzanas del censo. Estas diferentes zonificaciones fueron sometidas a digitalización y superpuestas sobre la imagen de satélite después de la corrección de esta última. Tal superposición nos permitió generar estadísticas radiométricas por zona, cuyo procesamiento permitía *la diferenciación entre las distintas tejidos urbanos*. Este no es el caso de Quito, en donde nos colocamos en una situación de aplicación práctica del método de sondeo espacial sobre imagen de satélite : no utilizamos información distinta de los documentos de satélite y no sometemos a digitalización las diferentes manzanas. Precisamente es esta entidad, la manzana, la que servirá de base para la definición de las unidades espaciales de encuesta.

Se trata aquí, por lo tanto, de *poner a prueba la confiabilidad de una extracción*

automática de vialidad que nos debe permitir la creación de zonas, siendo una zona la unidad espacial incluida en el interior de los contornos de la vialidad adyacente. Para llegar a este ambicioso objetivo se deben resolver dos grandes problemas : la extracción de la vialidad, la reconstrucción de los contornos (redes de vialidad) debiendo estar cada zona imperativamente cerrada.

Expondremos aquí los diferentes procesamientos puestos a prueba en relación con los dos puntos, los problemas que de allí fluyen y los resultados obtenidos, por comparación con un método visual.

a) Presentación del método de extracción de la vialidad mediante la ayuda de algoritmos de morfología matemática

Definimos una pequeña imagen de 256 pixels de lado extraída de una escena SPOT pancromática de Quito (Noviembre 28 de 1986). El tamaño de esta pequeña imagen nos fué impuesto por contingencias materiales : tamaño de los cuadros que puede manejar el computador y tiempo de cálculo razonable que permita poner a prueba diferentes cadenas de procesamiento en morfología matemática.

Existe una multitud de métodos para detectar y extraer contornos sobre una imagen. Algunos de estos métodos, entre los más clásicos y más utilizados en diferentes campos los expone BASSEVILLE M. (1979). Los métodos de detección de contornos más corrientemente utilizados en teledetección se fundan sobre *gradientes* (ROBINSON, KIRSCH, PREWITT, SOBEL, ROBERTS, etc...) o los *Laplacianos*. La *morfología matemática* en tonalidades de gris sobre una imagen matricial, de más reciente desarrollo, ofrece cadenas de procesamiento atractivas, rápidas en tiempo de cálculo y fáciles de poner en práctica, lo que no siempre sucede con métodos más clásicos. Decidimos, pues, poner a prueba estos nuevos métodos sobre una imagen de satélite SPOT de la ciudad de Quito.

b) Definición de la cadena de procesamiento escogida para extracción de la vialidad (1)

Las principales redes de carreteras se singularizan en una imagen de satélite por 3 factores esenciales (Foto 1) :

- su muy débil respuesta radiométrica (sobre imagen pancromática),
- su finura espacial,
- su configuración lineal (sucesión de pixels conexos).

Una operación de morfología matemática en tintes de gris se adapta especialmente

(1) La secuencia de procesamiento fué definida en colaboración con M. RAKOTO-RAVALONTALINA (ATOB).

Extracción de la viabilidad sobre un imagen SPOT pancromática mediante ayuda de algoritmos de morfología matemática



Foto 1
Imagen SPOT pancromática
en tonos de gris

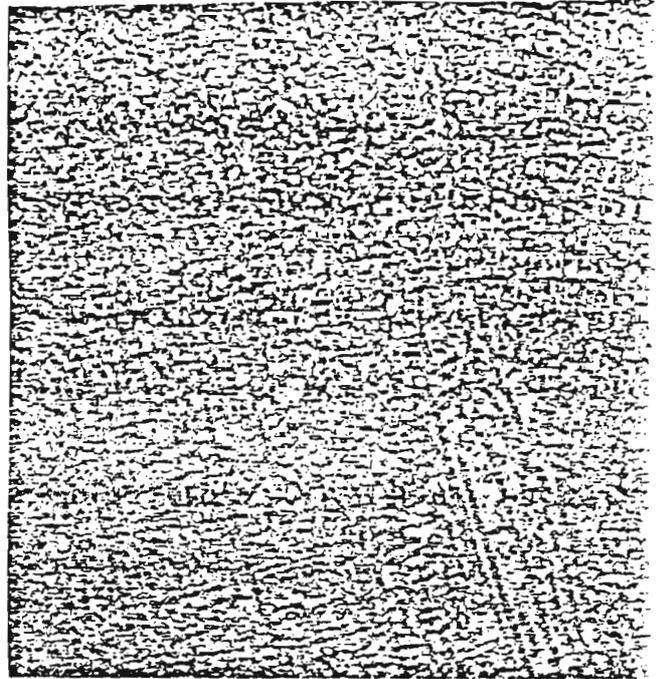


Foto 2
(Cierre - Imagen original)
Umbrales :
0=blanco, 1-255=negro

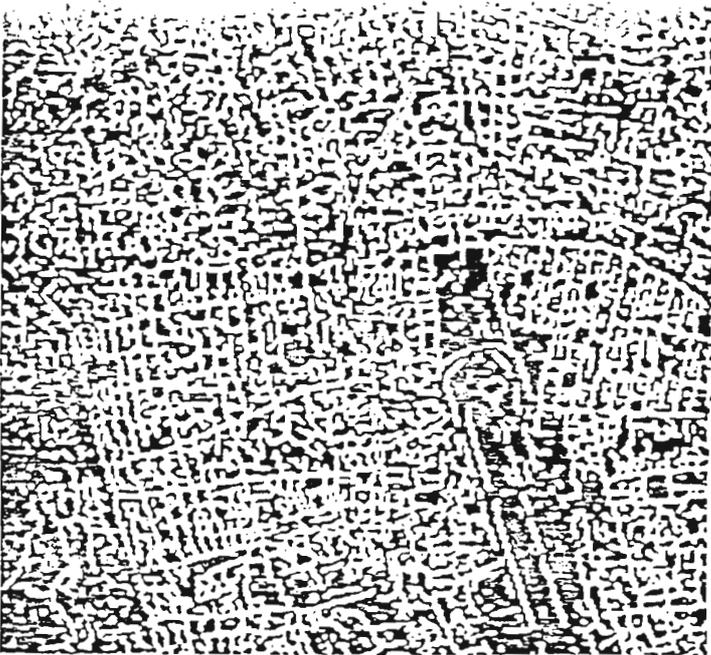


Foto 3
Adelgazamiento tras un paso

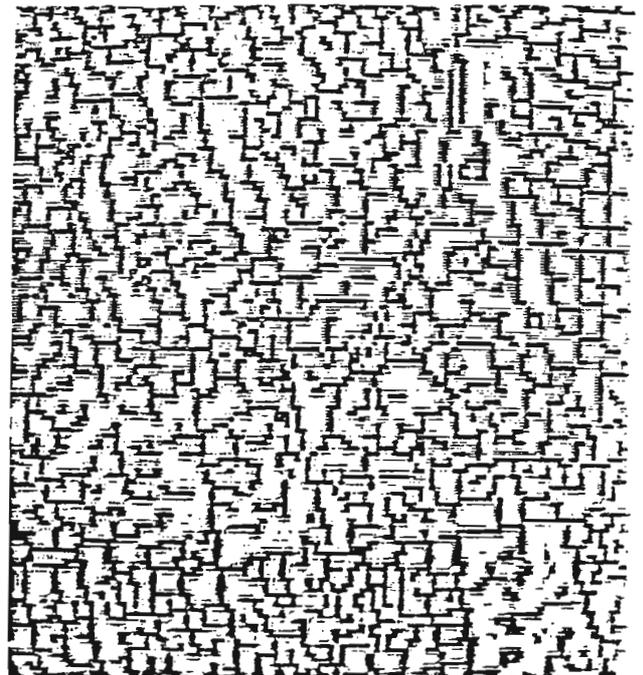


Foto 4
Imagen de distancias

bien para tener en cuenta la combinación de las primeras características : se trata de la transformación "sombrero de copa". En efecto, no es posible esperar extraer la vialidad mediante una simple definición de umbrales, pues las redes no son los únicos componentes de la imagen que responden en forma muy débil dentro de los límites de lo visible (los bosques ofrecen una repuesta muy parecida). En cambio, el tomar en cuenta *simultáneamente* los dos primeros factores, es discriminante.

. Transformación "sombrero de capo"

Si se considera un transecto dentro de la imagen bajo la forma de histograma de tonos de gris, las redes aparecen como valles profundos (poseen un valor muy bajo) y de escasa amplitud (las redes no son amplias, desde un punto de vista espacial). Se trata, pues, de conservar tan solo este fenómeno con el fin de extraer mejor la vialidad. Este resultado se obtiene tras las convoluciones descritas a continuación :

• "cierre" de la imagen. Esta transformación se descompone en 2 operaciones básicas realizadas una tras otra (el orden es aquí fundamental) : una "dilatación" seguida de una "erosión", lo cual resulta, al contrario, de reducir los picos y ampliar los valles.

El cierre obtuvo un relleno de los valles, dejando el resto de la imagen globalmente poco transformado. Solo nos queda pues, el sustraer la imagen que se acaba de obtener por la imagen original, y a definir los umbrales de este resultado, de manera de conservar tan sólo la información que nos interesa, es decir, los valles.

• *sustracción de la imagen "cerrada" a la imagen original y udefinición de umbrales.* Obtenemos, pues, una imagen binaria en la cual sólo aparecen los valles, es decir, principalmente los elementos de vialidad que nos interesan.

Después de varias pruebas, escogimos los siguientes valores para los parametros :

- tipo del elemento estructurante : máscara 3*3 pixels, conexidad 8 ;

- valor del umbral : influye considerablemente sobre el resultado. Operamos mediante definición visual interactiva de umbrales con PERICOLOR 1000, siendo el valor óptimo del umbral correspondiente con el valor para el cual conservamos un máximo de elementos lineales y un mínimo de "manchas" (Foto 2). Esta selección es, desde luego, arbitraria.

. Adelgazamiento por iteraciones sucesivas

Lo que nos interesa aquí no es conservar una información sobre la amplitud de la calzada, sino extraer un elemento de contorno a partir de los elementos de la vialidad. Ahora bien, la imagen que hasta aquí hemos obtenido por estos tratamientos sencillos aparece poco aprovechable debido a su exceso de ruido. Procedemos, pues, a un adelgazamiento de los elementos de vialidad extraídos *con el fin de conservar tan sólo los elementos lineales*. Este adelgazamiento consiste en

una sucesión de 8 erosiones de la imagen binaria, siendo cada una de tales erosiones efectuada en una de las ocho direcciones posibles (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, y 315° ; imagen en trama cuadrada y máscara 3*3 pixels). La ventaja de este tratamiento esta en el hecho de no interrumpir los elementos lineales : *preserva la conexidad de los elementos de vialidad*. La Foto 3 fué tomada después de un adelgazamiento completo realizado en las 8 direcciones.

c) mejoramiento de la extracción de la vialidad

. Tentativa de conexión de pixels aislados. Supresión de pixels aislados.

Dos operaciones son indispensables para mejorar la calidad de la extracción de la vialidad : la conexión de pixels aislados o en grupos a un segmento con el fin de conservar la continuidad de la red, así como la supresión de los pixels o grupos de pixels que no pertenecen a la vialidad, a priori.

Dentro de la imagen, encontramos numerosos pixels desconectados del elemento lineal del cual deberían formar parte. Para tratar de reconstruir estos elementos de contorno, decidimos comparar, dentro de una máscara 5*5 las diferentes configuraciones encontradas en la imagen con cierto número de configuraciones de referencia para las cuales se decidió crear un pixel contorno. Estas configuraciones de referencia están definidas de tal manera que el pixel central es nulo, interrumpiendo en tal forma un elemento lineal de, al menos, 4 pixels alineados (en conexidad 8).

Al revés, y para limpiar la imagen de numerosos montones de 1, 2, 3 pixels desconectados de un elemento de red, exploramos la imagen mediante una ventana 5*5. Cuando se encuentra una de las 15 configuraciones correspondientes a un montón de pixels desconectados de la red, el pixel central toma el valor 0. Se efectuaron dos pasadas antes de limpiar de manera efectiva la imagen.

. Ensayo de cierre de los contornos

Se desea prolongar el método que iniciamos al someter nuestra imagen a algoritmos de seguimiento de contorno. La literatura es muy abundante al respecto. El método preconizado por MILGRAM (1986) que fué puesta a prueba sobre una fotografía aérea numerizada parece adaptarse a nuestro caso aunque existe el riesgo de que aparezcan un gran número de *puntas "selle"*.

Este método se fundamenta en la idea principal que un punto "selle", es decir un eventual punto contorno aún no detectado, presenta la particularidad de ser un punto en el cual la función "distancia al punto contorno más próximo" pasa a la vez por un máximo de una dirección y por un mínimo en otra dirección. El algoritmo se divide, pues, en varias partes :

• generación de la imagen de las distancias al punto de contorno más próximo ;

• búsqueda de puntos "selle". Para evitar una sobre-detección de estos puntos "selle", se eliminan los puntos detectados que estén situados demasiado lejos del punto contraste más próximo.

Este algoritmo puede eventualmente repetirse transformando los puntos "selle" en puntos contorno, y luego recalculando una nueva imagen de las distancias...etc.

La imagen de las distancias es una aproximación del doble de la distancia euclidiana utilizando las distancias de "Chamfer" con el fin de poder generar una imagen constituida por números enteros. Se calcula en dos pasadas mediante máscaras. La generamos sobre una pequeña imagen de 128×128 , debido a imperativos relacionados con el material (tamaño limitado de los cuadros en memoria), situada en el centro de nuestra imagen de prueba (Foto 4).

La búsqueda de los puntos "selle" requiere para cada pixel la prueba de las 12 configuraciones de alineación dentro de una ventana 3×3 centrada sobre el punto "selle" eventual.

El conjunto de estas dos operaciones se realiza muy rápidamente.

d) Conclusiones y perspectivas

La imagen resultante de estos tratamientos sencillos (Figura 2) no es enteramente satisfactoria, teniendo en cuenta lo que deseamos producir. De una parte, *no todas las elementos de vialidad han sido extraídos*, de otra parte, *se han tomado en cuenta pixels que no son elementos de vialidad*.

En cuanto a los pasos iniciales, se contempla un *tratamiento de la imagen inicial de manera de establecer más claramente el contraste*. : se probarán y evaluarán diferentes filtros y métodos sucesivamente. En cuanto al segundo punto, parecería que un cierto número de estos errores son debidos a la sombra de ciertos edificios de gran altura. La comparación entre una parte de la imagen SPOT tratada, y de un extracto de mapa inicialmente a escala 1/15.000 (Figura 2) (1) indica que el problema que debe resolverse está relacionado prioritariamente a una *sobre-detección de la red de vialidad*. Se verá que *una multitud de pequeñas segmentos se encuentran representados dentro de las manzanas* y que *no necesariamente son las redes más importantes las que se destacan con mayor fidelidad*. El tomar en cuenta el canal infrarrojo próximo (XS3) tal vez permitirá aclarar esta confusión.

(1) El mapa no se superpone exactamente sobre la imagen, la cual no ha sido aún ajustada geográficamente. Por consiguiente, es difícil evaluar numéricamente la confiabilidad de este procesamiento poniendo en práctica un proceso de tipo matriz de fusión.

**Figura 2 - Extracción automática de redes sobre imagen SPOT
pancromática del 26 de noviembre de 1986. Comparación con
un extracto de mapa (IGM, escala inicial 1/15.000).**



Estos primeros resultados nos muestran la dificultad de extraer *numéricamente* la vialidad en el ambiente urbano a partir de una imagen en la cual *visualmente* esta aparece en forma relativamente destacada. Sin embargo, una primera comparación permite afirmar que si bien el método visual permite extraer solamente los elementos de vialidad y constituir así elementos lineales continuos, no permite extirparlos todos. La *red secundaria* extraída visualmente es, en efecto, menos importante que la que se extrae por el método numérico (en forma discontinua).

2. 3. ANALISIS NUMERICO DE LAS TEXTURAS Y ESTRUCTURAS DE LOS BARRIOS

Para aprovechar en esta tercera forma las imágenes SPOT de Quito, la pregunta a resolver era la siguiente : Como caracterizar numéricamente los barrios de Quito en función de sus texturas sobre la imagen y de sus estructuras?

a) Selección de la muestra de prueba

La muestra de prueba está compuesta por 65 pequeñas imágenes cuadradas y de tamaño fijo (64 pixels), repartidas sobre el conjunto de la imagen SPOT de Quito del 26 de Noviembre de 1986.

La forma y la dimensión de las imágenes están dictadas por la necesidad de simplificar los cálculos de ciertos algoritmos (Transformada de Fourier) y por la obligación de dar satisfacción a un compromiso : disponer de una cantidad de información suficiente y al mismo tiempo respetar la homogeneidad de los barrios, en términos de la textura y de la estructura percibidas visualmente. Las zonas con 640 metros de lado nos parecieron las que mejores condiciones ofrecían.

En cuanto a la selección de las imágenes de la muestra, ésta obedeció esencialmente a tres criterios :

- una repartición espacial tan amplia como fuera posible, de manera de cubrir el conjunto de las realidades urbanas ;
- una homogeneidad visual de la zona ;
- en la medida de lo posible, una correlación con las manzanas de la encuesta Morfología (octubre-diciembre de 1986) para la caracterización geográfica.

Anotemos que ciertas zonas, típicamente rurales, se tuvieron en cuenta como elementos de comparación entre lo urbano y lo "no-urbano", y para verificar la validez de los criterios escogidos.

b) Estudio de la textura : las matrices de co-ocurrencia en niveles de gris

La selección de matrices de co-ocurrencia para caracterizar la textura en el interior de zonas homogéneas siguió lo determinado por dos razones principales :

- es una de las únicas maneras de cuantificar en forma sintética y rápida la textura dentro de una zona pre-definida ;

- este método favorece una aproximación probabilística que parece adaptarse bien al tipo de textura de las imágenes de satélite, como lo afirman los numerosos autores que lo han ensayado (SLIMANI M., 1985 ; LAPORTE J.M., 1983 ; DESACHY J., 1980).

Los alentadores resultados conseguidos con este método aplicado a la imagen TM de Marsella durante la primera fase de este programa de investigación nos condujeron a reiterar la utilización de las matrices de co-ocurrencia para caracterizar las texturas de la imagen SPOT de Quito. El programa de cálculo de matrices de co-ocurrencia desarrollado por A. MICHEL (ORSTOM) se aplicó, pues, a las 65 zonas que componen la muestra de Quito : para cada una de tales zonas se produjeron 5 parámetros que caracterizan la matriz de co-ocurrencia (centro de gravedad de la matriz, momento angular del segundo orden, grado de organización de la nube, homogeneidad local, inercia). La relación espacial tomada es la siguiente : distancia entre dos pixels igual a 1, ángulo igual a 0°.

Un *Análisis de Componentes Principales* (ACP) sobre tales parámetros evidenció una correlación bastante grande de los parámetros entre sí, la primacía de la entropía y del segundo momento angular y reagrupación de individuos según su posición sobre el primer plano factorial.

Se realizaron enseguida dos tipos de *clasificaciones automáticas* (Clasificación Ascendente Jerárquica y Nubes Dinámicas), chequeadas por un control visual de las clases obtenidas. En el presente contexto, las Nubes Dinámicas aparecen como el método de clasificación más adecuado.

La clasificación permitió así aclarar *cuatro grandes grupos de textura* que recogen barrios de paisaje bastante homogéneo :

- Grupo 1 : textura lisa, medio rural y pre-urbano (1)
- Grupo 2 : textura punteada, escasa-media urbanización
- Grupo 3 : textura granulosa, media-fuerte urbanización
- Grupo 4 : textura rugosa, urbanización densa.

Al terminar tal estudio, *el método de clasificación en función de los parámetros de matrices de co-ocurrencia se revela adecuado : no solamente permite discriminar lo urbano y lo no-urbano, sino también particiones dentro del espacio urbanizado.*

Muestra que los caracteres texturales más importantes son el grado de organización de la nube y, secundariamente, el segundo momento angular.

(1) Los conjuntos de construcciones, aún de tamaño reducido, son detectables sobre el canal pancromático SPOT y revelan la inminencia de la colonización urbana.

c) Análisis de la estructura : la Transformada de FOURIER

Se tratò aquí de poner a prueba el aporte de una herramienta matemática, la Transformada de Fourier, con el fin de poner en evidencia redes (principalmente de vialidad) y clasificar estructuras urbanas periódicas. Este método, utilizado en las ciencias físicas para el estudio de fenómenos periódicos, especialmente ópticos, ha sido ya utilizado con cierto éxito en el ORSTOM para sacar a la luz estructuras de dunas (MERING C., PONCET Y., RAKOTO M., 1985).

Después de analizar los espectros que corresponden a imágenes elementales que simbolizan la red de vialidad de una ciudad y el habitat, pasamos a situaciones reales encontradas en Gito, aplicando a las 85 imágenes de la muestra el programa informático desarrollado en MINI 6 y PERICOLOR 1000 por M. RAKOTO (ORSTOM) (1) :

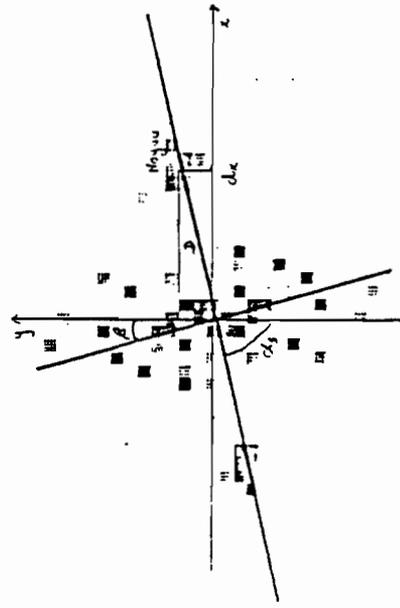
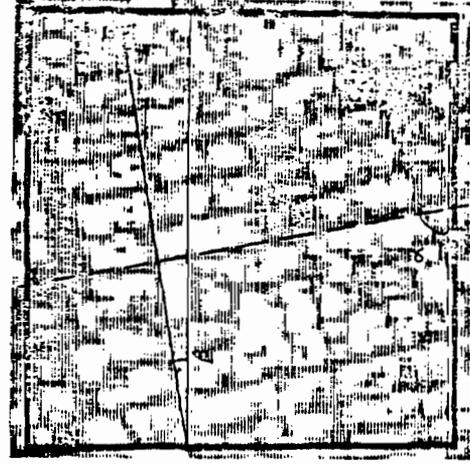
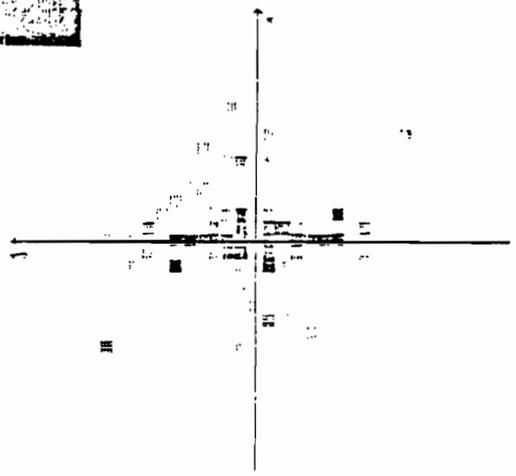
- Grupo 1 : estructuras débiles, radios de 3 a 6 unidades (9 casos)
- Grupo 2 : estructuras medianas, radios de 6 a 9 unidades (20 casos)
- Grupo 3 : estructuras fuertes, radios de 9 a 16 unidades (12 casos).

Puesto que la riqueza de información de una imagen pancromática SPOT en el ambiente urbano genera un ruido que perjudica su interpretación en el espectro, pusimos a prueba varios métodos para mejorar el método de Fourier : simplificación de la imagen por una definición de umbrales en 4 niveles de gris, parametraje de los espectros (distancia al centro de los picos) y Transformada de Fourier inversa. Otro medio para mejorar, no ensayado, consistiría en estudiar la estructura después de una extracción de la vialidad del tipo que se expuso en el capítulo 2. 2 de la presente ponencia ; pero al proceder en esta forma, se reduciría la estructura urbana exclusivamente a la vialidad, siendo el arreglo del habitat un parámetro igualmente importante y pertinente.

La explotación de los resultados de la Transformada de Fourier resultò difícil ; sin embargo, con una herramienta tan simple como la distancia de los picos al centro, logramos aclarar *tres grandes categorías de barrios, y establecer una jerarquía de estructuras de barrios mediante doble clasificación de redes secundarias. Aunque sucintas, estos resultados permiten contemplar un proceso automático de extracción de barrios con estructuras periódicas y caracterizarlos fácilmente por la intensidad y las direcciones de las estructuras principales.* Pero evidenciar las estructuras secundarias o la discriminación de los accidentes del terreno presentan dificultades y necesitan *procesamientos previos de la imagen* en los cuales la intervención humana es aún necesaria para ciertas elecciones, tales como los que se refieren a los parámetros.

(1) Véanse los ejemplos de espectros presentados en la Figura 3.

Figura 3 - Análisis de la estructura : ejemplos de espectros de Fourier



d) Caracterización textural y estructural

El Cuadro 5 muestra la existencia de una cierta coherencia entre los resultados de los dos análisis, textural y estructural : aunque subsistan un cierto número de imprecisiones, no aparece contradicción flagrante alguna. Teniendo en cuenta la muy grande reducción de información experimentada al momento de la caracterización de los espectros, tenemos aquí un resultado satisfactorio.

Cuadro 5 - Caracterización textural y estructural

CLASSES		S T R U C T U R E			
		0 (voir page précédente)	1	2	3
T E X T U R E	1	environnement naturel sans trace d'exploitation et sans accident de terrain (zone 26)	trame à structure faible (peu réfléchante ou peu dense)	- environnement rural: parcellaire (10) ou accidenté (15) - trame de voirie "pré-urbaine" (42)	trame de voirie "haute fréquence" (30)
	2	- "mitage diffus": habitat dispersé sans organisation apparente (52)	parcellaire mité	- "mitage par noyaux" séparés d'étendues non urbanisées (43) - trame en voie d'urbanisation (27)	
	3	- bâti de banlieues récentes habitat dense mais individuel: populaire (51) aisé (56) ou constructions utilitaires		- bâti individuel avec espaces verts, quartiers populaires (31) ou aisés (56) - bâti continu de banlieues anciennes et dégradées (36)	
	4	proche centre construit dans le 2nd quart du siècle en voie de "taudification" (18)	proche centre à réseau secondaire nul ou faible - quartiers résidentiels construits de 1900 à 1960 (62) - quartier des affaires à immeubles récents (65)	quartiers du centre à réseau secondaire faible ou moyen - habitat individuel aisé ou mixte proche du Centre (63) - centre en "taudification" (17)	fort réseau secondaire, quartiers à disposition géométrique: - "taudification" des constructions anciennes (19) - récentes: programmes de logement de l'Etat (6)

Extracto de : EBERHARD J.M., 1987. Télédétection urbaine : éléments de caractérisation géographique des quartiers de Quito à l'aide d'une image SPOT. EHESS, mémoire de DEA, 98 p.

e) Conclusiones

Si bien el método de análisis de la textura mediante matrices de co-ocurrencia sólo necesita algunos ajustes para ser plenamente operacional, la aplicación de la Transformada de Fourier a las imágenes de teledetección necesita, ella sí, adaptaciones para aumentar su eficacia.

Hemos visto que una primera caracterización de las estructuras era posible con un solo parámetro (el radio) y que las conclusiones, por sumarias que sean, no solamente no contenían contradicción interna sino que venían a reforzar los resultados obtenidos mediante análisis de textura. El recurrir a otros parámetros no puede ser sino conveniente para mejorar lo pertinente del método y la finura de las particiones.

Sin embargo, vale la pena recordar *el carácter especial de las estructuras evidenciadas por este método*: estructuras de elementos periódicos, o al menos, regulares. La transformada de Fourier no puede pues convenir sino para la caracterización de ciertos barrios y no para el análisis de estructuras complejas o que pertenecen a un escala diferente de la investigada (micro o macro estructuras).

PUBLICACIONES Y NOTAS DE TRABAJO DEL EQUIPO ORSTOM

(disponibles en : ORSTOM, documentation ATOB, 70-74 Route d'Aulnay, 93140 Bondy, FRANCE, o misión ORSTOM de Quito, ECUATEUR)

Articulos

- 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 (en cours d'édition), 10 p. + photos.
- 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.

Ponencias

- 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. Informatica, teledeteccion y observacion de las poblaciones urbanas. Una investigacion vigente en Quito (ECUADOR). Communication à la Primera Conferencia Latinoamericana sobre informatica en geografia, San José, Costa Rica, 5-9 Octobre 1987.

SOURIS M., 1987. A geographic 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.

Principales notas de trabajo no publicadas

Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1986. Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport intermédiaire - Avril 1986. Paris, 190 p.

Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1987. Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport final - Août 1987. Paris, 53 p. + 538 p.

BARBARY O., 1986. Apport d'une stratification morphologique des districts INSEE de recensement dans l'estimation par sondage des effectifs de population à Marseille. Quito, 47 p.

DUREAU F. et MICHEL A., 1986. Quito : enquête morphologie urbaine. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). Quito, 19 p.

DUREAU F., 1987. Quito : enquête bâti/population. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). Quito, 27 p.

EBERHARD J.M., 1987. Télédétection urbaine : éléments de caractérisation géographique des quartiers de Quito à l'aide d'une image SPOT. Mémoire de DEA, EHESS, 98 p.

MICHEL A., 1986 (et version actualisée en 1987). Le point sur la télédétection urbaine en 1986 à travers la bibliographie française et anglo-saxonne sur le sujet. Recueil des fiches de dépouillement des articles et ouvrages. ORSTOM, 49p.

MICHEL A., 1987. Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution : étude statistique du descripteur "densité du bâti", présentation des classifications. (Image TM Marseille 1983). Paris, 99 p.

MICHEL A., 1987. Influence des facteurs météorologiques sur la probabilité d'obtention d'une image satellite SPOT ou THEMATIC MAPPER. Etude sur le site de Quito, Equateur. Quito, 14 p.

ELEMENTOS DE BIBLIOGRAFIA

Utilización de datos de teledetección aérea y espacial para estimaciones demográficas

- ADENYI P.O., 1983. An aerial photographic method for estimating urban population. Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 49, n° 4, pp.545-560
- BALLUT A. et GAUTHIER M., 1983. Une méthode pour la production de données socio-économiques spatialisées dans le cadre d'un schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme. LAURIF, Paris, 55 p..
- GREEN P.E., 1956. Aerial photographic analysis of residential neighborhoods : an evaluation of data accuracy. Social Forces, n° 35, pp. 142-1247.
- HOLZ R.K., HUFF D.L., MAYFIELD R.C., 1969. Urban spatial structure based on remote sensing imagery. Sixth International Symposium Remote Sensing Environment, Vol. II, pp. 819-830.
- HSU S.Y., 1971. Population estimation. Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 37, n°5, pp.449-454.
- LAURIF, ROC, SIDAU, SEE, 1983. Les données urbaines. Système permanent de production rapide et économique. Recherche et synthèse. Paris, 82 p.
- KRAUS S.P., SENGER L.W., RYERSON J.M., 1974. Estimating population from photographically determined residential land use types. Remote sensing of environment, n° 3, pp. 35-42.
- LO C.P. et WELCH R., 1977. Chinese urban population estimates. Annals of the Association for American Geographers, Vol. 67, n° 2, pp. 246-250.
- PORTER P.W., 1956. Population distribution and land use in Liberia. London School of Economics and Political Science, Thèse de Ph. D.
- VERNIERE M., 1978. Méthode d'analyse quantitative de la croissance urbaine dans l'espace et dans le temps. Exemple d'une banlieue de Dakar (Sénégal). Photo interprétation, n° 1, pp. 34-55.
- WATKINS J.F., 1985. Small area population estimates using aerial photography. Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 51, n° 2, pp. 1933-1935.

Explotaciones de imágenes SPOT en medio urbano

- BOUILLOT J., CAMPAGNE P., FLOURIOT J., LAPORTE J.M., SOUDOPLATOFF S., 1984. Recherche méthodologiques sur l'utilisation de la télédétection en aménagement urbain, Simulation SPOT Niamey.
- BOQUET E., 1980. Réactualisation du Mode d'Occupation du Sol par utilisation des simulations SPOT (81 et 83). Université Paris VII, mémoire de maîtrise de géographie, 109 p.
- BOQUET E., 1987. Exemples d'utilisation d'images satellite comme source d'informations géographiques. Actes du Forum FI3G, Juin 1987, pp 539-551.

- COLWELL R.N., POULTON C.E., 1985. SPOT simulation for urban monitoring : a comparison with Landsat 4 TM and MSS imagery and with high altitude color infra red photography. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 51, N° 8, pp1093-1101.
- DEANGELIS R.N., MILAZZO V.A., 1984. Application of simulated SPOT data to mapping land cover patterns and changes in urban fringe environments. SPOT Simulation Application handbook, Proceedings of the 1984SPOT Symposium, May 20-23, Scottsdale, Arizona, pp 177-186.
- DE KEERSMAECKER M.L., 1987 - Etude par télédétection des quartiers résidentiels en milieu urbain : la détermination de leurs caractéristiques socio-économiques. Actes du colloque FT3G, Juin 1987, pp 517-528.
- DOLAN G.M., MARTIN S.R., WARNICK L.J., 1984 - Comparative evaluation of simulated SPOT, Landsat TM and NHAP CIR data for urban land cover and impervious surface identification.SPOT Simulation Application handbook, Proceedings of the 1984 SPOT Symposium, May 20-23, Scottsdale, Arizona, pp 148-156.
- FORSTER B.C., 1985. Principle and rotated component analysis of urban surface reflectance. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 51, N°4, pp 475-477.
- KENNARD R.E., TOLL D.L., 1984. Investigation of SPOT spectral and spatial characteristics for discrimination land use and land cover in Prince Georges's County, Maryland, SPOT Simulation Application handbook, Proceedings of the 1984 SPOT Symposium, May 20-23, Scottsdale, Arizona, pp 165-170.
- HAACK B.N., 1984. Multisensor data analysis of urban environment. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 50, N° 10, pp 1471-1477.
- IGN, 1984. Recherches méthodologiques sur l'utilisation de la télédétection spatiale en aménagement urbain. IGN, Paris, 19 p.
- LAPORTE J.M., 1983. Etude de la texture sur des simulations d'image du satellite de télédétection SPOT, Thèse de 3ème cycle, Paris VII.
- LIMA ROSARIO DA TRIDALE F., 1985. Etude par télédétection de l'organisation de l'espace dans la commune de Carbone, DESS, Paris VI, 37P.
- MADEC V., PEBAYLE J., 1984. Intérêt du futur satellite SPOT pour l'étude du milieu urbain, IAURIF, Rapport de stage.
- NGUYEN P.T., 1984. La simulation SPOT pour l'étude du milieu urbain.
- PEBAYLE J., 1986. L'intérêt en géographie des données du satellite SPOT. Thèse de doctorat 3ème cycle , Université de Paris I, 232p.
- RIMBERT S., 1982. Expérience CNES 81/ 0208, Rapport APT CNRS N°1080, LTC Strasbourg 30 P + figures.
- SOUDOPLATOFF S. , 1985. Apport de la simulation SPOT aux études urbaines, Rapport IGN.

Análisis de las imagenes (textura, estructura, detección de los contornos)

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

DESACHY J., 1980. Contribution à l'étude de la texture en télédétection. Université Paul Sabatier de Toulouse, thèse de docteur en informatique, 325 p.

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

MERING C., PONCET Y., RAKOTO-RAVALONTSALAMA M., 1985. Pour une nouvelle description de la terre : traitements numériques d'images spatiales appliqués aux dunes du Sahel. Laboratoire d'informatique pour les sciences de l'homme, Programmation et sciences de l'homme n° 4, 26 p.

SLIMANI M., 1986. Analyse de texture en télédétection. Application à la segmentation d'images satellite à haute résolution type SPOT. Université de Rennes I, thèse de docteur ingénieur, 82 p. + ann.

L'UTILISATION DE LA TELEDETECTION POUR L'OBSERVATION DES POPULATIONS URBAINES. Une recherche en cours à Quito (EQUATEUR).

Alain MICHEL(*), Jean-Michel EBERHARD(*), Bernard LORTIC(*), Françoise DUREAU (**)

(*)ORSTOM, Atelier de Télédétection, 70-74 route d'Aulnay, 93140 Bondy, FRANCE

(**) ORSTOM, Apartado Postal 6596 CCI, Quito, ECUADOR

Résumé.

L'objectif général assigné au programme de recherche¹ 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, par sondage, des données relatives aux populations urbaines. Les travaux réalisés (par VERNIERE notamment) sur photographies aériennes ont montré l'efficacité de ce principe¹. 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.

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 inform are continuously informing us about urban land use. Our method consists of using this exhaustive information on urban morphology to quickly collect, by sample survey, urban population data. Vernier's work on aerial photographs has shown the efficacy of this principle². A better knowledge of urban areas coming from satellite pictures constitutes an important improvement in demographic sample survey systems :

- to establish a complete and updated survey base
- to optimize the survey by using urban morphologic information
- to obtain localized results according to a significant sectioning of the city.

Introduction.

Les axes de recherche.

Pour atteindre les objectifs fixés au programme, nous effectuons des recherches dans deux directions principales :

- l'interprétation des images satellites à haute résolution en milieu urbain,
- les relations bâti/population et les sondages spatiaux en démographie urbaine.

Ces axes de recherche sont menés depuis 1985 sur la ville de Marseille (FRANCE), qui disposait dès cette date des données nécessaires à la première phase de

¹L'équipe de l'Orstom, pluridisciplinaire est composée de : O. BARBARY (statisticien), F. DUREAU (géographe-démographe, responsable du programme), B. LORTIC (télédétection), A. MICHEL (urbaniste, télédétection), I. RANNOU (télédétection) et M. SOURIS (informaticien).

² VERNIERE M., 1978. Méthode d'analyse quantitative de la croissance urbaine dans l'espace et dans le temps. Exemple d'une banlieue de Dakar (Sénégal). Photo interprétation, n° 1, pp. 34-55.

développement méthodologique, c'est à dire des références fiables pour tester la validité des méthodes mises au point au fur et à mesure de l'avancement des travaux: image Thematic Mapper, photographies aériennes à grande échelle, recensement démographique disponible au niveau de l'ilot.

Les résultats acquis au cours de la première phase de développement méthodologique sur la ville de Marseille (FRANCE)¹.

En télédétection urbaine, outre l'évaluation de la précision du recalage géographique, les travaux ont d'abord porté sur l'extraction de l'information sur la densité du bâti **par zone** à partir de l'image TM ; ce n'est que dans un second temps que les recherches se sont portées sur l'établissement d'une typologie de l'occupation du sol basée sur l'étude de la distribution des grandeurs radiométriques à l'intérieur d'un ilot par l'analyse des quantiles. Les traitements ont été mis au point sur échantillon, puis appliqués à l'ensemble de l'image ou à un autre échantillon. On a procédé à une évaluation systématique de toutes les classifications pratiquées, en construisant des matrices de confusion entre les résultats des classifications et la référence issue de la photo-interprétation contrôlée par des relevés sur le terrain.

Pour les sondages spatiaux en démographie urbaine les résultats des différents tests mis en oeuvre mettent clairement en évidence l'intérêt du tirage systématique sur carte (i.e image satellite classée), et d'une stratification sur la densité du bâti en 3 classes issue de l'image TM : une telle procédure permet de diviser la variance de l'estimateur par un facteur de 1,8 à 4,6 selon le caractère démographique considéré. L'ensemble des résultats confirment la pertinence de la méthode de sondage aréolaire stratifié sur image satellite pour une enquête démographique.

1) Conditions d'exploitation des images SPOT de Quito.

1.1) Contraintes climatiques et thématiques pour l'acquisition d'une image.

Outre les contraintes imposées par le calendrier d'une opération de collecte de données, sur le plan thématique, toutes les périodes de l'année ne présentent pas le même intérêt : ainsi, l'information sur l'espace intersticiel végétal qui varie selon les saisons est fondamentale pour discriminer les différents types de quartiers. Lors du passage du satellite, l'importance de la nébulosité ambiante est un facteur essentiel qui détermine la portion d'image utilisable.

C'est dans ce double faisceau de contraintes, thématiques et météorologiques, que s'inscrit l'utilisation opérationnelle d'images SPOT pour l'observation suivie d'une ville telle que Quito. Concrètement, le problème s'exprime donc dans les termes suivants : quelle est la probabilité d'obtenir une image comportant un ennuagement inférieur à un maximum donné pour un mois jugé thématiquement intéressant (ou indispensable)?

. Probabilité d'obtenir une image.

Nous avons calculé différentes probabilités correspondant à une nébulosité maximum donnée, et en ce qui concerne SPOT à un angle de visée latérale maximum. Nous considérons que la probabilité d'obtenir une image peut-être approximée par la fréquence calculée pour un mois donné pour laquelle une condition de nébulosité est vérifiée (inférieure ou égale à $X/8$, X variant de 0 à 8). Pour une tolérance maximum de 2/8 de ciel couvert, la probabilité maximum d'obtenir une image est:

- pour TM : **67%** en Juillet

- pour SPOT : **42%** en Juillet en visée verticale, **79%** en Juillet avec un angle de visée inférieur à 10°, **97%** en Juillet et en Août avec un angle quelconque.

Les probabilités d'obtention d'une image SPOT et Thematic Mapper sans aucune nébulosité sont du même ordre si l'on accepte un angle de visée au plus égale à 10°. Cette affirmation peut être maintenue quelle que soit la nébulosité maximum tolérée.

¹ Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1987. Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport final - Août 1987. Paris, 53 p. + 538 p.

En ce qui concerne les images verticales, SPOT est à la fois pénalisé par sa périodicité plus faible (tous les 26 jours contre tous les 16 jours pour Thematic mapper) et dans une moindre mesure par son heure de passage plus tardive.

En revanche, les possibilités de visée oblique font, entre autres, de SPOT un satellite permettant un suivi plus fréquent de l'observation de la terre ainsi que la prise en considération éventuelle de la stéréoscopie.

1.2) Collecte de données sur la morphologie urbaine (oct. - déc. 1986).

1.2.1) Objectifs.

L'objectif principal de cette première enquête réalisée à Quito est de recueillir une information précise sur l'occupation du sol dans un certain nombre d'îlots de Quito afin d'**initialiser** l'interprétation des images satellite devant servir de base de sondage à l'enquête démographique d'octobre-novembre 1987.

Cette enquête morphologique permettra de préciser la stratégie de sondage à mettre en oeuvre pour l'enquête démographique finale à Quito. En effet, les données morphologiques, exploitées conjointement avec les données démographiques recueillies au cours d'une seconde enquête (enquête "habitat-population", réalisée en avril 1987), permettent de répondre aux questions suivantes : **quels sont les descripteurs de la morphologie urbaine les plus pertinents pour l'observation démographique à Quito?** Quelles sont l'unité spatiale de collecte et la stratégie de sondage pertinentes pour une enquête démographique à Quito?

1.2.2) Sélection de l'échantillon.

Pour la sélection de l'échantillon de l'enquête morphologie comme pour toute l'expérimentation menée à Quito, nous n'utilisons que les documents de base susceptibles d'exister dans toute ville d'un pays en développement. C'est donc sur un plan de Quito¹ au 1/10.000 établi en 1982 non actualisé que nous avons réalisé la sélection de l'échantillon pour le recensement général de la population.

La technique d'échantillonnage a été des plus simples ; nous avons opté pour un tirage systématique sans remise sur grille plaquée sur le plan de Quito. Ayant fixé le taux de sondage à 5 % (résultat issu des travaux en sondages spatiaux réalisés par O. BARBARY sur Marseille), connaissant approximativement le nombre total d'îlots de Quito et la surface totale occupée par la ville, nous en avons déduit la taille moyenne d'un îlot (au sens "pâté de maisons") à Quito et la taille de la maille de la grille : 750 mètres de côté.

Nous avons ainsi constitué un échantillon de **199 îlots**, par tirage systématique sur plan (Figure couleur N° 4 du cahier annexe).

1.2.3) Les documents d'enquête.

Chaque îlot de l'échantillon est décrit par trois types de documents :

- **Carte** : sur le fond du plan de Quito agrandi au 1/500 sur lequel ne figurent au départ de l'enquête que les limites de chaque îlot à enquêter, les enquêteurs établissent la cartographie de l'occupation du sol de l'îlot. Tous les bâtiments ainsi que tous les éléments non bâtis doivent figurer sur ces plans.

- **Fiche de description des bâtiments** : chacun des édifices dessinés sur la carte est décrit sur cette fiche. Il est repéré par un numéro de 1 à n.

- **Photographies** : pour chaque îlot, les chercheurs de l'Orstom font des photographies depuis un point surplombant l'îlot (étage élevé d'un immeuble ou relief), et au sol, en bordure et/ou à l'intérieur de l'îlot. Ces photographies sont destinées à préciser et contrôler l'information recueillie par les enquêteurs.

1.3) Modification géométriques.

En fin de programmation d'acquisition, nous avons eu à notre disposition les scènes SPOT suivantes de niveau 1B

 Juin 86 : panchromatique et multispectral, parties Nord et Sud

¹ A cette époque compte tenu du lancement tardif du satellite, nous ne possédions pas encore d'image SPOT

Août 86 : panchromatique et multispectral, partie Nord

Novembre 86 : panchromatique, parties Nord et Sud
multispectral, partie Nord uniquement

ainsi qu'une image Thematic Mapper du 15 Septembre 86.

Les images SPOT obtenues sont de très bonne qualité radiométrique (Figure couleur N° 1 et 2 du cahier annexe), elles présentent une bonne dynamique (le panchromatique seuillé à 3% se situe entre 5 et 90). Cette dynamique est semblable sur toutes les images qui ne présentent que très faiblement l'effet "pyjama". Nous n'avons pas décelé de différence entre barrettes dans les canaux du multispectral. Les incertitudes sur la qualité de la cartographie dont nous disposons (une carte au 1/15.000 sans indication de la projection utilisée ni aucune coordonnées géographiques et une série de cartes au 1/1.000 dont l'intégration dans une base prendra du temps) ne nous ont pas permis de demander une rectification géométrique. Nous avons effectué un essai de concordance des deux images panchromatiques (Juin : 22° R et Novembre : 8° L) à l'aide d'un algorithme fondé sur un polynôme de déformation de degré 5 avec une centaine d'amers relevés manuellement. Le résultat est suffisamment satisfaisant, malgré les problèmes posés par la différence d'incidence pour mettre clairement en évidence un certain nombre de modifications de petite taille concernant directement le bâti. La Figure couleur N° 6 du cahier annexe est une composition colorée (Juin en bleu, Novembre en rouge). Elle fait apparaître très simplement en rouge vif toute construction nouvellement apparue en l'espace de six mois.

Un traitement d'ensemble est ensuite effectué sur les images enregistrées en Juin 86, seule date pour laquelle la totalité du site de Quito est couverte en panchromatique et multispectral. Le raccordement de deux scènes continues d'une même trace s'effectue par la mise en coïncidence des quelques 300 lignes communes. Les pré-traitements déjà effectués par SPOT IMAGE entraînent des différences radiométriques et géométriques sur cette partie commune. Ces différences sont suffisamment faibles pour être négligées (moins d'un pixel et moins de 5 comptes numériques). Nous avons extrait de ce rassemblement une fenêtre de 2000 colonnes sur 4000 lignes (20 X 40 Km) correspondant à la zone qui nous intéresse. La superposition entre le panchromatique et le multispectral de la même date laisse apparaître un décalage variant entre 0 et 15 pixels. La correction par un polynôme de degré 5 est tout à fait satisfaisante, moins d'un pixel de décalage (Figure couleur N° 3 du cahier annexe).

2) Premiers résultats sur les images SPOT de Quito (Juin et Novembre 1986).

Quatre directions de recherche ont guidé nos premières exploitations des images SPOT de Quito : délimitation et stratifications simples de l'agglomération, extraction des réseaux de voirie, classification des zones et analyse numérique des textures et structures des quartiers.

2.1) Stratification simple à partir des images traitées.

La première opération que nous avons réalisée concerne le tracé de la limite externe de la ville. Plusieurs documents photographiques réalisés à l'Atelier de télédétection de Bondy ont été utilisés pour parvenir à la délimitation finale¹:

- 2 images panchromatiques :

- Juin échelle 1/30 000 (2 tirages noir et blanc différemment contrastés afin de tenir compte de la dynamique entre les différents espaces non urbanisés).

- Août échelle 1/50 000 (2 tirages noir et blanc différemment contrastés)

- indice de végétation $(XS3-XS2)/(XS3+XS2)$ échelle 1/50 000 (2 tirages noir et blanc différemment contrastés)

- écart-type local (fenêtre 5*5) réalisé sur l'image panchromatique, photo couleur d'écran agrandie, échelle environ 1/60 000

- 1 indice de brillance $(XS3+XS2)$, photo couleur d'écran agrandie, échelle approximativement 1/60 000.

Les différentes limites obtenues indépendamment par deux interpréteurs ont été confrontées. Leurs tracés respectifs n'offrent pas de différences fondamentales. Une

¹ La chaîne de traitement a été définie en collaboration avec M. RAKOTO (ATOBI).

limite de "synthèse" a donc été retenue ; elle a été confortée par des contrôles sur le terrain.

La discrimination de la limite externe s'est faite pour l'essentiel sur l'image panchromatique brute , mais aussi sur l'image de l'indice de végétation et de l'écart-type local.

Le zonage à l'intérieur de l'espace urbain a été réalisé à partir d'une copie d'écran représentant une classification de la densité du bâti. Cette classification en 6 postes a été supervisée en fonction des statistiques descriptives calculées sur l'échantillon de 199 manzanas¹ précisément décrites et mesurées .

L'interprétation de cette classification, de pixels, a nécessité un important travail de zonage, non seulement en fonction de la valeur des pixels, mais surtout en fonction des **associations de valeurs** (de la texture) de l'image classée. En effet, il est aberrant de concevoir un indicateur de densité par pixel, et l'on doit tenir compte du voisinage *à fortiori* s'il s'agit d'effectuer un zonage dans l'optique d'une stratification de l'espace. Les plages de faibles surface n'ont donc pas été détournées. Ce zonage, pour lequel nous avons conservé les 6 postes initiaux a été effectué indépendamment par deux interpréteurs, puis reporté, après confrontation, sur le tirage panchromatique au 1/30.000 préalablement délimité.

Ces quelques exemples montrent l'intérêt des néo-canaux pour établir facilement des classifications simples de la ville, pertinentes pour notre objectif de stratification de l'espace urbain en vue d'une enquête démographique.

2. 2) Mise en évidence des réseaux de voirie - Labellisation des zones.

Pour faire apparaître les phénomènes urbains qui nous intéressent (la densité du bâti par exemple), nous avons constaté l'avantage, en site urbain, du traitement d'image satellite **dans des zones** par rapport à un traitement classique par pixel. Cet avantage nous est apparu lorsque nous avons travaillé sur les images Thematic Mapper de Marseille.

Il s'agit donc ici 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. Cette entité, le pâté de maisons, servira de base pour la définition des unités spatiales d'enquête. Pour parvenir à cet objectif, trois principaux problèmes doivent être résolus : l'extraction de la voirie, la reconstruction des contours (chaque zone devant impérativement être fermée), et la labellisation de toutes les zones.

Une multitude de méthodes existent pour détecter puis extraire des contours sur une image. La morphologie mathématique, en teintes de gris sur image en trame carrée, d'un développement récent, offre des chaînes de traitements rapides et d'une mise en oeuvre aisée, ce qui n'est pas toujours le cas des méthodes plus classiques (gradient par exemple).

2.2.1) 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 très faible (XS3 et Panchromatique),
- leur finesse spatiale,
- leur configuration linéaire (suite de pixels connexes).

Nous avons travaillé sur une image résultant de la somme du Panchromatique et du proche infra-rouge afin de bénéficier de la résolution spatiale optimum et du pouvoir discriminant du canal (XS3). Les opérations suivantes représentent les différentes étapes à mettre en oeuvre :

- Transformation "chapeau haut de forme" :
("fermeture" de l'image, soustraction de l'image origine à l'image "fermée")
- Seuillage. La valeur du seuil influe de façon considérable sur le résultat. La valeur optimale de ce seuil correspondant à la valeur pour laquelle nous conservons un maximum d'éléments linéaires et un minimum de pixels isolés.
- Amincissement par itérations successives

¹ Pâté de maisons entouré par un réseau de voirie

Ce qui nous intéresse ici, ce n'est pas de conserver une information sur l'importance (largeur) de la chaussée, mais d'extraire un élément de contour à partir d'éléments de la voirie.

- Suppression des pixels isolés
- Fermeture des contours

La méthode préconisée par [MILGRAM et al, 1986]¹, paraît adaptée à notre cas bien qu'un grand nombre de points "selle"² apparaissent. Elle comprend deux étapes :

- 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.

- Suppression des zones contenant un seul pixel.
- Ebarbulage (suppression des linéaments ne délimitant pas au moins une zone). Ce traitement n'a pas été réitéré jusqu'à idempotence (Figure couleur N° 5 du cahier annexe).

2.2.2) Labellisation des zones.

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.

2.2.3) Classification des zones.

La classification retenue est de type barycentrique. Nous avons donc classé les zones en fonction de leur moyenne radiométrique dans les 4 canaux initiaux ainsi que dans 3 néo-canaux : indice de végétation, indice de brillance et écart-type local calculé sur le panchromatique. (fenêtre 5*5). Cette classification a été initialisée sur 6 classes (du non bâti au très dense) à partir des 199 manzanas de l'échantillon (Figure couleur N° 7 du cahier annexe).

2.2.4) Conclusions.

La comparaison d'une partie de l'image SPOT traitée et d'un extrait de carte initialement à l'échelle 1/15 000 indique clairement que le problème à résoudre est prioritairement 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. 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 permet d'affirmer que si la méthode visuelle permet de n'extraire que les éléments de voirie et de constituer ainsi des éléments linéaires continus, elle ne permet pas de les extraire tous.

2.3. Analyse numérique des textures et structures des quartiers.

Pour ce troisième type d'exploitation des images SPOT de Quito, la question était la suivante : comment, numériquement, caractériser et stratifier les quartiers de Quito en fonction de leurs textures et structures.

2.3.1) Choix de l'échantillon-test.

L'échantillon-test est composé de 65 imagettes carrées et de taille fixe (64 pixels), réparties sur l'ensemble de l'image SPOT de Quito du 26 novembre 1986.

Le choix des imagettes de l'échantillon a répondu essentiellement à trois critères :

- une répartition spatiale aussi large que possible, de façon à couvrir l'ensemble des réalités urbaines,
- une homogénéité visuelle de la zone,

¹ MILGRAM M. et COQUERET J.P., 1986. Fermeture des contours par un opérateur local. Traitement du signal, Vol 3, n° 6, pp. 302-311.

² Nouveaux points contour apparu à l'issue de l'algorithme de reconstruction.

- dans la mesure du possible, une correspondance avec les flots de l'enquête Morphologie (octobre-décembre 1986), pour la caractérisation géographique.

2.3.2) Etude de la texture : les matrices de cooccurrence en niveaux de gris.

Le choix des matrices de cooccurrence pour caractériser la texture à l'intérieur de zones homogènes a été guidé par deux raisons majeures :

- c'est une des seules méthodes permettant de quantifier de manière synthétique et rapide la texture à l'intérieur d'une zone pré-définie ;
- cette méthode privilégie une approche stochastique qui paraît bien adaptée au type de texture des images satellite.

Le programme de calcul des matrices de cooccurrence développé à l'ATOB a donc été appliqué aux 65 zones composant l'échantillon de Quito; pour chacune de ces zones, ont été produits 5 paramètres caractérisant la matrice de cooccurrence (centre de gravité de la matrice, moment angulaire du second ordre, degré d'organisation du nuage, homogénéité locale, inertie). La relation spatiale retenue est la suivante : distance entre deux pixels égale à 1, angle égal à 0°.

Une Analyse en Composantes Principales sur ces paramètres a mis en évidence une assez grande corrélation des paramètres entre eux, la primatie de l'entropie et du second moment angulaire, des regroupements d'individus, selon leur position sur le premier plan factoriel.

La classification de type nuées dynamiques a ainsi permis de dégager quatre grands groupes de texture qui rassemblent des quartiers à paysage urbain assez homogène :

- Groupe 1 : texture "lisse", milieux rural et "pré-urbain"¹
- Groupe 2 : texture "ponctuée", urbanisation faible à moyenne
- Groupe 3 : texture "grenue", urbanisation moyenne à forte
- Groupe 4 : texture "rugueuse", urbanisation dense.

Non seulement cette méthode permet de discriminer l'urbain et le non-urbain, mais elle autorise aussi des partitions de l'espace urbanisé.

2.3.3) Analyse de la structure : la Transformée de Fourier.

Après avoir analysé les spectres correspondant à des images élémentaires symbolisant le réseau de voirie d'une ville et l'habitat, nous sommes passés à l'analyse des situations réelles rencontrées à Quito, en appliquant aux 65 images de l'échantillon le programme informatique développé sur MINI 6 par M. RAKOTO (ATOB).

Au sein des 65 zones-test, une première grande division apparaît : l'absence de structure (24 cas) et la présence de structures (41 cas). Dans ce second ensemble, la mesure des rayons des spectres définit trois grands groupes :

- Groupe 1 : structures faibles, rayons de 3 à 6 unités (9 cas)
- Groupe 2 : structures moyennes, rayon de 6 à 9 unités (20 cas)
- Groupe 3 : structures fortes, rayons de 9 à 16 unités (12 cas)

La richesse de l'information d'une image panchromatique SPOT en milieu urbain générant sur le spectre un bruit nuisible à son interprétation, nous avons testé plusieurs méthodes d'amélioration de la méthode de Fourier : simplification de l'image par seuillage en 4 niveaux de gris, paramétrage des spectres (distance au centre, et hauteur des pics) et Transformée de Fourier inverse.

Avec un outil aussi simple que la distance des pics au centre, nous avons réussi à dégager trois grandes catégories de quartiers, et établir une hiérarchie des structures de quartiers par double classement sur les réseaux secondaires. Il convient toutefois de rappeler le caractère particulier des structures mises en évidence par cette méthode : structures à éléments périodiques ou pour le moins réguliers.

¹ Les associations de constructions, même de petite taille, sont décelables sur le canal panchromatique SPOT et révèlent l'imminence de la colonisation urbaine.

2.3.4) Caractérisation structurale et texturale.

Le Tableau suivant montre l'existence d'une certaine cohérence entre les résultats des deux analyses, texturale et structurale : bien que demeurent un certain nombre d'imprécisions, aucune contradiction flagrante n'apparaît. Compte tenu de la très grande réduction d'information opérée lors de la caractérisation des spectres, il s'agit là d'un résultat satisfaisant.

CLASSIFICATION selon la texture - Les cooccurrences -

	1	2	3	4
1	- Environnement naturel - Trace d'exploitation	- Trame à structure faible	- Environnement rural - Trame de voirie pré-urbaine	- Voirie haute
2	- Mitage diffus habitat dispersé	- Parcellaire mité	- Mitage par noyaux - En voie d'urbanisation	
3	- Habitat dense individuel récent - Constructions utilitaires		- Bâti continue de banlieues anciennes ou dégradées	
4	- Proche centre ville	- Quartiers résidentiel ancien - Quartier des affaires	- Habitat individuel aisé ou mixte proche	- Vivienda du centre ville
			- centre ville	

2.3.5) Conclusions.

Malgré une utilisation des outils assez rudimentaires, cette méthode semble donc intéressante pour caractériser certains aspects de la morphologie urbaine. La transformée de Fourier ne peut cependant convenir que pour la caractérisation des structures de certains quartiers, et non pour l'analyse de structures complexes.

Conclusion générale.

Les résultats que nous présentons ici sont des **résultats intermédiaires**, dont l'évaluation précise est actuellement en cours de réalisation. Ils semblent prometteurs et pourront être améliorés par une meilleure efficacité de certains outils :

- la rectification géométrique tenant compte des altitudes et pentes grâce à un modèle numérique de terrain,
- des algorithmes d'extraction de contours plus performants
- une paramétrisation précise des spectres de Fourier

La finesse de la typologie de l'espace urbain que l'on peut d'ores et déjà extraire de l'analyse des images SPOT peut être améliorée en intégrant pour chacune des différentes **entités spatiales** :

- une caractérisation fine de la radiométrie et de la texture (à l'aide de quantiles par exemple),
- une caractérisation topologique (forme et distribution spatiale des bâtiments, etc...)

L'intégration de ces nombreuses données (plus des informations exogènes) dans un **système d'information géographique** paraît indispensable, ainsi que l'appel à l'**intelligence artificielle** afin de gérer efficacement et rapidement l'ensemble de toutes ces informations.

PUBLICATIONS ET NOTES DE TRAVAIL DE L'EQUIPE ORSTOM

(peuvent être consultés à l'ORSTOM, documentation ATOB, 70-74 Route d'Aulnay, 93140 Bondy, FRANCE, ou à la mission ORSTOM de Quito, EQUATEUR)

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 (en cours d'édition), 10 p. + photos.

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. Informatica, teledeteccion y observacion de las poblaciones urbanas. Una investigacion vigente en Quito (ECUADOR). Communication à la Primera Conferencia Latinoamericana sobre informatica en geografia, San José, Costa Rica, 5-9 Octobre 1987.

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.

SEGMENTATION ET CLASSIFICATION D'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, Atelier 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 inform 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 comparaison with 1/2000 digitalized maps.

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

INTRODUCTION

L'objectif général assigné au programme de recherche¹ 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, par sondage, des données relatives aux populations urbaines. Les travaux réalisés (par M. VERNIERE notamment) sur photographies aériennes ont montré l'efficacité de ce principe. 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. BARBARY² 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 Marseille³. 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

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

² Voir Bibliographie, notes de travail d'O. BARBARY

³ Voir Bibliographie équipe ORSTOM

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 ne numérisons donc pas les différents pâtés de maisons. C'est justement cette entité, le pâté de maisons, qui servira 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. Pour parvenir à cet objectif, deux grands problèmes doivent être résolus :

- l'extraction de la voirie,
- la reconstruction des contours (réseaux de voirie), chaque zone devant impérativement être fermée.

L'étape finale de notre travail consiste ensuite à

- labelliser toutes les zones ainsi obtenues,
- classer l'ensemble de ces zones 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

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 en 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.

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 IS3) afin de bénéficier de la résolution spatiale optimum (panchromatique) et du pouvoir discriminant de la radiométrie infra-rouge (canal IS3).

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 une vallée profonde (il possède une très faible valeur) et de faible amplitude (les réseaux ne sont pas larges d'un

point de vue spatial). Il s'agit donc de ne conserver que 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 cohérentes.

. 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 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

Ce qui nous intéresse ici, ce n'est pas de conserver une information sur l'importance (largeur) de la chaussée, mais d'extraire un élément de contour à partir d'éléments de la voirie. Or, l'image que nous avons obtenue à l'issue de ces traitements simples apparaît comme peu exploitable car trop bruitée. 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'intrompt 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. Cela revient à réaliser un squelette classique des éléments linéaires par amincissement successif.

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 de 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 initialisée 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 qui a été testée sur une 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. Nous l'avons générée sur une imagerie (900*700), en raison d'impératifs liés au matériel (taille limitée des tableaux en mémoire), située au centre de notre image d'essai.

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

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+IS) 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 base de données sur Quito, 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 couverture à l'échelle 1/1 000 de la ville de Quito a été achevée par l'IGM¹ en 1984 sur la base de photographies aériennes. 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 dans un autre but, il a été décidé de saisir non pas uniquement la voirie, mais plus précisément les

¹Instituto Geografico Militar

zones de recensement INEC¹. 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 des zones du document INEC initial (l'échelle 1/10 000) aux 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.

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

La saisie des 4 feuilles a été effectuée à l'aide du logiciel *MapLe*². Le recalage des 4 feuilles saisies (module *Pages* du système *Servus*³) entre eux s'est effectué à partir des coordonnées géographiques des 8 amers (2 par feuille) sur la base d'une projection de type cylindrique. Le tracé de vérification fait apparaître un léger décalage entre les feuilles haut-droit et bas-droit qui n'a pu être réduit. Il semble être imputable à un glissement lors de la saisie d'une des deux cartes.

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-traduction 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

¹ Instituto Nacional de Planificación y Coordinación Económica.

² Logiciel de saisie développé à l'Atelier d'Infographie de l'ORSTOM.

³ Système d'information géographique développé à l'Atelier d'Infographie de l'ORSTOM.

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 $ax^3 + bx^3 + cx^2y + dxy^2 + ey^2 + fx^2 + gxy + hx + iy + j$ ne nécessite que la connaissance de 11 amers. 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, composition colorée effectuée en affectant la couleur rouge à l'image de la carte numérisée et la couleur bleue à l'image SPOT panchromatique illustre la qualité ainsi que la non uniformité du recalage. En première approche, on peut dire que le bleu 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 recalé 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 (composition colorée rouge : 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
- rouge : 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 reflectants. Une rue bordant une forêt (élément peu reflectant 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 BÂTI

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

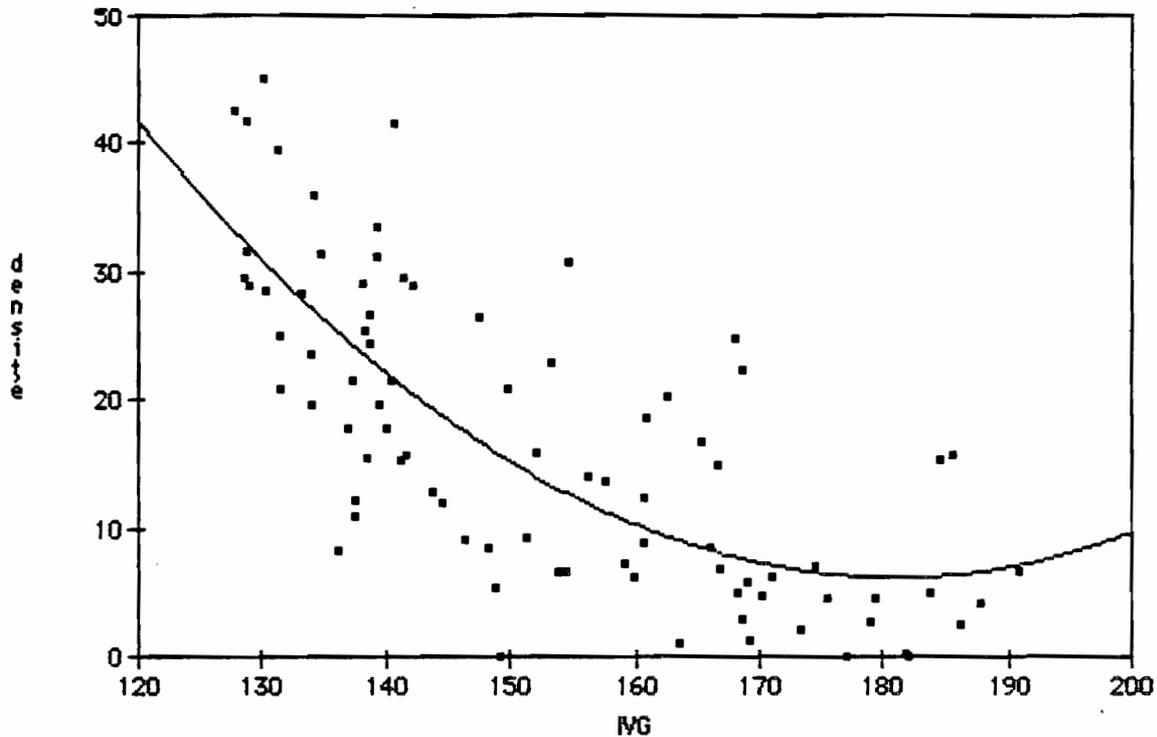
- un sous-échantillon d'initialisation (87 îlots),
- un sous-échantillon de vérification (86 îlots)

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

3.1) Régression polynomiale

À 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 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 :

CANAL	CORRELATION	ECART-TYPE résiduel	S.C.E résiduelle	F FISHER
IVG	-.751	7.8	4928	52.39
BATI = 0.01*IVG² -3.47*IVG + 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 sur l'image un lissage majoritaire conditionnel. 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 classés 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 et la référence très faible (14%), d'autre part entre la classe moyenne et la référence faible.

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-définie. 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 Marseille¹, 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 (IVG), 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 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
IVG	1,74	1,45
IBR	-28,87	-6,78
ECT	-0,02	0,97

À la lecture de ce tableau, il apparaît que 3 canaux jouent 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	classe1	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)

¹Voir bibliographie équipe ORSTOM.

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'initialisé

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 MAGAO 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*. 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.

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, & 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.
- SALMERON E., 1986 - Mise en coïncidence automatique des contours extraits d'images aériennes et d'éléments cartographiques, Thèse de 3^{ième} cycle, Université Technologique de Compiègne, 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.U 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 XI^e 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 Simposio 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 : principes 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.

Littérature grise non publiée

Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1986. - Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport intermédiaire - Avril 1986. Paris, 190 p.

Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1987. - Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport final - Août 1987. Paris, 53p.+538 p.

BARBARY O., 1986. - Apport d'une stratification morphologique des districts INSEE de recensement dans l'estimation par sondage des effectifs de population à Marseille. QUITO, 47 p.

DUREAU F. et MICHEL A., 1986. - QUITO : enquête morphologie urbaine. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). QUITO, 19 p.

EBERHARD J.M., 1987 - Télédétection urbaine : éléments de caractérisation géographique des quartiers de QUITO à l'aide d'une image SPOT. Mémoire de DEA, EHESS, 98p.

MICHEL A., 1986. - Le point sur la télédétection urbaine en 1986 à travers la bibliographie française et anglo-saxonne sur le sujet. Recueil des fiches de dépouillement des articles et ouvrages. ORSTOM, 49p.

MICHEL A., 1987. - Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution : étude statistique du descripteur "densité du bâti", présentation des classifications. (Image TM Marseille 1983). Paris, 99 p.

MICHEL A., 1987. - Influence des facteurs météorologiques sur la probabilité d'obtention d'une image satellite SPOT ou Thematic Mapper. Etude sur le site de QUITO, QUITO 14 p.

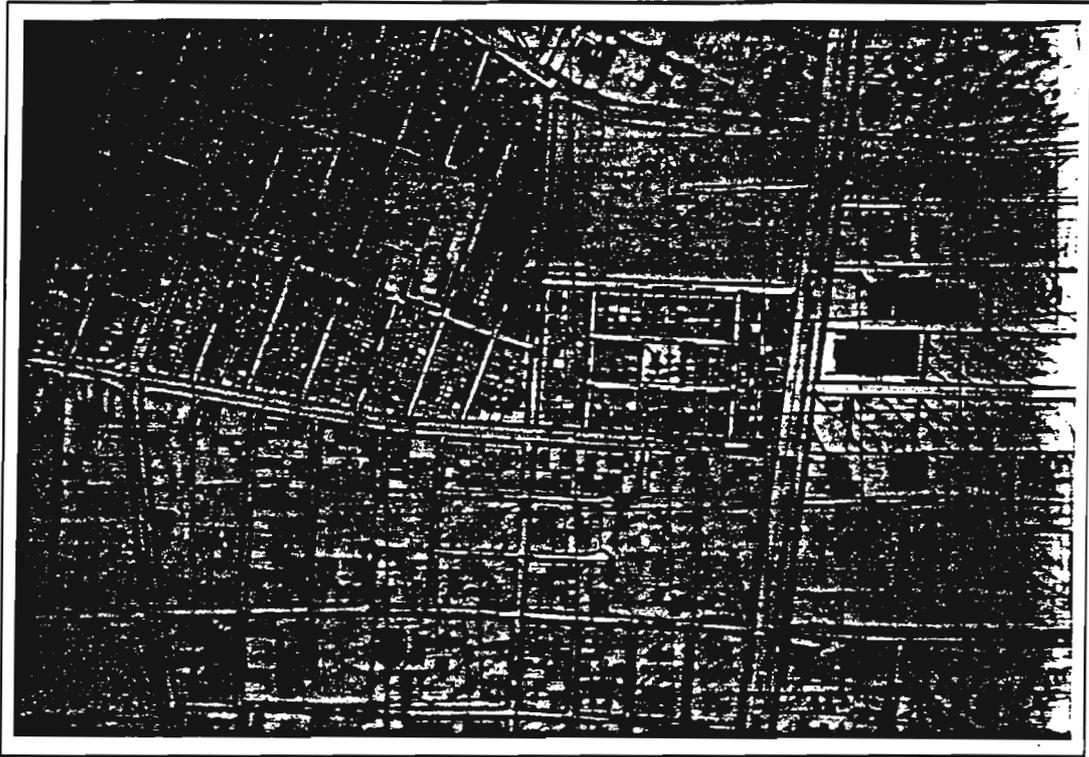


Figure 1: Assemblage de cartes au 1/2 000



Figure 2 : Image générée à partir des 4 cartes

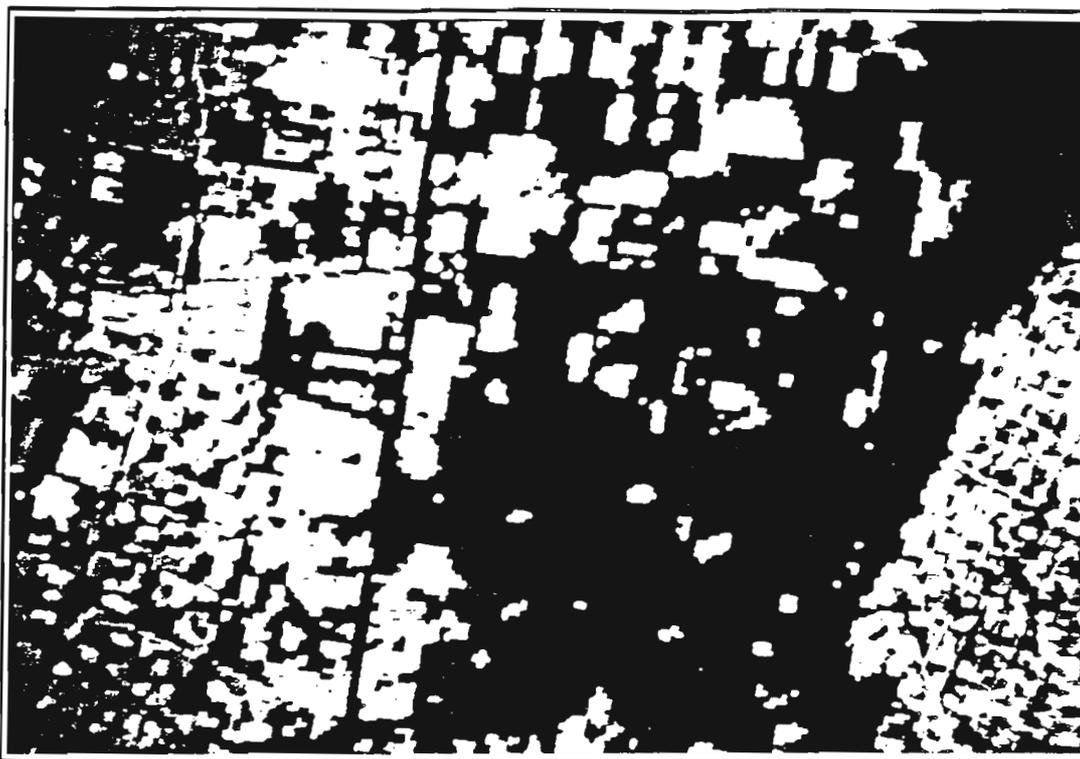


Figure 3 : Composition colorée

rouge : image de la carte numérisée
bleu : image panchromatique SPOT

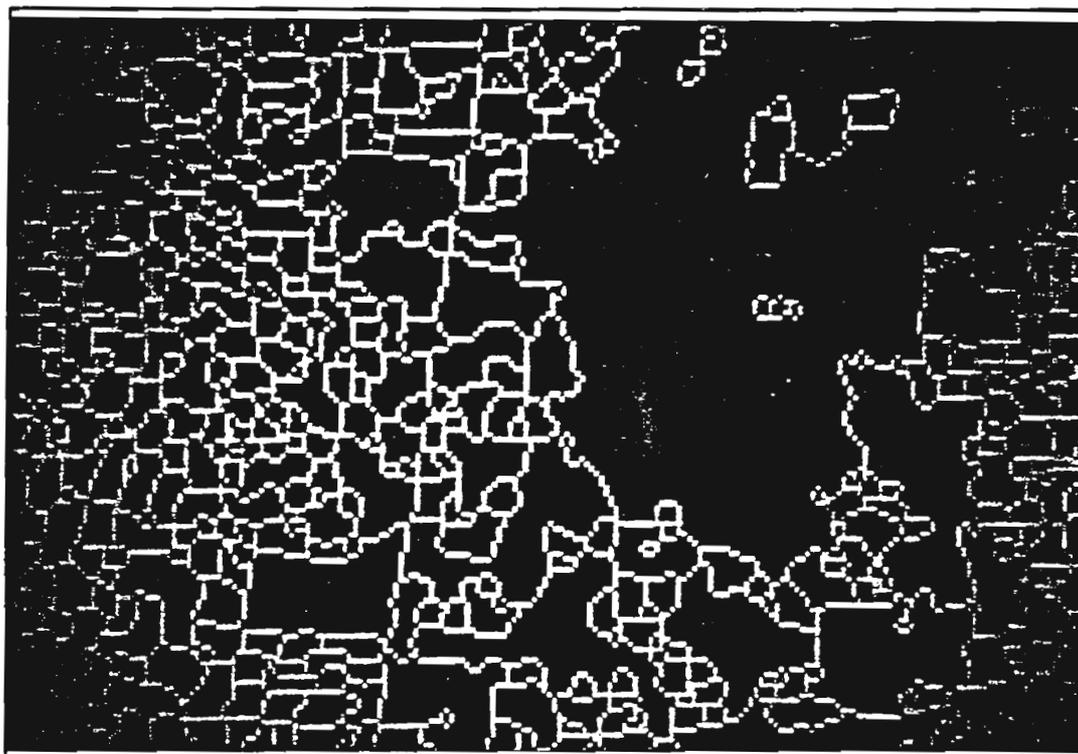


Figure 4 : Composition colorée

vert : extraction automatique de la voirie
rouge : image panchromatique SPOT



Figure 5 : Composition colorée bleu : réseau numérisé
vert : extraction de la voirie
rouge : panchromatique SPOT



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

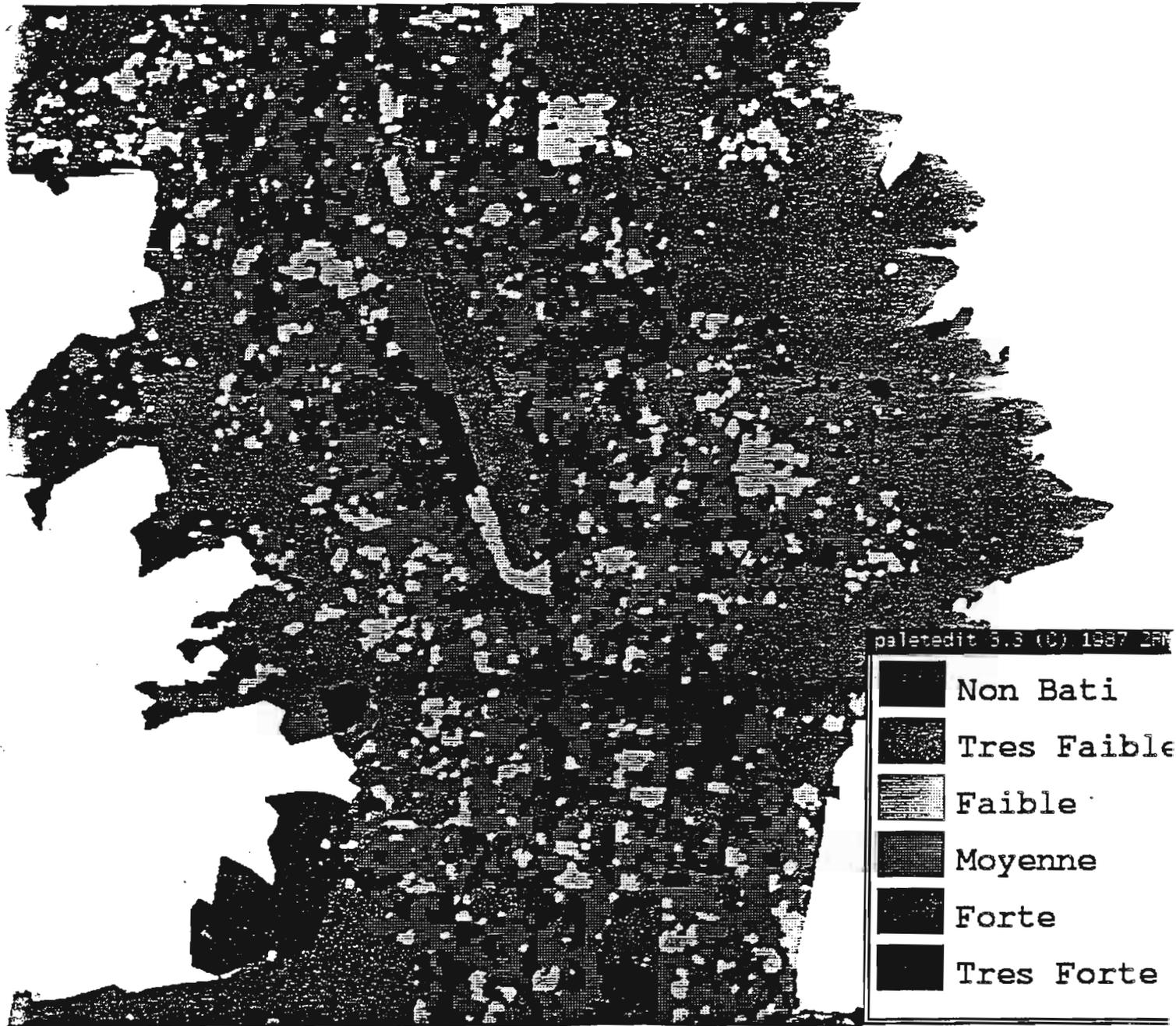


Figure 7 : Classification des zones après lissage conditionnel
Seuillage de la régression polynomiale

Logiciel de traitement d'image : PLANETE de l'Atelier de Télédétection
de l'ORSTOM à Bondy

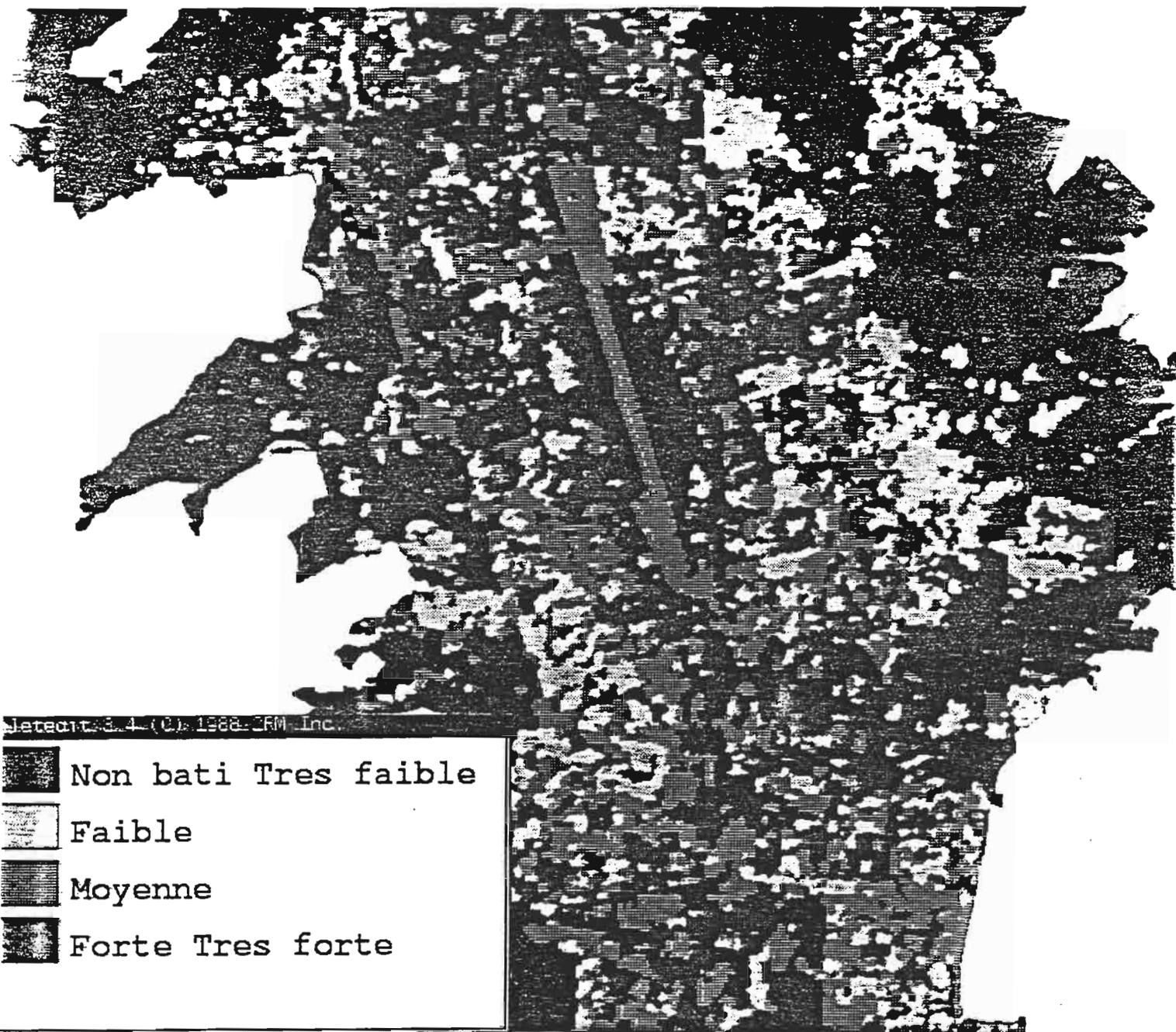


Figure 8 : Classification des zones après lissage conditionnel
à partir des néo-canaux discriminants

Logiciel de traitement d'image : PLANETE de l'Atelier de Télédétection
de l'ORSTOM à Bondy

