

## UTILISER LA TELEDETECTION SPATIALE POUR OBSERVER LES POPULATIONS CITADINES

---

Françoise DUREAU

Géographe-démographe, ORSTOM, Département SUD, U.R. 5E

Rythmes, caractéristiques de l'urbanisation, modes de résidence des habitants et déficience des éléments de connaissance classiques, tels que cartes, plans cadastraux, ou fichiers administratifs, contribuent à rendre particulièrement difficile l'observation des populations citadines des pays en développement.

Les instruments traditionnels de l'observation socio-démographique, recensements exhaustifs et enquêtes par sondage probabiliste, se révèlent difficiles à mettre en oeuvre et ne satisfont pas correctement les besoins de la recherche ni de la gestion urbaine. Le coût de la collecte et les durées d'exploitation des recensements limitent leur périodicité à un rythme d'environ dix ans, insuffisant pour un suivi de populations urbaines à croissance rapide ; quant aux enquêtes par sondage, l'absence de base de sondage complète et à jour hypothèque souvent leur réalisation et leur fiabilité, déjà affectée par l'emploi de concepts peu adaptés à l'observation des réalités locales en matière de résidence et d'activité.

Face à ce constat, il nous a paru nécessaire de tenter d'améliorer l'observation des populations citadines, en développant une nouvelle méthode de collecte de données démographiques adaptée aux spécificités des villes des pays en développement. 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<sup>1</sup>, on peut utiliser avec profit l'information exhaustive sur la morphologie urbaine

---

1 Une synthèse des expériences d'utilisation de photographies aériennes pour produire des données démographiques est présentée dans le premier chapitre de l'article : "Pour une méthode de collecte démographique en ville intégrant la télédétection spatiale", DUREAU F. et BARBARY O., 1987, collection Informatique et Sciences Humaines, EHESS, 42 p.

pour recueillir rapidement, par sondage, des données relatives aux populations urbaines.

Dans cette perspective, le Département D (Urbanisation et socio-systèmes urbains) de l'ORSTOM a donc initié en 1985 un programme de recherche<sup>1</sup> dont l'objectif central était de *développer une méthode de collecte de données démographiques en milieu urbain intégrant l'information apportée par les satellites à haute résolution sur la morphologie urbaine, adaptée aux caractéristiques de l'urbanisation dans les pays en développement et aux contextes locaux d'information, d'équipement, de moyens humains et financiers.*

A l'issue de deux années de développement méthodologique mené sur les villes de Marseille (FRANCE) et Quito (EQUATEUR), nous avons pu réaliser la première application en vraie grandeur de notre méthode de collecte : au cours du dernier trimestre 1987, nous avons effectué une enquête démographique par sondage, sur un échantillon d'îlots tiré sur une image satellite SPOT de Quito. Cette enquête a confirmé l'intérêt de la méthode développée et permis d'évaluer tant son niveau de précision que les coûts qu'impliquent sa mise en oeuvre.

Les recherches ont été menées par une équipe pluridisciplinaire, réunissant des compétences en démographie, statistique, télédétection et urbanisme, composée de :

BARBARY O., statisticien, ex-allocataire de recherche MRT (1985-1988), ORSTOM, SUD, U.R. 5E

DUREAU F., géographe-démographe, responsable du programme de recherche, ORSTOM, SUD, U.R. 5E

LORTIC B., ingénieur télédétection, ORSTOM, SUD, U.R. 5F

MICHEL A., urbaniste spécialisé en télédétection, ex-allocataire MRT (1985-1988).

Ont également participé à certaines phases des travaux :

M. SOURIS et F. PELLETIER (infographie),

A. AING et I. RANNOU (traitements photographiques).

---

<sup>1</sup> La définition du programme de recherche est exposée dans : DUREAU F. et GUILLAUME A., 1984. "De l'usage de la télédétection pour l'observation socio-démographique en milieu urbain tropical". ORSTOM, Bulletin du Département D, n° 10, pp. 8-15.

C'est à la présentation du programme de recherche, des hypothèses qui le sous-tendent, des travaux effectués et des résultats obtenus qu'est consacré cet article <sup>1</sup>.

Utiliser la morphologie urbaine comme vecteur de l'observation démographique en ville n'est pas une pratique nouvelle. Par contre, l'utilisation de la télédétection spatiale à des fins de sondage pour des enquêtes démographiques en ville nécessitait des recherches approfondies dans plusieurs directions de recherche : nous décrirons ces travaux avant d'aborder la présentation et l'évaluation des principaux résultats.

## 1. HYPOTHESES ET OBJECTIFS

### 1.1. PROBLEMES POSES PAR LA PRODUCTION D'INFORMATION SUR LES POPULATIONS DES VILLES A CROISSANCE RAPIDE DES PAYS EN DEVELOPPEMENT

Pour produire des informations sur les populations, le démographe dispose de deux techniques de collecte des données : le recensement, exhaustif, et l'enquête par sondage, où n'est observée qu'une partie de la population, appelée échantillon.

Les *recensements exhaustifs* exigent des moyens techniques, financiers et humains considérables qui interdisent une périodicité inférieure à une dizaine d'années et conduisent à une réduction importante de l'information recueillie lors de chaque opération de collecte.

De plus, le temps nécessaire à leur exploitation rend souvent les résultats caducs dès leur parution pour des villes dont les taux de croissance peuvent dépasser 10 % par an. L'absence de cartographie de base dans nombre de villes, principalement dans les zones d'extension récente, et les problèmes de suivi de la masse d'enquêteurs que réclame ce type d'opération ont des répercussions importantes sur la qualité des résultats.

---

1 Pour plus de détail sur les résultats fondamentaux obtenus dans chacun des domaines de la recherche, le lecteur se reportera aux rapports scientifiques intermédiaires et aux thèses cités à la fin de cet article. Ces différents textes ont servi de base à la rédaction du présent article, qui intègre certains paragraphes des écrits présentant les résultats de chacun des chercheurs ayant participé au programme.

Enfin, l'ampleur des moyens à mettre en oeuvre pour un recensement conduit à une sous-exploitation des données recueillies exhaustivement. Pour alléger l'exploitation de l'information collectée, on ne réalise souvent qu'une exploitation par sondage des questionnaires, ou d'une partie seulement des variables du questionnaire, et ne sont publiés que les résultats globaux sur l'ensemble de la ville : la principale qualité des recensements, l'exhaustivité, qui permet théoriquement d'obtenir des résultats pour tout type de découpage géographique, est remise en cause par une exploitation partielle de l'information recueillie.

Basées sur l'observation de la seule fraction de la population composant l'échantillon, les *enquêtes par sondage* présentent comme intérêt de réduire les moyens financiers et humains à mobiliser, et d'assurer une meilleure qualité de la collecte, par des enquêteurs moins nombreux et mieux encadrés, qui recueillent des informations plus riches que celles autorisées dans le cadre d'un recensement.

Mais, dans de nombreuses villes des pays en développement, un facteur essentiel fait défaut pour procéder à la sélection de l'échantillon à enquêter : une base de sondage complète et à jour (c'est à dire actualisée, sans omission ni répétition), condition sine qua non de tout tirage d'échantillon statistiquement représentatif. Cette information n'est quasiment jamais disponible dans les villes du Tiers-Monde où les documents cartographiques sont rares et anciens. L'actualisation par de nouveaux relevés de terrain d'une base cartographique vieillie est souvent problématique dans un tissu urbain affecté de modifications rapides. Trop souvent, l'attention portée à l'actualisation de la cartographie reste très en dessous de celle réclamée par ces travaux et entraîne des biais importants.

D'autre part, les plans de sondage classiques interdisent généralement toute spatialisation des résultats puisqu'ils n'intègrent quasiment jamais une stratification spatiale de la ville enquêtée : les résultats obtenus ne permettent donc pas de connaître les différences internes à la ville en matière de densité de population, ou de composition démographique ou socio-économique. C'est pourtant un élément essentiel de connaissance tant pour les gestionnaires de la ville que pour les chercheurs.

Dans villes des pays en développement, déficience de l'information cartographique de base et modalités de l'urbanisation se conjuguent pour rendre peu efficaces les techniques classiques de collecte des données démographiques : dans un tel contexte, celles-ci ne permettent pas de réaliser dans de bonnes conditions une observation *suivie* et *spatialisée*

des populations citadines. Que proposer pour tenter d'améliorer l'observation des populations citadines du Tiers-Monde ?

## 1.2. UTILISER LA MORPHOLOGIE URBAINE POUR ESTIMER LES POPULATIONS CITADINES : UNE METHODE DEJA ANCIENNE PRATIQUEE SUR PHOTOGRAPHIES AERIENNES

Viser une amélioration des recensements exhaustifs offre peu d'intérêt, puisque ceux-ci demeureront toujours trop longs à mettre en oeuvre et à exploiter ; il apparaît certain que *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.*

Dans ce cadre, *une meilleure connaissance de l'espace intra-urbain peut être un élément fondamental d'amélioration des techniques d'enquête par sondage.* D'une part, une bonne connaissance cartographique permet de disposer d'une base de sondage de qualité, composée d'îlots précisément identifiés ; d'autre part, une bonne connaissance de la morphologie urbaine permet de stratifier la ville en augmentant sensiblement le gain de précision qu'introduit toute stratification, et d'obtenir des résultats selon un découpage spatial significatif de la ville enquêtée.

C'est ce type de raisonnement qu'a mené VERNIERE, puis les différents bureaux d'étude qui ont appliqué les méthodes de production de données démographiques à partir de photographies aériennes : dans le cas des pays africains disposant de couvertures aériennes mais manquant de données démographiques, ces méthodes ont trouvé un champ d'application privilégié.

En effet, depuis les années trente, des chercheurs étudiant le milieu urbain se sont intéressés aux relations entre les caractéristiques morphologiques des résidences et les caractéristiques démographiques et socio-économiques des habitants : les travaux des américains tels que KENZIE ou PARK ont reçu un écho certain en France, où se sont développées à partir des années cinquante des études sur le même thème (CHOMBART DE LAUWE).

La mise en évidence des relations entre la morphologie urbaine et les caractéristiques de la population citadine établies par ces travaux ont été à l'origine du développement de méthodes d'estimation de population à partir de l'information sur l'occupation du sol apportée par les photographies aériennes.

Ainsi, depuis trente ans environ, ont été accumulées de nombreuses expériences d'utilisation de la morphologie urbaine pour la production rapide de données démographiques. Les niveaux d'utilisation de la morphologie urbaine sont variés : depuis les méthodes les plus globales, ne retenant de la morphologie urbaine que la surface urbanisée, aux méthodes détaillées reposant sur des comptages de logement, en passant par les méthodes semi-globales, basées sur les typologies de quartiers. Ces méthodes, pour la plupart mises au point par des scientifiques travaillant sur des villes de pays développés, ont trouvé depuis la fin des années soixante un écho certain parmi les urbanistes opérant dans des villes des pays en développement, où elles ont aussi fait la preuve de leur efficacité.

### **1.3. DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES AUX IMAGES SATELLITE A HAUTE RESOLUTION**

Le recours aux photographies aériennes sur les centres urbains des pays en développement devient de plus en plus problématique. En effet, les couvertures aériennes des villes de ces pays sont de plus en plus rares en raison de l'ampleur des moyens qu'elles réclament et de la priorité souvent donnée au milieu rural : dans ces villes, la répétitivité de l'observation aérienne devient une réalité de moins en moins effective. Il devient donc difficile d'employer les techniques de production de données démographiques basées sur l'emploi de photographies aériennes.

Cependant, jusqu'au milieu des années quatre-vingt, rares sont les expériences d'utilisation des images satellite pour la production de données démographiques : à partir de notre recherche bibliographique, en 1985, nous avons eu connaissance que de cinq applications, toutes basées sur la méthode globale d'estimation de la population totale d'une ville à partir de la superficie urbanisée mesurée sur image satellite, LANDSAT dans la plupart des cas.

Cet état de fait est directement lié au degré de résolution des images LANDSAT (80 m x 80 m), seules disponibles jusqu'en 1985 : cette résolution insuffisante a freiné l'utilisation de l'imagerie satellitaire en milieu urbain, caractérisé par une forte hétérogénéité et une faible dimension des éléments constitutants. Avec l'imagerie LANDSAT, il n'était pas envisageable d'observer les différenciations morphologiques internes à la ville, et donc d'appliquer d'autres méthodes de production de données démographiques que les méthodes globales reliant population et surface de la ville.

La mise en service de nouveaux satellites au milieu des années quatre-vingt change largement la situation de la télédétection appliquée au milieu urbain : SPOT et TM ont une résolution suffisante (respectivement 10 / 20 mètres, et 30 mètres) pour observer assez finement le tissu urbain. Il devient alors possible de faire profiter le milieu urbain des atouts des images satellites, notamment : exhaustivité spatiale, coût raisonnable (environ 10 fois moins que les photographies aériennes), caractère numérique des données, richesse de l'information enregistrée, avec possibilité de vision stéréoscopique (SPOT).

Il nous a donc semblé intéressant de *tester les possibilités de mise en oeuvre de méthodes d'observation démographique intégrant les données morphologiques observables sur image satellite*, afin de tenter d'apporter des éléments de solution aux carences de l'observation démographique classique ou par photographies aériennes. Il s'agissait de tirer parti des qualités des images satellite en s'appuyant sur l'acquis méthodologique constitué par les travaux antérieurs de production de données démographiques à partir de photographies aériennes.

L'idée centrale restait la même que pour les photographies aériennes : utiliser l'information exhaustive sur la morphologie urbaine apportée par les images satellite pour recueillir rapidement, par sondage, les données relatives aux populations urbaines. Il s'agissait *d'utiliser l'image satellite comme base de sondage et d'exploiter l'information morphologique sur le milieu urbain que fournit l'image pour stratifier un plan de sondage spatial* applicable à une enquête démographique.

L'utilisation d'une image satellite comme base de sondage reposait sur deux hypothèses :

- il est possible d'extraire d'une image SPOT ou TM les limites d'une agglomération urbaine ;
- on peut sélectionner sur une image satellite un échantillon d'unités spatiales.

Quant à l'utilisation d'une image en matière de stratification, elle reposait sur les deux idées suivantes :

- il existe certaines relations entre caractéristiques morphologiques du milieu urbain et caractéristiques démographiques et socio-économiques des habitants ;
- on peut identifier sur des images SPOT ou TM des caractéristiques morphologiques pertinentes pour l'observation démographique.

Autant d'hypothèses qu'il importait de vérifier et de développer : nous allons voir maintenant quels furent la démarche adoptée et les travaux réalisés dans cette perspective.

## 2. CONCEPTION GENERALE ET REALISATION DU PROGRAMME DE RECHERCHE

### 2.1. CONCEPTION GENERALE DU PROGRAMME : UN DOUBLE SOUCI D'OPERATIONNALITE ET DE VALIDATION DE LA METHODE

Au moment du démarrage de notre programme, en 1985, l'introduction de la télédétection spatiale dans un système de production de données démographiques constituait un champ nouveau de recherches.

Les acquis en télédétection urbaine étaient alors peu nombreux : ils portaient essentiellement sur le traitement multi-dates de l'occupation du sol, l'évaluation de la quantité de végétation et l'observation des franges urbaines. L'analyse précise de l'information apportée par les capteurs à haute résolution en milieu urbain et le développement de méthodes spécifiques d'extraction de cette information restaient à poursuivre.

Quant aux sondages aréolaires, l'expérience demeurait limitée, surtout en démographie où l'habitude est toujours de tirer des échantillons de ménages ou d'individus sur liste. Que ce soit aux Etats Unis ou en France, l'essentiel de l'expérience dans ce domaine relevait de la statistique agricole : en 1985, seul le SCEES<sup>1</sup> avait obtenu des résultats intéressants sur l'intégration de la télédétection dans le système de production de statistiques agricoles en développant des méthodes de sondage aréolaires.

Ainsi, la réalisation de l'objectif du programme ne pouvait s'appuyer que sur un acquis méthodologique relativement limité dans chacun des deux grands domaines auquel il a trait (*l'interprétation des images satellite à haute résolution en milieu urbain et les sondages spatiaux en démographie urbaine*) et nécessitait des travaux approfondis dans ces deux directions de recherche.

Etant donné l'objectif du projet, proposer une méthode *opérationnelle* pour produire rapidement de l'information démographique en ville, et son caractère tout à fait exploratoire, un double souci a guidé la conception du programme :

---

<sup>1</sup> SCEES = Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques, du Ministère de l'Agriculture.

- d'une part, *tester la validité des méthodes mises au point au fur et à mesure de l'avancement des travaux ;*
- d'autre part, *proposer des solutions adaptées aux contextes matériel, financier et humain des villes des pays en développement.*

C'est en fonction de ces deux paramètres qu'ont été déterminés les sites de travail, les différentes phases du programme (Figure 1) et les plans d'expérience.

*Afin de disposer de références fiables, nous avons choisi de travailler d'abord sur une ville française, Marseille, disposant d'une image TM, d'un recensement récent disponible au niveau du district de recensement et d'une couverture aérienne à grande échelle : l'intégration de l'ensemble de ces informations dans une base de données gérée par le système d'information géographique SAVANE<sup>1</sup> nous a placés dans une situation d'expérimentation quasi-idéale. Toute méthode d'analyse de l'image satellite pouvait être évaluée en comparant ses résultats à l'information morphologique issue de la photo-interprétation et de contrôles terrain ; les travaux en sondages spatiaux bénéficiaient également de ce contexte d'information exhaustive, permettant de calculer les variances obtenues selon différents plans de sondage, et de mettre en relation les données morphologiques et démographiques.*

Après cette première phase de développement méthodologique sur la ville de Marseille, nous avons travaillé sur la ville de *Quito* (EQUATEUR), qui disposait d'images satellite SPOT et LANDSAT TM. Deux objectifs étaient assignés à cette seconde phase de la recherche, dans une ville d'un pays en développement : compléter et vérifier les résultats obtenus sur Marseille afin d'aboutir à une définition complète de la méthode, et réaliser une première application afin de tester son efficacité en termes de rapidité, coût et précision.

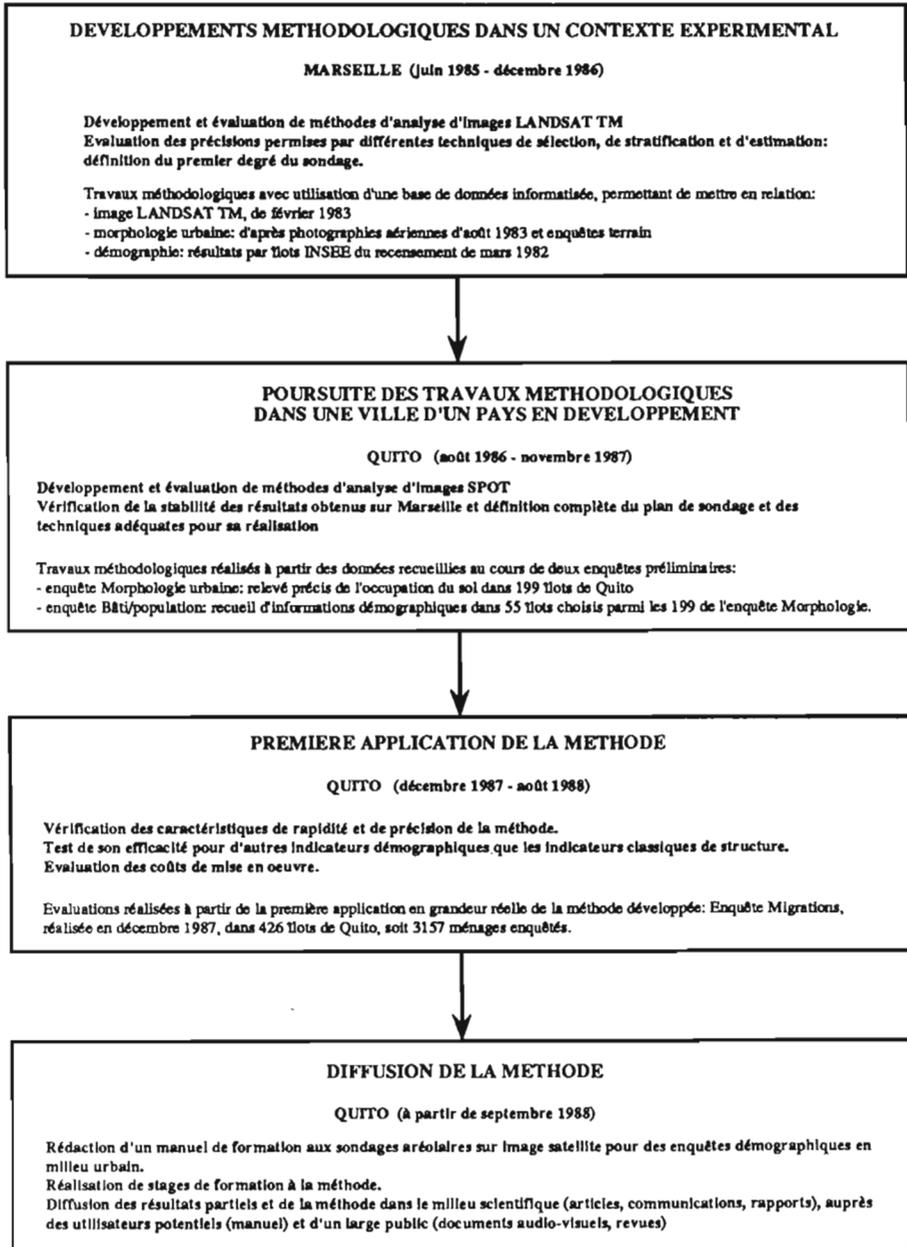
## 2.2. PREMIERE PHASE DE LA RECHERCHE : MARSEILLE

La zone d'étude, rassemblant environ 3000 districts de recensement, a été déterminée de manière à couvrir les différents types de quartiers de Marseille : quartiers industriels et de grands ensembles ouvriers du nord, quartiers résidentiels du sud, centre-ville, et zones pavillonnaires de l'est de la commune. Après une phase de travail consacrée à la constitution de la base de données, les différentes directions de

---

<sup>1</sup> Système développé par l'Unité d'Infographie de l'ORSTOM.

**Figure 1 - Les différentes phases du programme de recherche**



recherche de notre programme ont été menées simultanément, leurs résultats se conditionnant mutuellement.

Si la base de données concernait l'ensemble de la zone d'étude, tous les travaux méthodologiques n'ont pas été réalisés sur l'intégralité de cet espace. En effet, il était nécessaire d'extraire un échantillon pour la mise au point des méthodes relatives à l'interprétation d'images satellite : en procédant ainsi, nous avons pu vérifier la validité des traitements mis au point, c'est à dire tester qualitativement et quantitativement leur efficacité. Travailler sur un échantillon nous a permis de contrôler en permanence les méthodes développées, en les testant sur un espace disposant d'une information morphologique et démographique de référence.

Cherchant à extraire de l'image satellite une information morphologique efficace pour stratifier une ville devant faire l'objet d'une enquête démographique par sondage, les recherches en télédétection urbaine ont débuté, bien évidemment, par la *densité du bâti*, dont l'importance a été confirmée ultérieurement par les travaux en sondage ; elles se sont poursuivies par une ébauche de *typologie de l'espace urbanisé* à partir de l'image TM.

Parallèlement aux travaux en télédétection urbaine, les recherches en sondages visaient à répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les critères morphologiques pertinents pour établir la stratification d'une ville en vue d'une enquête démographique par sondage ?
- Quelle est la stratégie de sondage à la fois praticable et efficace ? Comment prévoir le gain apporté par une stratification donnée ? Quels sont la taille et le nombre de strates qui maximisent le gain de précision ? Quel doit-être le mode de tirage de l'échantillon (aléatoire ou systématique) et quelle probabilité de tirage en découle ? Quel estimateur utiliser ?

Pour répondre à ces questions, différentes stratégies de sondage ont été évaluées en soumettant les données exhaustives du recensement de population de l'INSEE à un programme informatique qui, en appliquant les formulaires associés à un plan de sondage donné, calcule la variance exacte des estimateurs correspondants.

A l'issue de cette étape de développement méthodologique sur Marseille, nous disposons donc d'une première série de résultats :

- chaîne de traitements opérationnelle pour obtenir une classification de l'espace urbanisé selon la densité du bâti à partir d'une image TM, et intégrer cette information dans une base de données localisées ;
- mesure du gain de précision apportée par une stratification selon la densité du bâti extraite de l'image satellite pour une série d'indicateurs démographiques ;
- définition du mode de sélection des îlots ;
- choix des estimateurs à utiliser.

Restaient à vérifier la portabilité des résultats obtenus à Marseille en télédétection comme en sondage et à les compléter pour aboutir à la définition et à la validation complètes de la méthode : c'était l'objet de la seconde phase de la recherche, menée à Quito dans le cadre du programme Atlas Informatisé de Quito<sup>1</sup>.

### 2.3. DEUXIEME PHASE DE LA RECHERCHE : QUITO

L'objectif de cette seconde phase des travaux, sur Quito, était double :

- poursuivre les développements méthodologiques afin d'aboutir à la définition complète du plan de sondage à mettre en oeuvre à partir d'une image satellite ;
- réaliser une application en vraie grandeur de la méthode pour vérifier ses caractéristiques de rapidité et de précision, évaluer les coûts de sa mise en oeuvre et mesurer son efficacité pour d'autres indicateurs démographiques que les indicateurs classiques de structure.

En effet, à l'issue des recherches sur Marseille, un certain nombre de questions de méthode restaient posées :

En télédétection :

- comment délimiter la zone urbanisée sur image satellite ?

---

<sup>1</sup> Programme de recherche auquel participent la Municipalité de Quito, l'Institut Géographique Militaire, l'Institut Panaméricain de Géographie et d'Histoire et l'ORSTOM (Département SUD, U.R. 5E et 5F).

- quelle est la chaîne de traitements la plus pertinente pour classer une image SPOT selon la densité du bâti, et quelle est l'efficacité de cette stratification ?
- quelle est la méthode la plus efficace pour mesurer la superficie des îlots, information indispensable au calcul des estimations à partir des informations collectées sur l'échantillon ?

En matière de sondages, outre les tests pour vérifier la stabilité des résultats obtenus sur Marseille, l'essentiel des problèmes à résoudre avaient trait :

- à la probabilité de sélection des îlots : doit-elle être proportionnelle à la surface bâtie ou à la surface totale ?
- aux caractéristiques du second degré du sondage : quels doivent être les taux et les techniques de sélection à appliquer ?

Afin de pouvoir rechercher des réponses à ces différentes questions et disposer des éléments nécessaires à l'application de la méthode, nous avons réalisé deux enquêtes préliminaires :

- l'enquête Morphologie urbaine (Octobre-Décembre 1986) a consisté à relever de manière précise l'occupation du sol dans un échantillon d'îlots de l'agglomération quiténienne, afin d'initialiser et tester la fiabilité des traitements des images satellite ; en raison de ces deux objectifs, 199 îlots ont été enquêtés.
- l'enquête Bâti-Population (Avril 1987) avait pour objet de recueillir des informations démographiques sur un sous-échantillon de 55 îlots choisis parmi les 199 enquêtés sur le plan morphologique : l'exploitation conjointe de l'information morphologique et démographique collectée sur ces 55 îlots est à l'origine de nouveaux résultats méthodologiques indispensables pour la définition complète du plan de sondage.

Pour la mise en oeuvre du plan de sondage de l'enquête Migrations, nous n'avons utilisé que *les documents de base susceptibles d'exister dans toute ville des pays en développement* (image satellite, et plans de ville non actualisés) et les résultats des deux enquêtes préliminaires ; nous nous placions ainsi dans une situation comparable à celle des sites auxquels notre méthode était destinée.

Les autres types d'information sur la morphologie urbaine existant à Quito mais généralement pas dans d'autres villes (photographies

aériennes récentes à grande échelle, plans au 1/2 000 actualisés) n'ont été consultés qu'à la fin de l'expérimentation, afin de mesurer la précision de chacune des étapes de sélection de l'échantillon ; de même, afin de pouvoir mesurer le gain de précision apporté par la seule utilisation de l'information morphologique extraite de l'image SPOT, nous n'avons pas cherché à améliorer cette stratification en ayant recours aux connaissances existant sur la ville.

A l'issue de cette seconde phase de nos travaux, sur Quito, nous avons donc mis au point et évalué toutes les étapes d'une méthode de production rapide de données démographiques par sondage aréolaire sur image satellite ; à partir de Septembre 1988, nous avons fait porter nos efforts sur la diffusion de la méthode, parallèlement à l'exploitation et à l'analyse démographique des résultats de l'enquête Migrations (structures de la population ; analyse des systèmes de résidence et pratiques professionnelles).

### 3. RESULTATS

Les travaux menés sur les sites de Marseille et Quito ont conduit à un certain nombre de résultats, concernant les méthodes d'analyse des images SPOT ou TM en milieu urbain et les sondages aréolaires à objectif démographique en ville ; c'est l'utilisation cohérente de l'ensemble de ces résultats qui a permis de *définir l'ensemble de la chaîne d'opérations nécessaire à la mise en oeuvre d'un sondage probabiliste à partir d'image satellite pour la production rapide de données démographiques en milieu urbain.*

La plupart des développements méthodologiques réalisés en télédétection urbaine dans le cadre de ce programme de recherche peuvent être utilisés en dehors de la problématique de mise au point d'une méthode de production de données démographiques : nous rappellerons donc d'abord ces résultats de portée plus générale avant de présenter l'enchaînement des opérations qui permet de sélectionner rapidement un échantillon sur image satellite pour réaliser une enquête démographique dans une ville ne disposant d'aucune base de sondage classique.

### 3.1. SYNTHÈSE DES RESULTATS EN TELEDETECTION URBAINE

Les résultats obtenus en méthodes d'analyse des images SPOT et TM s'inscrivent dans trois grands axes de travail : délimitation de la zone urbaine, classification de la zone urbanisée, observation des changements entre deux dates.

Comme le montre le tableau 1, dans certains cas les recherches ont débouché sur des méthodes d'ores et déjà opérationnelles, tandis que dans d'autres domaines, elles ont permis une avancée méthodologique notable, mais, n'étant pas encore directement applicables, ces méthodes ne peuvent pas encore être intégrées dans un système routinier de production d'information.

Les photographies couleurs présentées au centre de la présente publication illustrent deux des utilisations qui peuvent être faites dès maintenant des images satellites dans une perspective de production de données démographiques par sondage en milieu urbain : *délimitation, et stratification de la base de sondage.*

### 3.2. LA METHODE D'ENQUETE DEMOGRAPHIQUE PAR SONDEGE AREOLAIRE SUR IMAGE SATELLITE

#### 3.2.1. Description générale

Le résultat principal de nos recherches est la mise au point et l'évaluation d'une méthode de production rapide de données démographiques en ville par sondage aréolaire sur image satellite ; cette méthode, définie à partir des résultats obtenus sur Marseille et Quito, a été appliquée pour la première fois en décembre 1987 à Quito, pour une enquête Migrations.

Prenant en considération les contraintes d'application de la méthode dans des villes des pays en développement, les conséquences de l'utilisation d'une image satellite comme base de sondage et les résultats des expérimentations préliminaires sur les villes de Marseille et Quito, nous avons abouti à la définition d'un plan de sondage aréolaire sur image satellite adapté à notre objectif : la production rapide de données démographiques en ville . Le tableau 2 en précise les principales caractéristiques.

Tableau 1 - Résultats obtenus en télédétection urbaine

OBJECTIF	OBSERVATIONS
Intégration images satellite/ système d'information géographique	Utilisation combinée d'un SIG (SAVANE) et d'un logiciel de traitement d'image satellite, développé par l'Orstom. Facilite le développement de nouvelles méthodes d'analyse en télédétection; permet d'enrichir et actualiser rapidement une base de données, grâce à la télédétection.
Aide au tracé de la limite urbaine à partir de l'analyse numérique d'une image SPOT	Méthode simple, opérationnelle, d'aide à la décision pour définir sur des critères physiques constants la limite urbaine (seuillage de l'indice de végétation et de l'écart-type local calculé sur le canal panchromatique).
Extraction automatique du réseau de voirie sur image SPOT	Chaîne de traitements de morphologie mathématique, appliqués à une image résultant de la somme du canal panchromatique et du canal XS3. Pas encore satisfaisant dans un strict objectif d'extraction de voirie, mais efficace pour segmenter une image afin de créer des zones devant être classées.
Classification d'une image SPOT ou TM selon la densité du bâti	Deux méthodes, opérationnelles, pour classer une image en 6 niveaux de densité du bâti: classification de pixels, ou classification de zones issues de la segmentation de l'image ou de la digitalisation de plans urbains.
Typologie de l'espace urbain par analyse numérique d'une image SPOT ou TM	Méthodes basées sur l'analyse statistique fine de la radiométrie (quantiles) à l'intérieur de zones issues de la segmentation de l'image. Améliorations à envisager en intégrant la taille, la hauteur et la répartition des bâtiments (procédures automatiques à développer)
Analyse numérique des textures et structures	Essai de caractérisation et classification des quartiers des quartiers sur image SPOT en fonction de leur texture (matrices de cooccurrence) et de leur structure (transformée de Fourier). Recherches à poursuivre.
Détection des changements intervenus entre deux dates (images SPOT)	Composition colorée combinant le canal panchro. à deux dates différentes. Permet de détecter toute modification de l'occupation du sol.

COMPOSITION COLOREE SPOT - Quito (EQUATEUR)



Echelle approximative : 1 /100 000

La méthode de sondage développée consiste en un *sondage aréolaire à 2 degrés* :

- au 1er degré : les aires sélectionnées sont des *îlots*. Le tirage systématique à l'aide d'une grille de points assure une bonne répartition géographique des îlots, qui contribue à améliorer la précision des résultats ; la précision des estimations est également améliorée par une stratification sur la morphologie des quartiers.

Tableau 2 - Caractéristiques du plan de sondage

Structure générale	Sondage aérolaire stratifié à deux degrés Unités primaires = îlots Unités secondaires = ménages
Base de sondage	Ensemble de l'aire urbaine, dont sont exclues les zones non bâties
Stratification	Stratification à partir de la classification de l'image satellite en fonction de la densité du bâti.
Sélection des îlots (premier degré)	Sondage spatial systématique à l'aide d'une grille de points superposée à l'image satellite, le placement initial de la grille sur l'image étant aléatoire. Taux respectant la règle d'allocation aux strates choisie: proportionnelle ou optimale. Probabilité de sélection proportionnelle à la surface des îlots.
Sélection des ménages (deuxième degré)	Tirage équiprobable systématique sur liste des ménages de chaque îlot de l'échantillon. Taux variable selon le nombre de ménages de l'îlot.
Estimateurs	Total: estimateur sans biais sous plan à probabilités proportionnelles aux surfaces des îlots. Quotient: estimateur du ratio sous plan à probabilités proportionnelles aux surfaces des îlots.

- au 2ème degré : les unités enquêtées sont des *ménages*. Du fait du caractère marginal de la variance intra-îlots au regard de la variance inter-îlots, il y a intérêt à pratiquer le plus fort taux possible au premier degré, en n'enquêtant qu'une faible fraction des ménages au second degré.

L'image satellite sert :

- à la *définition* de la base de sondage : la limite urbaine est tracée sur l'image, à partir de l'information fournie par celle-ci ;
- à la *stratification* de la base de sondage : une technique efficace (réduction d'environ 40 % de l'erreur d'échantillonnage) et adaptée au savoir-faire actuel en télédétection urbaine est la stratification sur le critère de densité du bâti ;
- à la *sélection d'un échantillon d'îlots* géographiquement répartis sur l'ensemble de la ville.

### 3.2.2. Les étapes de sa mise en oeuvre

Pour mettre en oeuvre le plan de sondage décrit ci-dessus, un certain nombre d'opérations doivent être réalisées ; la figure 2 résume l'enchaînement de ces différentes étapes. Les paragraphes suivants sont consacrés à une brève description de chacune des principales étapes.

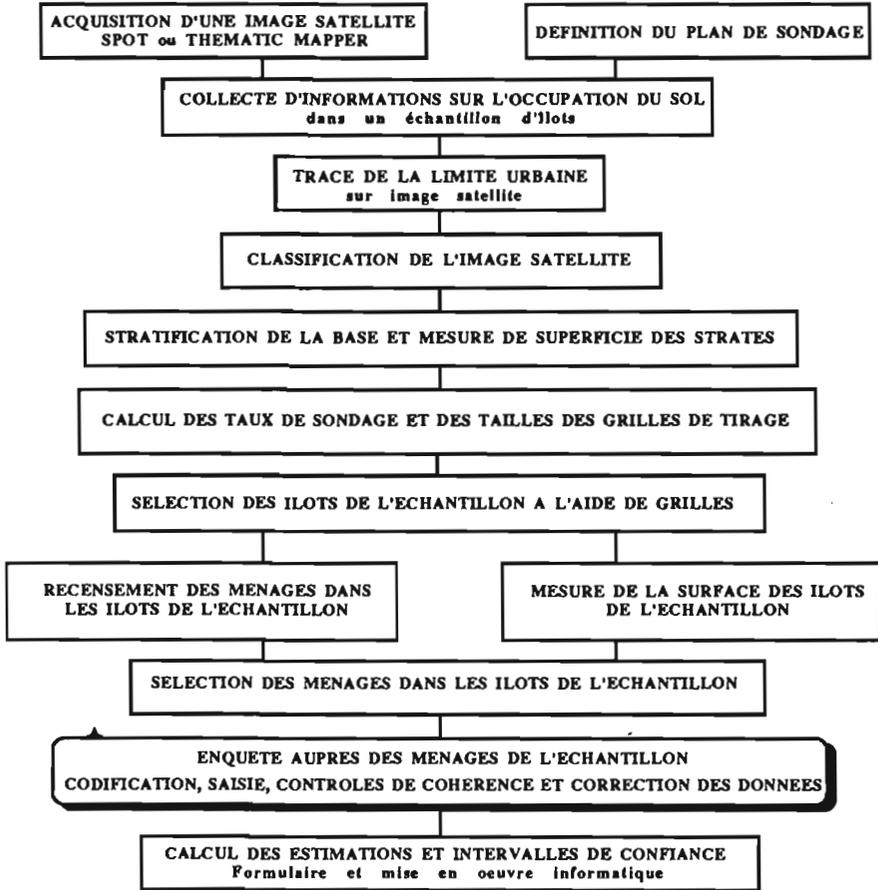
#### \* La délimitation de la base de sondage sur image satellite

Délimiter la base de sondage consiste à tracer la limite urbaine sur l'image satellite. Etant donné le type d'information fournie par les images satellite, il est bien évident qu'on ne peut extraire de celles-ci que des limites traduisant un phénomène *physique* ; une solution intéressante est de définir la ville comme une zone continue d'espace bâti.

Si l'on retient cette définition, deux techniques différentes peuvent être mises en oeuvre, selon le type d'image dont on dispose :

- si l'on ne dispose que du film de l'image panchromatique SPOT : le tracé est réalisé sur un tirage photographique de cette image à une échelle comprise entre le 1/ 30 000 et le 1/ 15 000, en utilisant les teintes de gris de l'image, l'agencement général, la structure et la texture qui

Figure 2 - Les différentes étapes de la mise en oeuvre de la méthode



renseignement sur le degré de végétation ou de minéralisation (construction) et le type de tissu urbain ; la limite est tracée là où se termine une zone continue d'espace bâti, en s'efforçant de suivre une limite (naturelle ou artificielle) visible sur l'image et sur le terrain.

- si l'on dispose, en plus, d'une bande magnétique SPOT XS ou TM : il est possible de réaliser un traitement numérique simple pour aider à la détermination de la limite urbaine, qui sera établie, comme

précédemment, sur un tirage à grande échelle du canal panchromatique. L'objet de ce traitement est de classer l'image selon l'indice de végétation et le degré d'hétérogénéité des valeurs radiométriques ; faisant l'hypothèse que la zone urbaine correspond à un espace à dominante minérale et fortement hétérogène, on peut ainsi isoler, numériquement, la zone urbanisée.

Dans le cas où la base de sondage doit nécessairement correspondre à des limites administratives, le travail de délimitation de la base de sondage consiste uniquement à reporter le tracé de ces limites, connues par un document cartographique quelconque, sur l'image satellite.

**\* La stratification de la base d'après l'information fournie par l'image satellite**

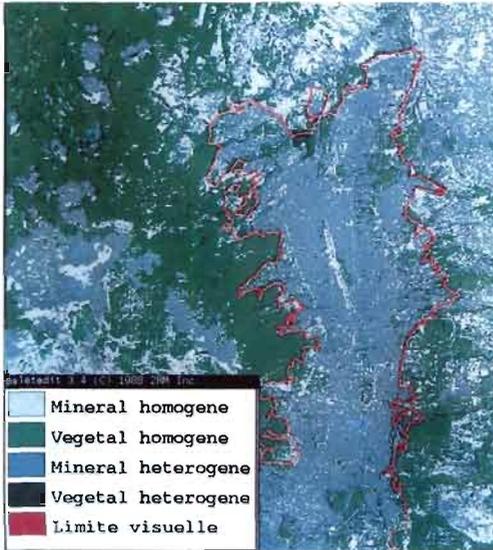
La stratification de la base de sondage est basée sur une classification *supervisée* de l'image satellite, c'est à dire initialisée sur une information précise collectée, au sol, dans un certain nombre d'îlots. La méthode de classification que nous préconisons actuellement est une classification selon la densité de l'espace bâti : aisément modélisable à partir des images satellite, la densité du bâti est, d'autre part, un critère de stratification efficace pour une enquête socio-démographique.

Cette classification est basée sur la recherche de la meilleure régression entre la densité du bâti observée sur le terrain dans les îlots test et l'indice de végétation (dans le cas d'une image SPOT) ou les moyennes radiométriques des canaux 3, 4 ou 5 d'une image TM ; les coefficients de la régression sont ensuite appliqués à l'ensemble de l'image. Après avoir seuillée l'image en 3 à 6 classes, on dispose donc d'une classification de la zone urbanisée en fonction de 3 à 6 niveaux de densité du bâti.

Une fois en possession de cette classification, il s'agit d'élaborer la stratification proprement dite, c'est à dire de délimiter des zones le plus homogènes possibles au regard de ce critère de densité du bâti. Cette opération est réalisée sur un tirage à grande échelle de l'image satellite, en s'efforçant de suivre des frontières, naturelles ou artificielles, afin de ne pas couper les pâtés de maisons, qui constitueront l'unité de base de l'échantillon au premier degré.

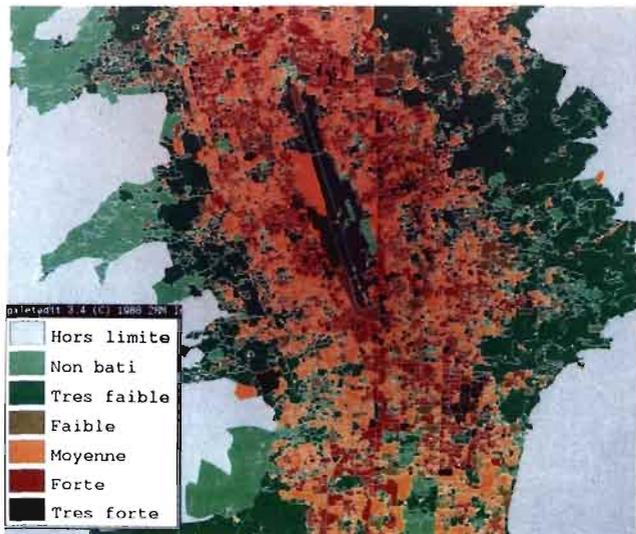
Enfin, la mesure de superficie des strates étant une information nécessaire pour le calcul des estimateurs, on mesure les zones ainsi délimitées.

## UTILISATION DES IMAGES SPOT POUR DES ENQUETES SOCIO-DEMOGRAPHIQUES PAR SONDAGE



Délimitation de la base de sondage : tracé de la limite urbaine

Stratification de la base de sondage selon la densité de constructions



### **\* La sélection de l'échantillon d'îlots**

Le premier travail consiste à déterminer le nombre total de pâtés de maisons à enquêter et leur répartition dans les strates ; ce calcul nécessite de connaître la surface totale de chaque strate (mesurée sur image satellite), et la surface moyenne des pâtés de maisons de la strate (connue d'après les relevés terrain). Le tirage de l'échantillon de pâtés de maisons s'effectue ensuite indépendamment dans chaque strate à l'aide d'une grille placée sur l'image satellite, la maille de la grille étant calculée pour respecter le taux prévu ; pour obtenir la surface de la maille de la grille de tirage dans chaque strate, il suffit de diviser la surface totale de la strate mesurée sur l'image par le nombre d'îlots à sélectionner, d'où l'on déduit la taille de la maille.

Après s'être assuré d'avoir dans chaque strate le nombre de points de sondage voulu, l'étape suivante consiste à identifier sur l'image les îlots correspondant aux points de la grille. Lorsque le type de quartier, et donc le degré de lisibilité de la voirie sur l'image rendent impossible une identification directe des îlots sur l'image, ce travail est réalisé, avec le superviseur chargé de la zone, directement sur le terrain.

### **\* Le recensement des ménages et la mesure des surfaces des îlots de l'échantillon**

Le recensement des ménages qui occupent les pâtés de maisons sert à sélectionner l'échantillon de ménages à enquêter et à estimer les totaux, moyennes et quotients au sein des unités primaires, c'est-à-dire les pâtés de maisons.

Ce travail de recensement des ménages dans chaque îlot de l'échantillon est confié aux superviseurs, qui établissent, sur une fiche prévue à cet effet, un schéma simplifié du pâté de maisons sur lequel figurent : les renseignements nécessaires à l'identification du pâté de maisons par l'enquêteur (noms des rues bordant l'îlot, éléments naturels servant de limites...etc), le dessin de l'ensemble des bâtiments de l'îlot, le nombre de ménages dans chacun des bâtiments, la numérotation des ménages de 1 à N, par ordre croissant en suivant le tour de l'îlot.

Après le recensement des ménages, le superviseur effectue la mesure de la surface de l'îlot : cette mesure est indispensable pour pratiquer les estimations des totaux, moyennes et quotients au niveau de la base entière, de chacune des strates ou d'un éventuel autre découpage de la ville.

A l'aide d'un décimètre, d'un clinomètre et d'une boussole, le superviseur établit avec le maximum de précision possible un croquis mentionnant les

angles et les longueurs de chaque segment droit délimitant l'îlot ainsi que leur pente. La surface est ensuite calculée, informatiquement ou manuellement, à partir du schéma et des mesures effectuées par le superviseur .

**\* La sélection des ménages à enquêter**

La détermination du nombre de ménages à enquêter dans chaque îlot résulte d'un compromis entre deux objectifs contradictoires :

- assurer, par un petit nombre d'enquêtes dans chaque îlot, la dispersion géographique maximale de l'échantillon au premier degré, ce qui assure une meilleure précision des estimations globales;
- conserver dans chaque îlot un nombre suffisant de ménages enquêtés pour produire des estimations fiables dans chaque unité primaire (îlot).

Le premier objectif étant généralement prioritaire, on adopte la stratégie suivante de sélection des ménages: on enquête un petit nombre constant de ménages ( $n_1$ , de l'ordre de 5 ou 10) dans tous les îlots contenant au moins  $n_1$  ménages, et on enquête tous les ménages dans les îlots contenant moins de  $n_1$  ménages.

Dans les îlots comptant moins de  $n_1$  ménages, l'enquête est exhaustive: l'enquêteur enquête tous les ménages identifiés sur le schéma d'îlot réalisé par le superviseur. Si l'îlot compte plus de  $n_1$  ménages, le superviseur procède à un tirage systématique sur la liste des ménages de l'îlot numérotés de 1 à N ; il établit ainsi la liste des  $n_1$  ménages à enquêter. L'enquêteur doit enquêter tous les ménages de la liste.

**\* La production des résultats : estimations et intervalles de confiance**

La dernière étape consiste à estimer les résultats démographiques au niveau de la population entière à partir des informations collectées sur l'échantillon de ménages. Pour cela, on applique un formulaire d'estimation correspondant à la structure de sondage suivante :

- premier degré : sondage aléatoire stratifié avec probabilités de sélection proportionnelles aux surfaces des unités primaires (îlots);
- second degré : sondage aléatoire équiprobable: recensement dans les unités comptant moins de  $n_1$  ménages,  $n_1$  ménages enquêtés dans les autres îlots.

Le calcul des estimations des statistiques recherchées et l'évaluation des erreurs d'échantillonnage qui leur sont associées sont réalisées informatiquement, à l'aide de programmes chaînant des commandes d'un logiciel approprié (par exemple, sur IBM AT : SPSS, SAS, DbaseIII) pour appliquer le formulaire de calcul des estimateurs et de leur variance.

#### **4. EVALUATION DE LA METHODE EN TERMES DE COÛTS ET DE PRECISION**

La méthode que nous avons développée vient d'être décrite pas à pas dans le chapitre précédent ; pour conclure sur son intérêt, il importe maintenant d'apporter des éléments d'information sur ses coûts d'application et les niveaux de précision obtenus.

##### **4.1. L'estimation des coûts d'application de la méthode à partir de l'exemple de Quito**

A partir de la comptabilité des frais engagés durant toute la phase d'application à Quito, il nous a été possible de calculer les fonctions de coût et de précision caractérisant la méthode. Les évaluations auxquelles ces fonctions conduisent sont présentées dans les tableaux 3 à 5. Les calculs effectués correspondent au cas de figure suivant :

- il n'existe ni matériel informatique, ni logiciel, ni image satellite ou cartographie : l'équipement nécessaire à l'application de la méthode doit être acheté ;
- l'allocation aux strates est réalisée avec un taux constant dans toutes les strates ;
- sont inclus tous les salaires à l'exception des 6 mois de salaire d'une personne qualifiée pour la sélection de l'échantillon, l'encadrement des opérations de collecte, codification et saisie de l'information.

Deux remarques doivent être faites par rapport à ces informations de coût.

L'analyse conjointe des coûts et des précisions permet de définir un intervalle de variation de la taille de l'échantillon au sein duquel le coût d'une augmentation significative de la précision reste raisonnable, une sorte de zone de "bon rapport qualité/prix". Cette zone couvre

Tableau 3 - Equipement minimum nécessaire

Equipement	Coûts 1988, à Quito
IBM AT ou compatible, disque dur 20 Mo, imprimante	15 000 FF
Logiciel de saisie et traitements statistiques des données d'enquête sur IBM AT(ex: SPSS PC)	12 300 FF
Logiciel de traitement d'image satellite sur IBM AT (exemple: TIMOR, développé par l'ORSTOM)	600 FF
Boussole, clinomètre, décimètre	2 500 FF
Planimètre manuel	1 500 FF
<b>TOTAL EQUIPEMENT</b>	<b>31 900 FF</b>

Tableau 4 - Postes de dépense (Quito, 1988, en Francs français)

Postes fixes (équipement minimum)	Postes variant selon la taille de l'échantillon et le questionnaire
Equipement informatique 15 000 Logiciels 12 900 Equipement de mesure 4 000 Achat image satellite SPOT (Bandes magnétiques XS et Pa, film Pa) 36 000 Collecte d'informations sur l'occupation du sol 6 000	Mesure de surface des îlots 9,36 / îlot  Recensement des ménages, collecte démo. sur l'échantillon de ménages, codification, et saisie de l'information collectée: - questionnaire court 11,81/ménage - questionnaire long 16,65/ménage
<b>TOTAL 73 900</b>	

Tableau 5 - Coût et précision selon la taille de l'échantillon

Nbre d'îlots enquêtés (m)	Nombre de ménages enquêtés	Coût questio. court (FF)	Coût questio. long (FF)	Précision: intervalle de confiance à 95 % (en % de la pop. totale)
100	750	83 694	87 324	+/- 27,8
500	3 750	122 870	141 020	+/- 12,4
1000	7 500	171 840	208 140	+/- 8,8
2000	15 000	269 780	342 380	+/- 6,2

l'intervalle allant d'un échantillon de 250 îlots à un échantillon de 1200 îlots : en deçà de cette taille d'échantillon, la méthode est trop imprécise, au delà elle est trop chère.

L'investissement que représente l'achat et le traitement de l'image satellite apparaît extrêmement concurrentiel par rapport aux coûts correspondant à l'actualisation classique d'une base de sondage (mise à jour de la cartographie et de la liste de ménages), surtout si l'on considère qu'une même image peut servir à de nombreuses applications sur une même agglomération. En effet, il est probable que, dans un avenir assez proche, beaucoup de villes feront régulièrement l'acquisition de ces images pour de toutes autres raisons que des enquêtes démographiques : ainsi, le coût d'achat des documents satellitaires sera réparti entre plusieurs utilisateurs et deviendra donc d'autant plus accessible.

#### 4.2. La précision des résultats

Trois démarches ont été mises en oeuvre pour permettre une bonne connaissance de la précision de la méthode, élément indispensable pour la mise au point et l'évaluation de celle-ci :

- calcul des variances des estimateurs selon différents plans de sondage à partir des expériences menées sur Marseille (données exhaustives) et Quito (données sur échantillon) ;
- évaluation séparée de la précision des techniques correspondant à chacune des étapes de la sélection de l'échantillon et d'inférence ;
- estimations des variances des estimateurs calculés à partir des données collectées lors de la première application de la méthode (enquête Migrations, décembre 1987, Quito), et comparaison avec les variances obtenues avec des plans de sondage classiques

Il serait trop long de rappeler ici tous les résultats relatifs à la précision de la méthode, consignés, au fur et à mesure de l'avancement des travaux, dans nos différents rapports intermédiaires. Nous insisterons sur trois d'entre eux, fondamentaux, qui soulignent l'intérêt de pratiquer un sondage par grille sur une image satellite classée selon la densité du bâti, pour réaliser une enquête démographique en milieu urbain :

1. Parmi les stratifications actuellement réalisables sur image satellite, la plus efficace est une stratification en six niveaux de densité du bâti, dont le premier niveau permet d'isoler les espaces non construits, à exclure de la base. Pour l'estimation des effectifs, le gain que permet la stratification en cinq niveaux de densité du bâti se situe autour de 30 à 40 % de la variance de l'estimateur.

**Tableau 6 - Modes d'évaluation des différentes étapes**

ETAPE	MODE D'EVALUATION
Détermination de la limite urbaine sur image SPOT	Comparaison avec la limite déterminée par analyse visuelle de la couverture photographique de Quito de novembre 1987 (1/ 40 000)
Classification en 6 niveaux de densité du bâti sur image SPOT	Comparaison avec la densité observée sur le terrain en novembre 1986 (199 îlots de Quito)
Classification en 6 niveaux de densité du bâti sur image TM	Comparaison avec la densité observée sur la couverture photo. de Marseille d'août 1983 (1/ 23 000), et vérifications terrain dans 80 îlots
Mesure de surface des îlots	Comparaison, sur un échantillon de 90 îlots, des mesures faites sur le terrain, sur un tirage au 1/15 000 du canal panchromatique SPOT, ou informatiquement par comptage des pixels, avec les mesures obtenues par planimétrie sur les plans au 1/ 2 000 de l'Institut Géographique Militaire

2. Le caractère systématique du sondage aréolaire (réalisé à l'aide d'une grille plaquée sur l'image satellite), en assurant une bonne répartition géographique de l'échantillon, améliore la précision des estimations : on évalue ce gain à 20 ou 30 % de la variance du sondage strictement aléatoire au même taux.

3. Si l'on considère l'effet cumulé du tirage systématique et de la stratification, l'allocation aux strates étant optimale, le gain global de précision se situe, selon l'indicateur démographique considéré, entre 60 et 80 % de la variance d'un tirage aléatoire non stratifié.

La mesure de la précision des différentes étapes de la sélection de l'échantillon sur une image SPOT ou TM (Tableau 6) a permis de sélectionner les techniques les plus performantes pour chacune des étapes, autorisant ainsi une mise en oeuvre correcte du plan de sondage.

Les coefficients de variation des estimateurs issus de l'enquête Migrations, dont le tableau 7 donne quelques exemples, confirment la performance du plan de sondage à partir d'image SPOT adopté pour cette enquête.

**Tableau 7 - Précision de quelques estimations à partir de l'enquête Migrations (3157 ménages enquêtés, soit 1,3 % des ménages de Quito)**

Variable démographique	Estimation (ensemble de la base)	Estimation du coefficient de variation de l'estimateur (%)
% de ménages de 7 personnes ou plus	9,84	6,80
% de plus de 60 ans	5,78	5,40
% ménages propriétaires du logement	46,01	2,49
Sex ratio	0,957	1,50
% de natifs de Quito	63,17	1,38
% éduc.second. ou + (femmes 15-49 ans)	71,34	1,18
Taille moyenne du ménage	4,54	1,10
Age moyen du chef de ménage	43,96	1,02

Pour analyser correctement ces chiffres, trois remarques s'imposent :

- l'échantillon de l'enquête Migrations a une taille relativement réduite, correspondant aux limites du budget alloué au programme;
- l'erreur d'échantillonnage est nettement surestimée, du fait de l'emploi de formules correspondant à un tirage avec remise et surtout de la méthode retenue pour évaluer la variance du sondage systématique pratiqué (les chiffres donnés ne tiennent compte d'aucune de ces deux surestimations);
- des améliorations connues, dont les répercussions en termes de coût sont quasi nulles, n'ont pas été retenues pour cette enquête, afin de respecter un plan d'expérience permettant de tester une stratification *issue uniquement de la télédétection* et d'estimer la variance au second degré du sondage : il s'agit de l'utilisation des connaissances sur la ville permettant d'améliorer la stratification et de l'augmentation du taux au premier degré (îlots) avec allègement au second degré (ménages).

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux effectués depuis 1985 sur Marseille et Quito ont vérifié l'hypothèse de base du programme de recherche : la prise en compte de la morphologie urbaine telle qu'elle peut être extraite d'une image satellite SPOT ou TM permet de définir un plan de sondage rigoureux et performant. Ces travaux sont à l'origine de résultats de portée générale, en sondage aréolaire, télédétection urbaine et système d'information géographique, résultats utilisés pour établir la chaîne complète de notre méthode de production de données démographiques intégrant la télédétection spatiale.

La première application de cette méthode, à Quito en décembre 1987, a confirmé l'intérêt de la méthode et permis d'évaluer les coûts de mise en oeuvre de la méthode, et la précision des résultats : dans une ville ne disposant d'aucune base de sondage classique, nous avons pu sélectionner de façon rigoureuse, à partir d'une image satellite SPOT, un échantillon pour une enquête démographique.

La méthodologie que nous avons développée peut apporter dès maintenant des éléments de réponse aux problèmes posés par l'observation des populations des villes des pays en développement : en suivant les étapes décrites dans le chapitre 3 de cet article, cette

technique de production de données démographiques pourrait être appliquée dès maintenant dans d'autres villes.

Si la méthode développée peut d'ores et déjà être utilisée en appliquant le schéma proposé actuellement, elle est aussi, bien évidemment, perfectible.

D'une part, la multiplication des applications dans des contextes urbains différant tant sur un plan physique que socio-économique contribuera nécessairement à un perfectionnement de la méthode de sondage aréolaire sur image satellite que nous avons présentée dans cet article.

D'autre part, il est bien évident que la seule information sur la densité du bâti ne rend compte que de manière très fruste de la morphologie d'une ville et ne constitue qu'une infime partie du "potentiel" d'informations que constitue une image satellite SPOT ou TM : le développement de méthodes pour extraire de l'image des informations sur la hauteur et l'agencement des bâtiments et l'intégration de celles-ci dans les estimateurs permettraient d'augmenter la précision des résultats de l'enquête démographique.

Accumuler des expériences d'application de notre méthode, intégrer les innovations que connaîtra la télédétection urbaine contribueront à améliorer la solution que nous proposons aujourd'hui.

Avec la méthode développée, il est possible de mettre en oeuvre rapidement une enquête par sondage dans une ville ne disposant d'aucune base de sondage classique. *Rapidité* et *spatialisation* des résultats en fonction de découpages divers de la ville sont des caractéristiques de notre méthode qui devraient séduire les différents acteurs de la gestion urbaine. Sélectionner l'échantillon d'une enquête socio-démographique sur image satellite privilégie aussi la mise en évidence des *différences internes* à la ville et l'analyse de la *dynamique des sous-populations citadines*, approches de l'urbanisation dont l'intérêt est souvent souligné dans les recherches sur les villes des pays en développement. Et l'allègement de l'échantillon enquêté grâce au gain de précision apporté par le plan de sondage autorise, pour un même coût global, une *observation plus fouillée* que par les méthodes traditionnelles de sondage.

On peut donc espérer qu'au delà de la satisfaction des besoins d'informations de base actualisées et localisées, cette méthode participe à la production de connaissances sur les formes et les mécanismes de l'urbanisation dans les pays en développement ; là est la raison d'être de ce détour méthodologique de cinq années.

## BIBLIOGRAPHIE SELECTIVE DE L'EQUIPE

### 1. Ouvrages

DUREAU F., 1989.

*Quito. Estadísticas de población y vivienda. 1987.*  
Municipio de Quito - ORSTOM, 182 p.

DUREAU F., BARBARY O., MICHEL A., LORTIC B., 1989.

*Sondages aréolaires sur image satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain. Manuel de formation. (3 versions : français, anglais, espagnol)*  
Paris, ORSTOM, Collection Didactiques, 40 p.

### 2. Articles

DUREAU F. et GUILLAUME A., 1984.

*De l'usage de la télédétection pour l'observation socio-démographique en milieu urbain tropical.*  
in : ORSTOM, Bulletin du Département D, n° 10, pp. 8-15.

DUREAU F. et GUILLAUME A., 1984.

*La démographie depuis l'espace : un nouveau système d'observation ?*  
in: STATECO, n° 38. Paris, INSEE, pp. 5 - 46.

DUREAU F., 1986.

*A propos du traitement informatique des données localisées. Une expérience en cours : télédétection et observation des populations urbaines.*  
in: L'infographie à l'Orstom. Paris, ORSTOM, Collection Colloques et séminaires, pp. 263 - 286.

DUREAU F. et BARBARY O., 1987.

*Pour une méthode de collecte démographique en ville intégrant la télédétection spatiale.*  
in: Informatique et sciences humaines. Paris, EHESS.

DUREAU F., MICHEL A., LORTIC B.,  
BARBARY O., SOURIS M., 1989.

*Suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique.*

in : Bulletin de la SFPT, n° 115, pp. 75-77.

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).*

in: Télédétection et urbanisme. Paris, Service Technique de l'Urbanisme.

### 3. Communications publiées

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.

in : Actes du Colloque, UIESP, Florence (Italie), 19 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. Lyon, 15 p.

DUREAU F., 1988.

*A propos de l'analyse des systèmes résidentiels. Présentation de l'enquête Migrations réalisée à Quito (Equateur) en décembre 1987.*

Communication présentée au colloque Migrations, changements sociaux et développement, ORSTOM, Paris, 20-22 septembre 1988. Paris, ORSTOM, Collection Colloques et séminaires (à paraître), 17 p.

DUREAU F., BARBARY O., LORTIC B., MICHEL A., 1989.

*Une nouvelle méthode de collecte d'information sur les populations urbaines : l'enquête démographique par sondage aréolaire sur image satellite.*

Communication au XXI<sup>e</sup> congrès général de l'Union Internationale pour l'Etude Scientifique de la Population, New Dehli (Inde), 20-27 septembre 1989, 17 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).*

in: SPOT 1. Utilisation des images, bilan, résultats. Paris, novembre 1987. Paris, CNES, pp. 505-514.

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, Colombia, Bogota, 16-20 novembre 1987. Quito, ORSTOM, 34 p.

MICHEL A., LORTIC B., DUREAU F., 1988.

*Stratification de l'espace urbain quiténien dans une problématique démographique. Application à Quito (Equateur).*

Communication présentée aux Journées de Télédétection de l'ORSTOM, Bondy, 17-19 novembre 1988. Paris, ORSTOM, Collection Colloques et séminaires.

#### 4. Principaux rapports multigraphiés

BARBARY O., 1988.

*Sondages aréolaires pour l'estimation de données démographiques en milieu urbain. Essai de définition d'une méthode de collecte intégrant l'information satellitaire, application aux villes des pays en développement.*

Paris, EHESS, Thèse de doctorat , 641 p.

- BARBARY O., DUREAU F. MICHEL A., 1988.  
*Définition et mise en oeuvre d'un plan de sondage aréolaire sur image SPOT pour une enquête démographique à Quito (Equateur).*  
 Quito, ORSTOM, 204 p.
- DUREAU F., BARBARY O., LORTIC B., MICHEL A., 1989.  
*L'utilisation de la télédétection pour l'observation démographique en milieu urbain.*  
 Convention Ministère de la Coopération-ORSTOM.  
 Rapport final. Paris, ORSTOM, 31 p.
- Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1986 et 1987.  
*Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. ATP CNRS/CNES. Rapport intermédiaire. Avril 1986. Rapport final, Août 1987.*  
 Paris, ORSTOM, 190 p. et 591 p.
- Equipe ORSTOM (UR 15 du département SDU), 1988.  
*L'utilisation de l'imagerie SPOT pour l'observation démographique en milieu urbain. Rapport final CNES, avril 1988.*  
 Paris, ORSTOM, 217 p.
- EBERHARD J.M., 1987.  
*Télédétection urbaine : éléments de caractérisation géographique des quartiers de Quito à l'aide d'une image SPOT.*  
 Paris, EHESS, mémoire de DEA, 98 p.
- MICHEL A., 1988.  
*Stratification de l'espace urbain à partir d'images satellite pour réaliser un sondage à objectif démographique. Mise au point et évaluation des méthodes d'analyse des images SPOT et LANDSAT TM en milieu urbain.*  
 Paris, EHESS, Thèse de doctorat, 369 p.